

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**Институт металлургии
и материаловедения
им. А.А. Байкова РАН**

80 лет

Москва

ИМЕТ РАН

2018 г.

УДК 669.1; 546.1; 546.3

Институт металлургии материаловедения им. А.А. Байкова РАН – 80 лет.
Сборник научных трудов.
М.: Интерконтакт Наука, 2018, 644 с.

ISBN 978-5-902063-58-2

Сборник подготовлен в связи с 80-летием создания Института Металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук. В статьях содержатся материалы по основным направлениям научной деятельности в области металлургии черных, цветных и редкоземельных металлов, материаловедения металлических, керамических, нанокристаллических, композиционных материалов, развития методов исследования состава, структуры и свойств материалов.

Материалы сборника могут представлять интерес для ученых и сотрудников научно-исследовательских и учебных институтов и университетов, промышленных предприятий, работающих в области металлургии черных, цветных и редких металлов, материаловедения неорганических материалов и методов исследования.

Редакционная коллегия

Академик К.А. Солнцев (ответственный редактор), академик О.А. Банных (зам. Ответственного редактора), академик В.М. Бузник, академик В.М. Иевлев, академик Ю.В. Цветков, чл.-корр. РАН М.И. Алымов, чл.-корр. РАН С.М. Баринов, чл.-корр. РАН Г.С. Бурханов, чл.-корр. РАН Григорович К.В., чл.-корр. РАН А.Г. Колмаков, чл.-корр. РАН В.С. Комлев, д.ф.-м.н. С.В. Симаков, к.т.н. О.Н. Фомина (ответственный секретарь)

ISBN 978-5-902063-58-2

© ИМЕТ РАН, 2018

Экспериментальные данные о скоростях компонентов медленных уединенных упругих волн в образцах из меди

Е.М. Кудрявцев, В.В. Рощупкин, М.А. Покрасин

DOI: 10.30791/978-5-902063-58-2-594-631

Факт существования Медленных уединённых упругих волн (МУУВ) с дискретными скоростями [1], обнаруженных в ФИАНе в 1991 г., оказался подтвержденным в ряде работ сотрудников ИМЕТ РАН [2-4]. В дальнейшем был выполнен целый ряд совместных исследований. Их результаты обсуждались и докладывались на целом ряде российских и международных конференций [5-8].

К настоящему времени опубликованы обзоры по экспериментальным и теоретическим исследованиям МУУВ с дискретными скоростями их компонентов [9-13]. Они были подготовлены с целью собрать все известные результаты исследований. В частности, в работах [11-13] полученные результаты представлены сгруппированными по различным методам исследований.

В настоящей работе собраны результаты, полученные в разное время, разными авторами, с помощью разных методик для одного из элементов Таблицы Менделеева (меди).

Первый раздел работы посвящен истории возникновения и развития представлений о солитонах.

Во втором разделе содержатся результаты по исследованию генерации МУУВ при плоском ударе и статической нагрузке [14-19]. Их можно считать независимым подтверждением общей идеи и результатов всей работы.

В третьем разделе приведены результаты совместных исследований сотрудников ФИАН и ИОФАН по измерениям скоростей солитоноподобных образований с помощью термопары и ИК- детектора [20-22].

В четвертом разделе представлены результаты совместных исследований МЭИ и ФИАН по возбуждению МУУВ с помощью электронного пучка [23, 24].

В Заключении подведены итоги и поставлены задачи по продолжению исследования меди с целью получения данных по всему списку скоростей солитоноподобных возбуждений в этом металле.

I. К ИСТОРИИ ВОПРОСА

Настоящая работа посвящена одному из экспериментальных исследований нелинейных явлений в конденсированных средах (в данном случае, в металлах), к которым относятся уединённые волны и, как частный их случай, - солитоны.

Дж. С. Рассел [25] обнаружил на поверхности канала уединённую волну (в виде округлого продольного холма длиной 9 м и высотой около 0,4 м), которая двигалась со скоростью около 16 км/час, т. е. в ~ 200 раз медленнее скорости звука. Он много лет исследовал обнаруженное им явление - «волну трансляции» (или уединённую, “solitary,” волну на поверхности воды, которую в дальнейшем назвали «солитон»). Дж. С. Рассел показал, что она может распадаться на две волны, движущиеся с разными, но одного и того же порядка, скоростями. Он описал ещё 4 свойства таких волн: постоянство их скорости; зависимость скорости от глубины канала и высоты волны (с учётом ускорения свободного падения); упомянутые две волны проходят друг через друга без задержки, как и малые волны от брошенного на воду камня; наблюдаются только «волны повышения» (относительно уровня поверхности воды).

Определенную ясность в теорию этого нелинейного явления, обнаруженного Дж. С. Расселом на поверхности воды, внесли голландцы Д. Кортевег и Г. Де-Вриз [26], показавшие, что эти волны имеют несинусоидальную форму, приближаясь к ней только при малой высоте.

Я.И. Френкель и Т.А. Конторова [27] ввели понятие о подвижном дефекте особого рода в кристаллической структуре твёрдого тела («дислокация ФК»). Соответствующую волну в дальнейшем стали называть солитоном.

По-новому открыли эту разновидность волны Н. Забуски и М. Крускал [28]. Они назвали её солитоном, обнаружив, что она обладает свойствами как волны, так и частицы.

Позднее М. Крускал в соавторстве с М. Пейрардом [29] вернулись к разработке идей Френкеля-Конторовой. Они установили компьютерными расчётами, что ФК-солитон в кристалле движется с дискретными скоростями, значения которых отличаются в 2 или 1,5 раза.

Э. Ферми и др. [30] провели исследование по проблеме теоретического объяснения конечной теплопроводности в твердых телах (с помощью одного из первых компьютерных экспериментов). Моделью твердого тела служила одномерная решетка (набор точечных масс, связанных пружинами). Авторы [30] пытались установить, как быстро первоначальное

возбуждение низшей моды одного из нелинейно связанных осцилляторов распределится равномерно среди всей цепочки (то есть когда энергия распределится поровну между всеми модами колебаний). По времени установления релаксации энергии можно было бы измерить коэффициент диффузии. Результат исследования [30] был неожиданным: энергия вообще не термализовалась. Через много времени она опять собиралась на низшей моде одного из нелинейно связанных осцилляторов, и затем вся картина событий снова повторялась.

М. Тода [31] исследовал роль солитонного теплопереноса в одномерной цепочке и пришёл к выводу, что при учёте нелинейного взаимодействия атомов в решетке твердого тела с нарушениями (т.е. в приближении к случаю реальных решеток кристаллов) энергия должна переноситься преимущественно солитонами. Однако, Р.Е. Пайерлс [32] считал, что в реальной трёхмерной решетке возбуждениями типа солитонных можно пренебречь.

Однако, при нестационарном воздействии мощных электромагнитных или корпускулярных импульсов на конденсированные среды можно создать условия, когда теплоперенос будет преимущественно солитонным, если обычная, диффузионная теплопроводность запаздывает, как показано в работе [33].

Именно такие условия были рассмотрены и проанализированы в работе [11]. Работа Ю. Кившара и Б. Маломеда [34] посвящена анализу теоретических работ, относящихся к обсуждаемой проблеме. Из наших обзоров по результатам экспериментальных работ, в которых исследовались солитоны, мы упоминаем только четыре [9, 11-13].

В этих работах МУУВ была зафиксирована очень надежно в нескольких тысячах опытов. Все полученные результаты неплохо согласуются, несмотря на то, что измерения различными методами проводились в лабораториях России, Франции и Японии.

Наблюдение солитоноподобных возбуждений с дискретными скоростями было начато в ФИАНе [1]. МУУВ возбуждались лазерным импульсом. В дальнейшем, в рамках сотрудничества с рядом научных учреждений были использованы и другие способы возбуждения – удар острём, медленное растяжение и др.

В частности, интересное исследование было выполнено в МЭИ (А.В. Варава, А.В. Дедов, А.Т. Комов), где производилось облучение электронным пучком медной трубы с охлаждением её потоком воды. Было обнаружено [23] возбуждение нескольких (трёх) компонентов МУУВ с очень малыми

скоростями (регистрация велась термомпарами). А именно, самый быстрый имел скорость $\sim 0,04$ см/сек, скорости последующих каждый раз падали \sim вдвое. Волна проходила 3,0 мм толщю стенки трубы за 17 сек.

Академик А.М. Балдин, руководитель Лаборатории ускорителей в Дубне, ознакомившись с полученными результатами, попросил подготовить обзор работ по солитонам. Как он пояснил, проблема экспериментального исследования солитонов (или инстантонов, как их называют в ядерной физике) – чрезвычайно важна, поскольку такие исследования ведутся у них только теоретиками. Результаты данной работы были опубликованы в созданном им журнале [24].

На одной из конференций сотрудниками ИМЕТ РАН была представлена 7-ми часовая запись акустической эмиссии куска нагретой до 1000° С никелевой проволоки. Она представляла систему из ~ 40 импульсов, над которыми возвышались (с превышением в 3-4 раза) 5 мощных импульсов. Они повторялись через интервалы $\sim (82-85)$ минут. Анализ показал, что это результат выходов на поверхность образца уединённой волны - компонента МУУВ, зародившегося при начальном нагреве поверхности проволоки в вакуумной печи. Эти волны МУУВ – цилиндрические, движутся по радиусу стержня от поверхности к центру, далее выходят на противоположный участок поверхности. Скорость регистрировавшегося компонента МУУВ составляла $4,0 \times 10^{-5}$ см/сек (ещё в 1000 раз медленнее, чем в вышеупомянутой работе [23]). Интерпретация полученных результатов представлена в [35].

В серии последних работ [5, 8, 36-44] приводятся результаты совместных исследований ряда научных учреждений. Во всех наших работах по исследованию МУУВ изложенные выше факты многократно подтверждались.

Следует отметить, что академик РАН, лауреат Нобелевской премии В.Л. Гинзбург отводил одну из важных позиций - исследованию солитонов [45], что является залогом перспективы этих работ.

II. ГЕНЕРАЦИЯ МУУВ ПРИ ПЛОСКОМ УДАРЕ И СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

Рассмотрим результаты работ К.Б. Абрамовой и др. по исследованию механолюминесценции (МЛ) металлов после начала механического воздействия (плоский удар бойка [14, 15] и медленное статическое нагружение [16]).

Анализ ряда осциллограмм, приведенных в [14, 15], показывает, что плоский удар бойка, приводящий к значительной деформации, возбуждает в

образце сложный волновой процесс. Сравнительно медленные солитоноподобные возбуждения многократно проходят в этом процессе через массивные металлические образцы меди (для анализа очень важно, что образцы имели разную толщину: 2,7 см и 5,0 см).

На осциллограммах выделяются проявления двух встречных пятых ($i = 5$) компонентов МУУВ U_5 [17], которые проходят по образцу один с 5-ю и другой – с 6-ю отражениями от его поверхностей, вызывая МЛ при выходе на тыльную поверхность образца.

В работе [16], к сожалению, не приведены отдельно записи временных изменений свечения материала, подвергшегося тому или иному постоянному нагружению. Однако, в ней для опыта с многократно изменявшимся механическим нагружением массивного образца меди приведены данные о временной зависимости интенсивности свечения, усреднённые по 10-ти секундным интервалам. Очень важно, что нагружение образца в этом опыте достигло предельной величины, после чего он разрушился.

Характер изменения со временем интенсивности свечения на отдельных участках при разных нагрузках говорит о возможном проявлении в этом эксперименте очень медленных солитоноподобных возмущений. Речь идёт о двух двадцатых компонентах МУУВ со скоростью $U_{20} \sim 0,33$ см/сек. Важно, что в работе [16] наблюдается заметное увеличение скорости этих компонентов при возрастании нагрузки.

По-видимому, можно говорить о некоторых аналогиях с уже известными результатами исследований. А именно, недавно в массивном медном образце с помощью термпар были зарегистрированы пары компонентов МУУВ с номерами $i = 24, 25, 26$ [24] после медленного включения нагрева с помощью квазистационарного электронного пучка достаточно большой мощности (~ 5 кВт/см²). В этих опытах скорость пары двадцать четвёртых компонентов составляла $U_{24} \cong 0,018$ см/сек.

Другой аналогией является наблюдение увеличения скорости компонентов МУУВ в полупроводниковых материалах при увеличении энергии импульса в процессе исследования лазерного разрушения этих материалов [18].

При рассмотрении работ [14-16] мы ставили только одну цель. Нам хотелось отыскать свидетельства подтверждения наших представлений об одном достаточно универсальном явлении, возникающем при импульсных воздействиях на твёрдое тело. Речь идёт о генерации одним возбуждающим импульсом большого числа (более 30) солитоноподобных возбуждений или

компонентов трёхмерной волны, которую временно, до выяснения физического механизма, мы назвали сначала - по первым способам её наблюдения Волной Изменения (оптического) Отражения и (электрической) Проводимости, ВИОП (см. [9, 10]). В дальнейшем название этих волн было изменено на Медленные Уединённые Упругие Волны (МУУВ). Эти уединённые волны (далее мы будем называть их солитонами) распространяются в различных твёрдых телах. Их скорости для следующих друг за другом компонентов различаются, примерно, в 2 раза, а для первых и последних компонентов - на 9 порядков (начиная от продольной скорости звука v_1) [9], согласно выражению:

$$U_i = v_1 / (2)^i. \quad (1)$$

До этой работы компоненты МУУВ наблюдались только при возбуждении лазерным или электронным пучками. Мы хотим показать, что в рассматриваемых работах [14-16] компоненты МУУВ возбуждались и в результате воздействия на металл механических нагрузок. Время изменения нагрузки менялось в этих двух типах экспериментов, примерно, на 4 порядка (от $\sim 10^{-4}$ сек до ~ 5 сек). Соответственно, и скорости возбуждений, о которых пойдёт речь, могли меняться от 5×10^3 см/сек до 3×10^{-1} см/сек, то есть тоже на 4 порядка.

Наиболее важными из обсуждаемых результатов для нас являются данные, привязанные к времени от начала опыта, которые свидетельствуют, что на поверхности металла в результате воздействия возникают вспышки. Наше утверждение сводится к тому, что моменты времени появления вспышек не являются хаотическими, а свидетельствуют о протекании в образце сложного волнового процесса. Форма вспышек также может нести информацию о свойствах отдельных составляющих этого волнового процесса.

Мы предлагаем некоторую систему, поясняющую, что за волновой процесс имеет место в тех или иных условиях. Так как механизм самой МУУВ ещё не установлен, то и объяснений полной картины явлений, обнаруженных в работах [14, 15], от нашего обсуждения ждать нельзя. Скорее, мы надеемся, кроме сказанного выше, найти подтверждение уже установленных свойств МУУВ, а также узнать из этих исследований о новых свойствах МУУВ, чтобы в дальнейшем такие сведения помогли создать адекватный физический механизм исследуемого нами явления солитоноподобных возбуждений в твёрдых телах.

Следует добавить, что большую помощь в прояснении наблюдаемых процессов МЛ дали нам работы [17, 23], относящиеся к наблюдению тех же

процессов МЛ в условиях воздействия на металлы лазерного импульса. В дальнейшем мы хотели бы рассмотреть и результаты этих работ под нашим углом зрения, который был пояснён выше.

На основании накопленного опыта наших исследований МУУВ, можно утверждать, что в обсуждаемых здесь работах [14-16] подтверждается ряд свойств указанного явления, Мы перечислим здесь только некоторые из них, чтобы в дальнейшем последовательно пояснить, как именно эти свойства, по нашему мнению, проявляются в рассматриваемых работах. (Более расширенный список свойств МУУВ приведён в [46]).

Свойства, присущие солитоноподобным возбуждениям - компонентам МУУВ, как это следует из результатов опубликованных работ [9, 10].

1. Солитоны имеют приблизительно постоянную скорость.
2. Они способны отражаться от стенок образца почти без потерь скорости и с малыми изменениями в высоте импульса.
3. Солитоны зарождаются попарно на противоположных поверхностях (как на лицевой, облучаемой, так и на тыльной сторонах) образца.
4. Генерация солитонов имеет место при импульсном возбуждении достаточной плотности мощности и происходит в начальной части импульса возбуждения. Для случая лазерного пучка имеются данные о пороге возбуждения.
5. Имеет место «квантование» скоростей во всей последовательности пар (см. п.3) солитонов, следующих друг за другом (то есть скорости компонентов последующей пары меньше \sim в 2 раза скоростей предыдущей пары).
6. Отмечается определённая связь параметров солитонов (скорости и др.) с динамикой разрушения образца материала.

Новые свойства МУУВ, следующие из анализа результатов работ [14-16]:

1. Генерация солитонов имеет место при включении воздействия не только лазерного или электронного пучков, но и механической нагрузки достаточной плотности мощности. При возбуждении лазерным пучком пороговое значение составляло ~ 10 кВт/см². В опытах с электронным пучком плотность мощности была такого же порядка или выше. Для механической нагрузки первые наблюдения [14, 15] говорят об удельной мощности воздействия, по нашим оценкам, порядка ~ 100 кВт/см² при ударе.

2. Уточнение свойства 3, по-видимому, должно следовать из нашей интерпретации результатов работы [16]. А именно, оказывается, что солитон (некий конкретный компонент волны) при медленной статической нагрузке образца зарождается где-то в центральной его области и затем распространяется во все стороны, обнаруживаясь после отражений в виде двух волн, последовательно приходящих к какой-то одной точке наблюдения.

Новые свойства МУУВ, которые ещё только могут быть получены, если удастся ответить на следующие вопросы из работ [14-16]:

1. Является ли случайная связь МУУВ и МЛ, или их появление обусловлено друг другом (например, была разработана для объяснения медленных МУУВ модель рекомбинации дислокаций Емельянова).

2. Как свойства отдельного компонента МУУВ проявляются в природе свечения и форме отдельного пика.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТ [14, 15].

Это обсуждение мы проведём, следуя приведенному выше перечислению некоторых свойств, присущих солитоноподобным возмущениям - компонентам МУУВ.

Свойства, перечисленные в пунктах (1), (2), (3) – приблизительное постоянство скорости, способность отражаться от поверхности и зарождение солитонов на противоположных поверхностях образца, трудно обсуждать по отдельности, поэтому мы обсудим их вместе.

Проявления свойств (1-3) в обсуждаемых работах видны из 8-ми оригиналов осциллограмм, приведенных в [14] на рис.3 а), б), в), г) и в [15] на рис. 3 а), б), в), а также на рис. 5, если согласиться с нашей интерпретацией этих осциллограмм.

Важно подчеркнуть, что, запуск осциллографа во всех опытах производился одинаково, одним и тем же способом (боёк пролетал перед ударом сквозь катушку индуктивности, и сигнал наводки использовался для запуска).

Что касается качества основных для нашего обсуждения осциллограмм, приведенных на рис. 1 а), б) (рис. 3 а), б) в работе [15]), то две первые в области начала развёртки слишком «пересвечены» (интенсивность луча осциллографа была выше нормальной, так как иначе луча не было бы видно при быстрых изменениях сигнала. Поэтому трудно установить точно, где начало луча. На рис. 2 а), соответствующем рис. 3 в) из [15], видно хорошее совмещение начала развёртки с первой вертикалью сетки в результате уменьшенной интенсивности луча. Однако, при проведении этих опытов перенастройка осциллографа вполне могла вестись каждый раз.

Авторами [14, 15] было установлено, что деформация тыльной стороны образца с разрывом поверхности или без разрыва успевает произойти за времена около 0,1 мсек. Это контролировалось по серии из 4-х последовательных рентгеновских теневых снимков. Важно было бы для интерпретации результатов знать и время, в течение которого происходила деформация передней стороны образца, воспринимавшей удар бойка толщиной 5 мм. (Он продавливал в ней круглого сечения коническую воронку, глубиной около 7 мм, диаметр которой уменьшается при приближении к плоскому дну воронки (рис. 2 [14, 15]). В работах [14, 15] данных об этом отрезке времени не получено, и, кроме того, по мнению авторов нельзя ручаться за то, что начало запуска рентгеновских камер точно синхронизовано с началом запуска развёртки осциллографа. Однако, можно предположить, что деформация передней стороны образца, обуславливавшая откол, завершилась за то же время $\sim 0,1$ мсек, после которого оставшаяся толщина образца $27-7=20$ мм (без откола) или $27-7-2 = 18$ мм (при наличии откола) уже не менялась до конца опыта. (Другой образец, толщиной 50 мм, не испытывал откола, чего авторы специально добились удвоением толщины, по сравнению с основным). Вид образца толщиной 50 мм после опыта не приведен на рисунках в [14, 15]. Однако, можно думать, что его толщина после деформации бойком, предположительно аналогичной процессу в менее толстом образце (и поэтому закончившейся также через 0,1 мсек), составляла $50-7=43$ мм.)

На рис. 1 а), б), с) мы приводим в изменённом порядке осциллограммы с рис. 3 а), б) [15] с добавлением соответствующей (x-t)-диаграммы, позволяющей представить волновой процесс в нашей интерпретации.

Наиболее отчётливо он проявляется на осциллограмме с максимальными отклонениями лучей (у нас это рис. 1 б), точки А, В – начальные точки двух пиков). Отметим сразу, что осциллограмма рис. 1 а) при внимательном изучении оказывается хорошо соответствующей осциллограмме рис. 1 б), только указанные два пика на ней имеют \sim в 10-15 раз меньшую величину. Однако, на протекание волнового процесса отмеченное отличие не повлияло.

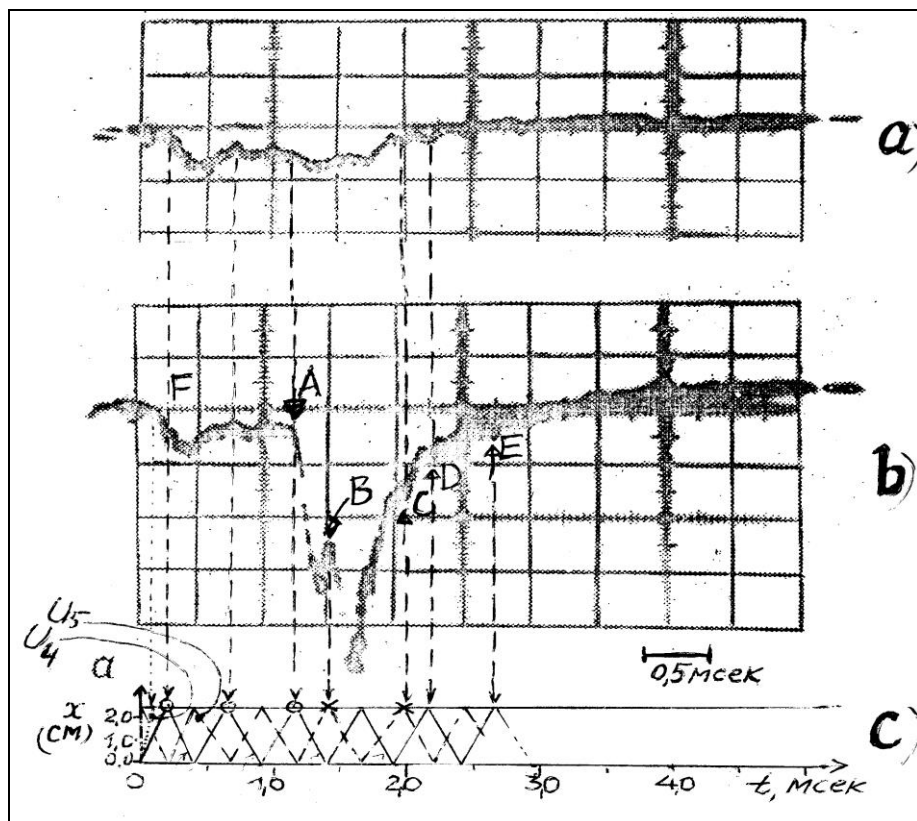


Рис.1. а),б),с). Здесь а), б) - основные для обсуждения в настоящей работе оригиналы осциллограмм, приведенных в [15] на рис. 3 а), б). Кроме того, на рис. с) представлена в нашей интерпретации (x-t) - диаграмма соответствующих волновых процессов.

На рис. 1 б) хорошо виден приход к тыльной стороне образца одиночной волны, которая резко увеличила свечение в точке А, соответствующей моменту времени $\sim 1,25$ мсек. Вслед за ней через 0,25 мсек также отчётливо виден приход второй волны, которая в точке В также резко увеличила свечение образца, которое к тому времени уже начало быстро спадать. Обе эти волны вызывают увеличение свечения, примерно, на одинаковую величину. Остальные пики свечения на этой осциллограмме либо очень малой интенсивности (как С, D и E), либо широкие и с малым количеством деталей (как F). Как уже отмечалось, все эти второстепенные пики на обоих осциллограммах, представленных на рис. 1 а) и 1 б), практически, совпадают. А именно, перед этими пиками А и В, начиная, примерно, с 0,25 мсек, после явного максимума при $\sim 0,4$ мсек тянется область свечения, примерно, в 7 раз меньшего, чем для пиков А и В с началами при 1,25 и 1,50 мсек. Она занята несколькими приходами волн. Об

этом можно судить потому, что нигде уровень не опускается до нулевой линии.

На основании указанных данных удалось построить соответствующую этому опыту (x-t)-диаграмму, представленную на рис. 1 с). Наличие в [15] осциллограммы, представленной на следующем рис. 2 а) с её (x-t)- диаграммой на рис. 2 б), а также результаты других работ, в особенности [23], и собственный опыт исследования МУУВ убеждает нас в единственности этого представления для соответствующего волнового процесса.

Суть нашей интерпретации состоит в следующем. Указанные два пика, начинающиеся в точках А и В, есть проявление двух компонентов МУУВ, движущихся по нормали к поверхностям с приблизительно одинаковой скоростью через образец навстречу друг другу. Они отражаются без потери скорости от поверхностей образца и появляются “перед ФЭУ” на тыльной стороне, каждый раз с запозданием один относительно другого; в частности, в моменты, соответствующие точкам развёртки А и В.

Эти два компонента МУУВ возбуждаются в начальный момент времени на передней и тыльной сторонах образца. Они успевают пройти через образец несколько раз в течение 2,5 мсек. Относительное запаздывание пиков связано с тем, что принадлежащие этим пикам волны различаются на один проход через образец. Отсюда оцениваем скорость, принимаемую пока одинаковой для этих двух компонентов: $U_i = 20\text{мм}/250\text{ мксек} = 0,08\text{ мм/мксек}$. Сравнивая её по соотношению (1) с продольной скоростью звука для меди (3,66 мм/мксек), можно увидеть, что найденное значение скорости на 30 % меньше рассчитываемого значения скорости пятого компонента МУУВ, $U_5^{\text{расч}}$. Зная эту скорость – найдём число проходов через образец толщиной 20 мм для каждого компонента волны до моментов времени, соответствующих точкам А и В.

Для А: $(0,08)\text{ мм/мксек} \times 1250\text{ мксек} = 100\text{ мм}$, что составляет 5 проходов для волны, родившейся на лицевой стороне образца.

Для В: $(0,08)\text{ мм/мксек} \times 1500\text{ мксек} = 120\text{ мм}$, что составляет 6 проходов для волны, родившейся на тыльной стороне образца.

Результаты всех этих расчётов представлены в виде (x-t)-диаграммы на рис. 1 с).

Как уже отмечалось, на рис. 1 а), б) видны только два разрешённых во времени пика, А и В. Наша интерпретация, однако, подтверждается осциллограммой, приведенной на рис. 2 а), б) для образца, который толще в два раза, и потому не испытывал откола. Интенсивность свечения тыльной

поверхности этого образца при подходе к ней солитонов и отражении от неё – была намного меньше. Как указывают авторы [14, 15], тыльная сторона образца 50 мм не деформировалась и по этой причине «фотоумножитель излучения не фиксировал» (хотя чувствительность детектирующей системы была увеличена в 5 раз). И действительно, на осциллограмме рис. 3 в) из работы [14], приведённой для обоснования этого утверждения, не видно абсолютно ничего. Однако, на осциллограмме рис. 3 в) в [15], приведённой для обоснования такого же утверждения об отсутствии излучения, видны следы вспышек свечения, соответствующих приходу парных волн в виде небольших резких выбросов в нужную сторону.

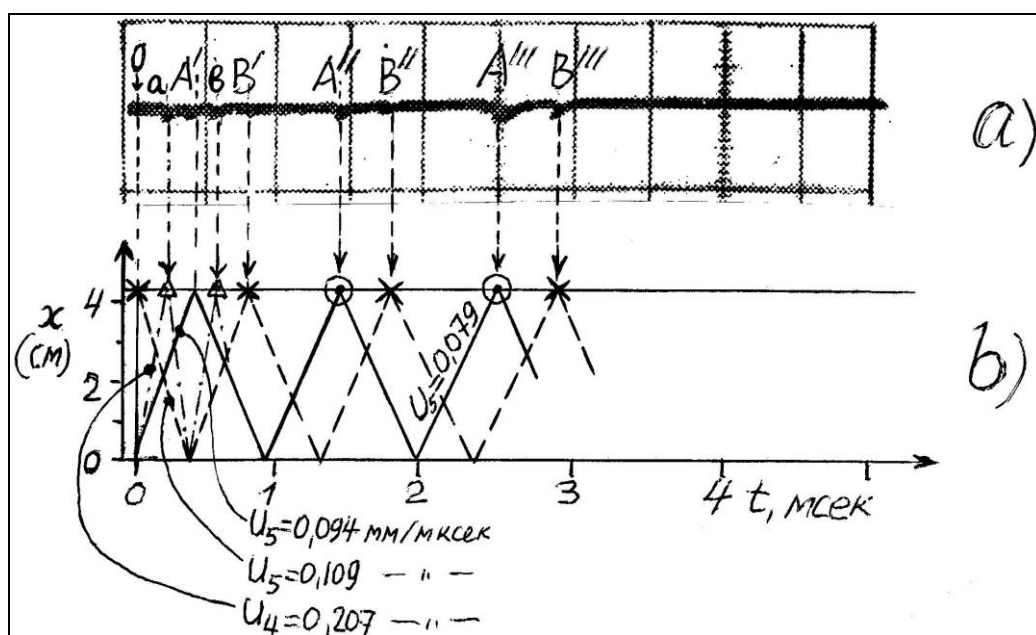


Рис.2. а), б). Здесь а) - оригинал осциллограммы из [15], рис. 3 в), приведённой там для обоснования утверждения об отсутствии излучения МЛ в соответствующем опыте. Однако, на этой записи отчётливо видны следы вспышек свечения, соответствующих приходу парных волн в виде небольших резких выбросов, повторимся, в нужную сторону. Кроме того, на рис. 2 с) представлена в нашей интерпретации (x-t) – диаграмма соответствующих волновых процессов.

Это помогло нам избавиться от необходимости анализировать «лес» пиков на осциллограмме рис. 1 а), б) из [15]. Фактически на рис. 2 а) видны только две повторяющиеся («главные») пары пиков и несколько пиков в начале развёртки, из которых два должны принадлежать к «главным» парам, согласно нашей интерпретации. Другие два, обозначенные буквами а, б могут быть отнесены к предыдущему, вдвое более быстрому компоненту МУУВ, то

есть U_4 , траектория которого отмечена штрихпунктирной линией на диаграмме рис. 2 б). Основанием для такой расшифровки является тот факт, что аналогичный компонент МУУВ проявился, как единственный пик в самом начале развёртки на рис. 3 г работы [14]

Можно предположить, что рис. 2 а), б) сыграл роль «лупы времени». Наиболее интенсивная пара «главных» пиков А и В, которая выделяется на рис. 1 б), здесь также выделяется (пики А''' и В'''). Однако, она расположена теперь на развёртке вдвое дальше (2,500 мсек и 2,875 мсек, соответственно), поскольку толщина образца примерно вдвое больше. (С учётом воронки от ударника для всех образцов она составляла, 20 или 18 мм, - с учётом отрыва 2 мм слоя, - в опытах на рис. 1 а), б), с) и ~43 мм в опытах на рис. 2 а), б)).

На рис. 2 а) чётко видны моменты прихода парных компонентов МУУВ, обусловивших пики свечения А''' и В''', к тыльной стороне образца в предыдущий, второй, раз (А'' и В'') и нечётко – в первый (А' и В'). Это показано на соответствующей (x-t) – диаграмме, представленной на рис. 2 б). На рис. 1 а), б) начальная область осциллограммы забита перенакладывающимися пиками, а здесь, на рис. 2 а), эти слабые свечения не проявились. Аналогично проделанному для рис. 1 а), б), с), оценим скорость, принимаемую одинаковой для двух наблюдаемых компонентов МУУВ, по рис. 2 б): имеем отношение (расстояние А''' и В''') : $U_1 = 43 \text{ мм}/375 \text{ мксек} = 0,115 \text{ мм/мксек}$. Сравнивая её по соотношению (1) с продольной скоростью звука для меди (3,67 мм/мксек), можно увидеть, что найденное значение скорости точно совпадает (0,115 мм/мксек) с рассчитываемым по соотношению (1) значением скорости пятого компонента МУУВ, $U_5^{\text{расч}}$.

Зная эту скорость, – найдём число проходов через образец толщиной 43 мм для каждого компонента до точек развёртки А''' и В'''.

Для А''': имеем (0,115) мм/мксек x 2500 мксек = 287,5 мм, что составляет ~6,7 прохода для волны. Для В''': имеем (0,115) мм/мксек x 2875 мксек = 330,6 мм, что составляет ~7,7 прохода для волны. Однако, такие оценки плохо согласуются с осциллограммой рис. 2 а), судя по которой за время опыта проходов для обоих компонентов должно быть меньше рис. 1 а), в), с) - 5 и 6 проходов, для А и В, соответственно).

Такое расхождение между высокой точностью оценки скорости и картиной волнового процесса связана с небольшим уменьшением скорости компонентов МУУВ в результате нескольких прохождений через образец и отражений от поверхностей.

Все это было учтено при построении (x-t)-диаграммы на рис. 2 б), которая оптимальным образом согласуется как с положениями пиков на

осциллограмме, так и с логическим предположением о замедлении скорости компонентов МУУВ.

Измерения по разнице между пиками A''' и A'' , B''' и B'' дают скорость на этом участке осциллограммы, равную 0,079 мм/мксек, что совпадает с результатом измерений на аналогичном участке осциллограммы рис. 1 а), в), с).

По отношению к этому значению скорости можно считать, что начальная скорость для компонента МУУВ, начинающегося на лицевой стороне образца, $U_5^{\text{эксп}}$, составляла 0.094 мм/мксек. После первого отражения скорость уменьшилась на 4%, за 3 последующих - ещё на 12%, таким образом, теряя по 4% на каждом отражении.

Для компонента МУУВ, начинающегося на тыльной стороне, $U_5^{\text{эксп}}$ составляла 0.109 мм/мксек. После первых двух отражений она упала на 17%, за 3 последующих - ещё на 12%, таким образом, теряя, в среднем, по ~5,5% на каждом отражении. Средняя величина начальной скорости по этим двум оценкам составляет 0,101 мм/мксек, что ниже всего лишь на 12% величины $U_5^{\text{расч}}$.

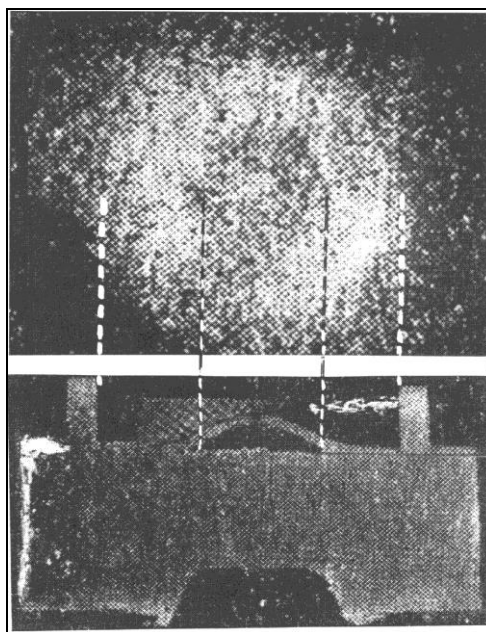


Рис.3. а), б). Предполагаемое соответствие двух фотографий из работы [15], относящихся: (а) к размеру и конфигурации снятой ЭОП'ом светящейся области тыльной стороны образца, испытывающего удар бойка, и (б) к размеру и конфигурации самой этой области Si-образца (диаметром 70 мм и толщиной 25 мм).

Как видно из рис. 2 в) парные пики 2,5 и 2,8 мсек – наиболее интенсивные, по сравнению с предыдущими. Важно отметить, что на них, волновой процесс заканчивается, так как на оставшемся её участке в 2 мсек пиков не обнаружено. Возможным объяснением является отмеченное выше уменьшение скорости связанное с отражением волны.

Из рис. 3 а), 3 б) в работе [14], характерная форма пиков резкий подъём и более медленный спад), при этом наиболее интенсивным является первый пик. Анализ $(x-t)$ – диаграмм для этих записей показывает, что они достаточно хорошо согласуются с $(x-t)$ – диаграммой, представленной на рис. 1 с).

Рассмотрим влияние формы медного бойка в виде круглого плоского бруска или стакана на результаты опытов в части различной интенсивности вспышек МЛ.

В работах [14, 15] не было чёткой привязки начала удара к началу развёртки осциллографа и не отслеживался процесс деформации передней поверхности во время удара. Допустим, что в начале и в конце процесса удара деформация образца сильно различалась для двух использовавшихся форм бойка. Солитоны, как показывает ряд исследований, рождаются передним фронтом соответствующего возбуждающего импульса. Они успевают пересечь образец по несколько раз в обе стороны до того момента как появлялись пики А и В, отстоящие на 1,5 мсек и 1,8 мсек от завершения процесса деформации. За солитонами можно оставить роль сборника дислокаций на своём пути к поверхности, где последние приводят к вспышке свечения.

Можно допустить, что в период времени, когда солитон совершал первый проход в условиях работы [14], в образце существовала самая высокая концентрация дислокаций, и как гипотезу о быстром (примерно, в 1/16 скорости звука) распространении дислокаций по образцу ввиду очень высокой напряжённости деформации в случае бойка в виде сплошного тела.

Можно предположить, что в случае бойка в виде стакана деформации были меньше и скорость распространения дислокаций по образцу (примерно, в 1/70 скорости звука), была настолько ниже, что они подошли к области вблизи тыльной поверхности на 1,5 мсек позже,

Полученные опытные данные [14, 15] позволяют говорить о независимом, одновременном сосуществовании дислокаций и солитонов.

Следует учитывать, что знак вариации параметров среды (T , ρ) в компонентах волны может быть как положительным (импульс сжатия), так и отрицательным (импульс разрежения). Однако, свечение МЛ либо есть, либо

его нет (знак положительный или нуль). В случае меди известно [24], что в волне вариация температуры положительна и мы предположили, что такая волна подхватывает дислокации. Образование солитонов имеет место при импульсном возбуждении достаточной плотности мощности и происходит в начальной части импульса возбуждения.

При проведении опытов с ударом бойка генерация солитонов происходит в начальной части импульса возбуждения. Сначала (за время около 0,1 мсек) происходит достаточно быстрый удар, деформация образца, и только потом развиваются процессы, приводящие к вспышкам свечения на тыльной поверхности.

К обсуждению свойства (5). Имеет место «квантование» скорости пар (состоящих из встречных солитонов), которые следуют друг за другом (то есть скорость последующей пары меньше в ~ 2 раза скорости предыдущей пары). При этом главным является наличие целой последовательности солитонов (из пар).

На рис. 3 г) [14] первый пик, соответствующий второму выстрелу по образцу, когда тыльная поверхность уже имеет участки свежесформированной поверхности металла, представляет определённый интерес. По своему положению он находится очень близко к началу развёртки, а именно, вдвое ближе, чем первый приход к тыльной поверхности пятого компонента МУУВ. Поэтому можно утверждать, что он соответствует однократному появлению у тыльной поверхности четвёртого компонента МУУВ.

В работе [14] не контролировался во времени ход деформации передней поверхности образца. Поэтому трудно говорить с определённостью, в какой именно (начальной или другой) области импульса возбуждения происходила генерация солитонов.

Однако, можно провести оценку номера компонентов МУУВ, который будет наиболее эффективно возбуждаться в последовательности генерируемых солитонов.

За $\sim 0,1$ мсек возникает откол, значит, за то же время боёк входит в образец до полной остановки на глубину 7-10 мм.

Наиболее эффективно (первым) из последовательности солитонов будет возбуждаться тот, который обладает скоростью $10 \text{ мм} / 100 \text{ мксек} = \sim 0,1 \text{ мм/мксек}$, то есть для меди - пятый (согласно выражению (1)) компонент МУУВ. Это и наблюдается на рис. 1, 2 работы [14].

К обсуждению свойства (6). Свечение, связанное с приходами компонентов МУУВ, выглядит как неразрешенная структура из многих пиков на рис.3 б) [15] в том случае, если разрыва поверхности нет. Если же (как на

рис. 3 а)) разрыв поверхности происходит и толщина образца уменьшается (примерно на 2 мм, как можно судить по рис.2), то в соответствующий момент времени (1.25 мсек на рис. 3 а)) интенсивность свечения возрастает более, чем на порядок и становятся различимыми два следующих друг за другом пика свечения.

Надо отметить, что вопрос о связи разрушения медного образца с его свечением в работе [15] остался невыясненным, судя по приведённым рисункам и надписям к ним. На рис. 3 а) и 3 б) приведены две очень похожие осциллограммы с интенсивно светящимися пиками в районе интервала (1-2) мсек. В подписи к рис. 3 а), 3 б) указано, что осциллограммы получены при разрушении Cu- образца и, кроме того, в опыте, соответствующем рис. 3 а), имел место разрыв тыльной стороны поверхности. В то же время рис. 3 б) представляет осциллограмму излучения Cu- образца той же толщины, в тех же условиях вакуума, при сильной деформации без видимых разрывов. На рис. 3 б), специально, в отличие от предыдущих условий, деформации без видимого разрыва соответствует осциллограмма, не имеющая увеличения интенсивности свечения в указанном районе между 1,25 и 2,5 мсек. Т.к. пластическая деформация и все разрывы, как показали рентгеновские теньевые фотографии в тех же опытах, заканчиваются за времена около 0,15 мсек, то увеличение интенсивности свечения в районе после 1,25 мсек не следует связывать с разрушением материала. Вероятно, это свечение происходит из оболочки или основной части образца или связано с трещинами и отверстиями, пропускающими свет от основной свежеобразованной поверхности образца.

На рис. 2 а) представлены результаты для медного образца с деформацией без видимых разрывов. На рис. 3 б) приведена фотография сечения полупузыря с толщиной оболочки около 2 мм, образовавшей свод высотой около 5 мм и диаметром у основания около 15 мм – размер диаметра бойка - над оставшейся плоской частью образца (результат тыльного откола).

Следует отметить, что на рис. 3 а),б) представлены фотографии свечения тыльной стороны образца, который испытал откол, и разреза образца испытывавшего воздействие бойка.

Таким образом генерация солитонов имеет место при воздействии не только лазерного или электронного пучков, но и механической нагрузки достаточной плотности мощности.

Для сравнения плотности мощности воздействия лазерного и электронного пучков (~ 10 кВт/см²) с механической нагрузкой были

использованы данные [47]. Для однообразия перейдем к «мощности воздействия бойка», поделив работу на время её выполнения.

Для случая: холоднокатанной электролитической меди, толщина ударника 2,9-3,5 мм, скорость 0.12-0.13 км/сек, толщина пластины 6,5 мм, диссипировавшая в пластине энергия составляет величину $E_d = (1,1\text{--}1,2)10^5$ Дж/м² = $\sim 1 \cdot 10^1$ Дж/см².

В работе [14] толщина ударника 5 мм (то есть, примерно, вдвое больше), скорость примерно та же, толщина пластины в 4-8 раз больше, чем в рассмотренном в [47] примере из работы [48]. Приведенное там значение $E_d \sim 1 \cdot 10^1$ Дж/см² можно принять за нижнюю границу плотности диссипировавшей энергии в рассматриваемом случае работы [14]. Переходя к «мощности воздействия бойка», поделим работу на время её выполнения. Отсюда получается, что при механическом воздействии в импульсе длительностью ~ 100 мксек, плотность мощности в работе [14] составляла не менее $\sim 10^2$ кВт/см².

Эта величина хорошо согласуется с найденным [16, 24] пороговым значением плотности мощности воздействия лазерного и электронного пучков (~ 10 кВт/см²), которое необходимо для генерации солитоноподобных возбудений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ [16].

В работе [16] приведены результаты измерений фотоумножителем (ФЭУ) в режиме счёта фотонов излучения образца меди размером 150×100×6 мм³, на который подавалась растягивающая нагрузка, приведшая к его разрыву. ФЭУ регистрировал сфокусированное излучение видимого диапазона из прямоугольного углубления шириной 1 мм и глубиной 5 мм в центре образца. Нагружение (от 0,5 до 8 тонн) производилось ступенями (рис. 4 а) за время ~ 5 сек.

На рис. 4 б) приведены результаты регистрации свечения образца. Количество фотонов усреднялось за интервал 10 сек, а на рис. 4 с) – диаграмма волнового процесса.

Из рис. 4 в) видно, что на связанные с изменением нагрузки резкие изменения интенсивности свечения (уровня счёта фотонов), которые в области записи 400-700 сек имеют плоские протяжённые участки, накладываются хорошо выраженные (включающие по 3-4 точки) минимумы (в области 400-480 сек) и максимумы (в области 500-560 сек). Вероятно они связаны с медленным движением к области, где регистрируется свечение, компонентов МУУВ (солитонов). Для наглядности на рис. 4 в) и 4 с) они обозначены как А, В, С, D, Е, F, G, H, I, J, K, L, а, b, c, d, e, f, g, что в

дальнейшем поможет при рассмотрении волнового процесса, как процесса солитонного типа.

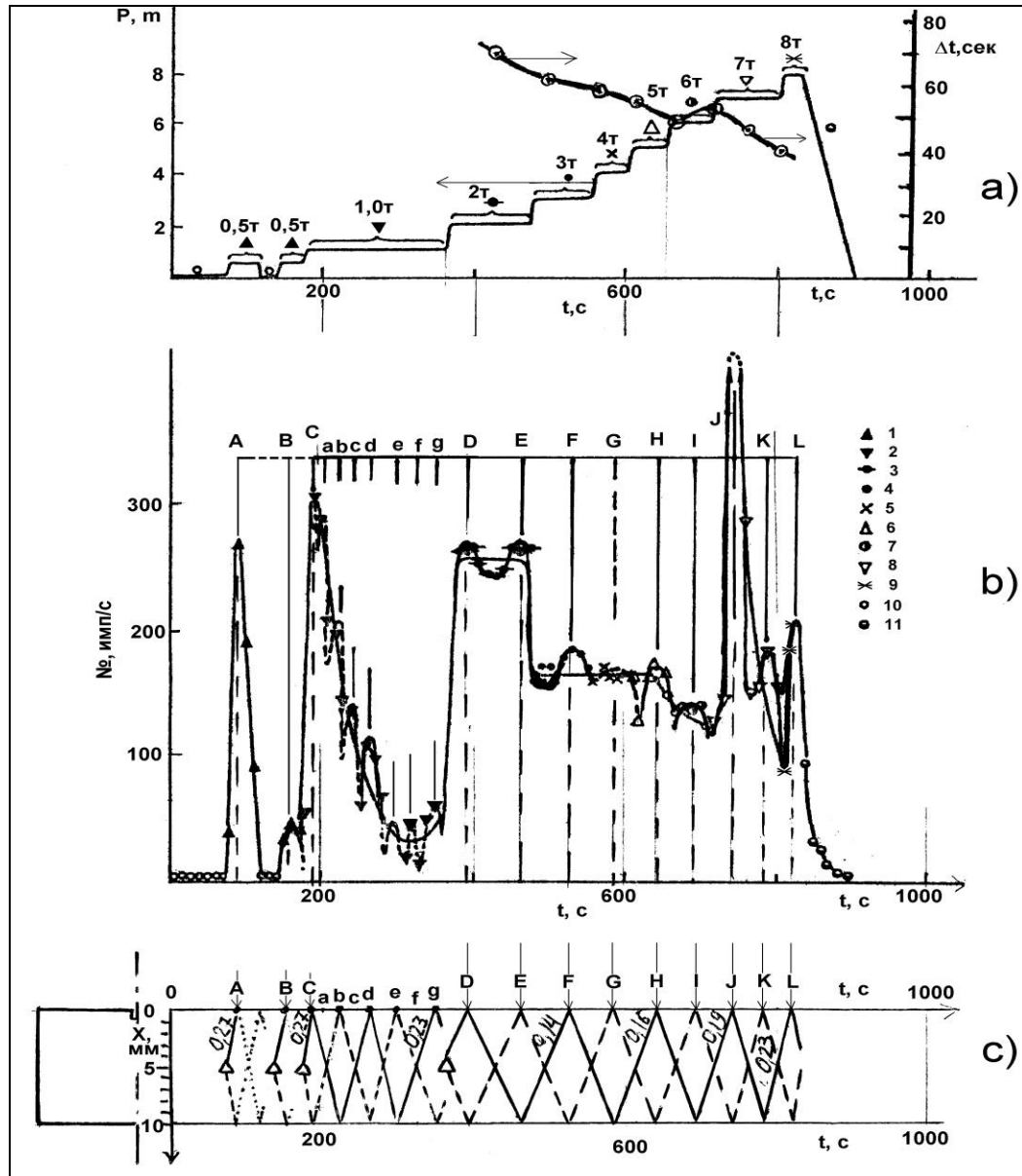


Рис.4. а), б), в). Результаты регистрации свечения медного образца при статической нагрузке и его анализ. Здесь а) - графики изменения нагрузки (из [16]) и периода пульсаций \square ; б)- результаты регистрации свечения образца (из [16]); в)- $(x-t)$ - диаграмма волнового процесса.

Результаты исследований [16] показали, что периодические выходы волн на поверхность, излучение с которой попадает на фотоумножитель, связаны с движением солитонов.

На рис. 4 с) представлена $(x-t)$ – диаграмма движения двух солитонов,двигающихся в противоположные стороны и периодически приходящих на контролируемую фотоумножителем поверхность образца.

Можно предположить, что солитон ввиду своей устойчивости обладает свойством отражения от границ образца почти без потери скорости.

На рис. 4 видно, что в области между пиками С и D наблюдается 7 мелких пиков а...g, которые выглядят как "структура" основного пика С и 5 (а именно, b,d,e,f,g), которые подтверждают движение двух солитонов с четырьмя отражениями для каждого. При этом скорости обоих солитонов плавно уменьшались с 0,27 см/сек до 0,23 см/сек, что составляет потерю в 4% в скорости на каждое отражение (что согласуется с потерями при отражениях МУУВ в других опытах).

Анализ эволюции свечения в области между пиками D и L (область предельных нагрузок) позволяет предположить о двух зародившихся встречных солитонах. Подтверждением этого может служить тот факт, что в районе пиков D и F, а также J и K наблюдаются два максимума с чётко зафиксированным минимумом между ними. Можно предположить, что наблюдаемая скорость солитонов (0,14 см/сек) в начале движения (пик D), в 2 раза меньше, чем скорость возбуждений, дающих пики А и В (0,27 см/сек).

Найденное значение скорости солитона 0,14 см/сек (скорость звука в меди- 3,66 мм/мксек) подтверждает факт генерации компонента МУУВ с номером $i = 21$. Скорость обсуждаемого компонента МУУВ отличается от расчётной скорости (1) на 20 %,

$$U_{21}^{\text{эксп}} = 0,80 U_{21}^{\text{расч}}.$$

Из рис. 4 с) видн что пик J соответствует обнаруженному в работе резкому увеличению свечения незадолго до разрушения образца. Как отмечают авторы [16], «...4. При достижении нагрузки величины, близкой к вызывающей разрыв образца, возникает вспышка, после которой образец разрушается. Этот эффект наблюдался в предшествующих работах как при больших, так и при малых скоростях нагружения...». Подобный вывод согласуется с представленной на рис. 4 с) $(x-t)$ -диаграммой. Следует отметить, что предельная нагрузка для меди [48], составляет 35-45 кг/мм².

Полученные результаты подтверждают данные [18] об увеличении (до 30 % и более) скорости компонентов МУУВ в полупроводниковых материалах, используемых для ИК-окон (ZnS, ZnSe, Ge).

Отметим, что для рассматриваемых результатов имеется полная аналогия с данными об увеличении энергии импульса в опытах по постепенному лазерному разрушению указанных материалов. В работе [18] предложено использовать наблюдавшееся ускорение компонентов МУУВ в качестве индикатора приближающегося катастрофического разрушения материала. В полной мере это предложение может относиться и к рассматриваемому в работе [16] разрушению металла при механической статической нагрузке, сопровождаемому свечением, которое, как мы предполагаем, обнаруживает ускоренное движение солитонов.

Представлены результаты исследований о скоростях 4-х компонентов МУУВ в меди. В расчетах согласно выражению (1) принято вместо «2» делить на «2,05», тогда получим:

$$U_4^{\text{эксп}} = 0,207 \text{ мм/мксек} = 1,00 U_4^{\text{расч}}$$

$$U_5^{\text{эксп}} = 0,08 \text{ мм/мксек} = 0,80 U_5^{\text{расч}}$$

$$U_{19}^{\text{эксп}} = 0,27 \text{ см/сек} = 0,62 U_{19}^{\text{расч}}$$

$$U_{20}^{\text{эксп}} = 0,14 \text{ см/сек} = 0,67 U_{20}^{\text{расч}}.$$

Импульсные воздействия, при которых солитоноподобные возбуждения (компоненты МУУВ) были зарегистрированы в твёрдых телах [9, 10]), создавались с помощью лазерного или электронного пучков. В работах [14, 15, 16] показано, что подобные возбуждения возможны при механических нагрузках на материалы [18].

III. СКОРОСТИ МУУВ – СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДВУХ НЕЗАВИСИМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Однократный возбуждающий импульс с порогом около (10-100) кВ/см² вызывает в твёрдом теле серию из более, чем $i=30$ уединённых волн - солитоноподобных возбуждений, Они распространяются по веществу с постоянной скоростью U_i . Эта величина оказывается «квантованной» - она уменьшается, примерно, вдвое для каждого последующего (i+1)-го компонента. А если брать все компоненты, то скорость последних падает на 9 порядков, начиная от скорости продольного звука v_1 .

С целью подтверждения этого фундаментального свойства МУУВ были проанализированы результаты исследования образцов из поликристаллической меди, полученные разными методами. Многие компоненты структуры уединённых волн, возбуждённые лазерным излучением в образце меди, были зарегистрированы с помощью как термопары, так и ИК-детектора. Их измеренные скорости U_i для $i = (10-17,$

29-31) были меньше продольной скорости звука v_1 в соответствии с выражением $U_i \cong v_1 / (2)^i$.

Однократный импульс (лазерного излучения, пучка частиц или механического удара) выше порогового значения около 10 кВ/см^2 производит в твёрдом теле большое количество солитоноподобных возбуждений [9, 10, 11, 46]. Указанное возбуждение меняет (на величину $\sim 10^{-4}$) – локально термодинамические и оптические параметры материала. Это возбуждение распространяется через образец со многими отражениями, сохраняя постоянную величину скорости U_i . Последняя уменьшается вдвое для каждого последующего ($i+1$)-го компонента, начиная от продольной скорости звука v_1 . По нашему мнению, это фундаментальное свойство ранее не было известно для уединённых волн.

Можно предположить, что вся серия уединённых волн состоит из $i \geq 30$ таких компонентов. Это означает, что U_i меняется более, чем на 9 порядков в соответствии с выражением (1).

Результаты измерений [20] относятся к области группы компонентов МУУВ вокруг $i \sim 30$ (скорости $\sim \text{мкм/сек}$). Эти измерения выполнялись для исследования уединённых волн специально с применением термопары в качестве простого и весьма надёжного детектора.

Полученные в [23] результаты относятся к области набора компонентов МУУВ в районе номеров (10-17-го), в которой величина скорости U_i менялась в интервале:

$$\sim \text{м/сек} > U_i > \sim \text{см/сек}.$$

В опытах с термопарой в качестве детектора принципиальная схема измерений [20, 21] представлена на рис. 5. Образцы из медной фольги разной толщины облучались с одной стороны через ИК линзу, обеспечивавшую плотность потока $\sim 10 \text{ кВ/см}^2$.

Образцы медной фольги различались специальными формами. Изменения температуры обратной стороны образца регистрировались с помощью термопары, снабженной электронной схемой усиления сигнала (рис. 5).

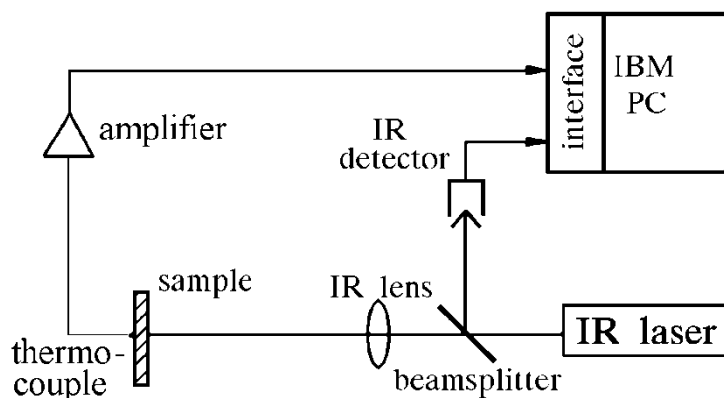


Рис.5. Схема экспериментов с термопарой в качестве детектора.

На рис. 6 б) представлены две типичные записи изменения температуры тыльной поверхности образца из Cu- фольги толщиной 30 мкм после облучения моноимпульсом CO₂ – лазера. Форма возбуждающего лазерного импульса (его длительность 0.32 мсек) представлена на рис. 6 а). Процесс движения волны был зарегистрирован на падающей температурной кривой в соответствии с результатами хорошо известных расчётов теплопередачи.

На кривой медленно падающей температуры можно видеть – четыре (или два, соответственно) максимума, которые соответствуют приходу на тыльную поверхность образца двух компонентов МУУВ.

На рис. 6 можно проследить траекторию каждого компонента, начиная с момента его возбуждения ИК-лазерным импульсом. Видно, что экстраполированные траектории попадают на переднюю поверхность образца в момент лазерного импульса. Для подобной экстраполяции использовались два предположения.

Во-первых, мы предположили (в соответствии с [22]), что локальным изменением температуры образца после прихода в точку наблюдения МУУВ – является её повышение. Во-вторых, мы предположили постоянство значения скорости U_i для обоих компонентов МУУВ, движущихся между тыльной (с термопарой) и передней поверхностями фольги. Измеренные значения этих скоростей равны 7.03 and 3.62 мкм/сек, соответственно. Они несколько больше, чем рассчитанные по выражению (1) величины и отличаются от них всего на 3% и 6%, что можно считать достаточно хорошим совпадением эксперимента с расчётом.

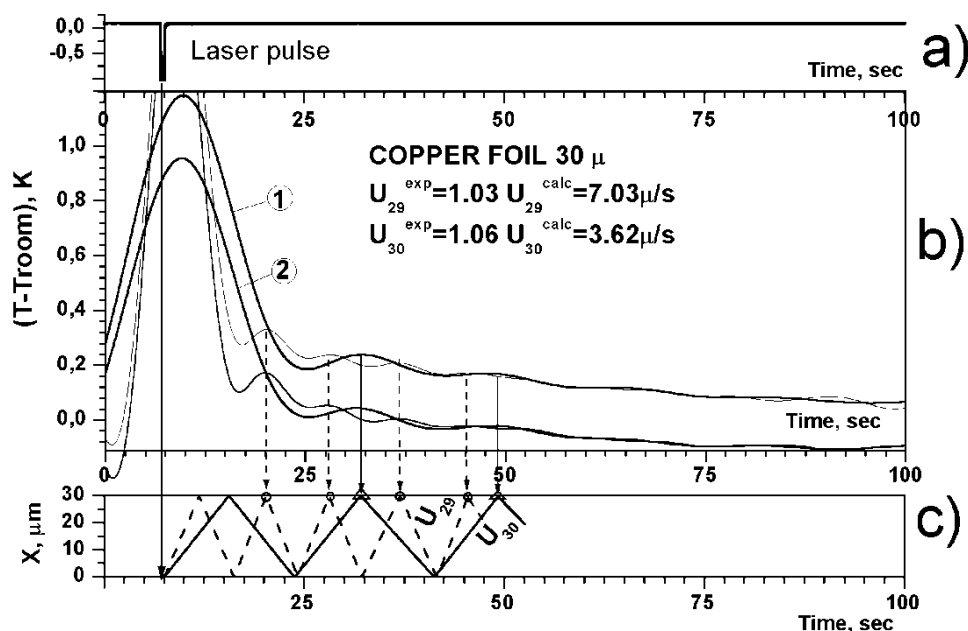


Рис.6. а) - форма лазерного импульса; б) - две типичных записи вариаций температуры, измеренных с помощью термопары на тыльной стороне образца Си-фольги; в) - соответствующая (x-t)- диаграмма процесса распространения МУУВ.

В работе [23] представлены результаты исследования теплопроводности меди с помощью лазерной вспышки, которые относятся к локальным вариациям температуры в центре тыльной поверхности образца. В работе использовали импульсно–периодическое облучение образца с помощью Nd:YAG – лазера без фокусировки излучения (~ 5 МВт/см² в импульсе длительностью 8 нсек). Обработка записей для медных образцов (0.5; 1.0 и 2.0 мм толщиной и 10 мм в диаметре) позволила получить данные о скоростях 5 компонентов МУУВ, двигавшихся поперёк образца.

На рис. 7 а) представлена одна из регистрограмм (кривая 1) для медного образца толщиной 1,0 мм с сглаживанием по 10 точкам (кривая 2). Лазерный импульс совпадает с началом отсчёта по оси абсцисс. Как видно из рис. 7а), температура после быстрого повышения - начинает медленно падать. При этом на медленный спад температуры наложены (кривая 2) сигналы от пары компонентов МУУВ. Они приходят на торец несколько раз, отражаясь от тыльной, а затем – лицевой сторон образца ((x-t) – диаграмму для рис.7 б), выполненную с теми же предположениями, что и раньше. Эти компоненты, с той же почти постоянной скоростью, возникали (почти одновременно) на лицевой и тыльной поверхностях образца - такая ситуация является общей в исследованиях МУУВ [9, 10, 11, 46].

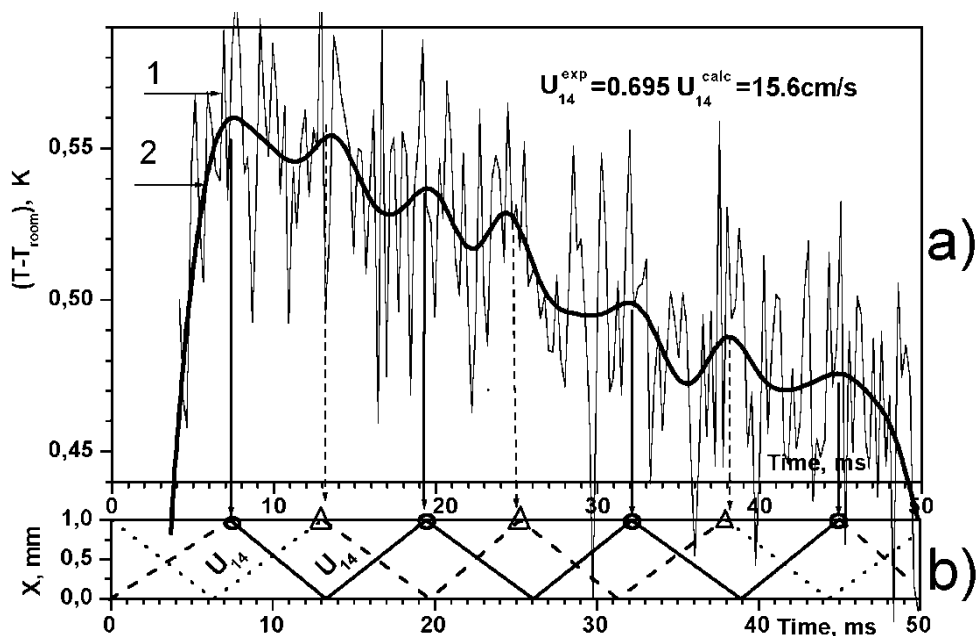


Рис.7. a), b).

Результаты измерений скорости МУУВ можно представить следующим образом. Было обработано 5 регистрограмм, отличавшихся полным временем записи (10; 50; 90 мсек). Каждая регистрограмма представляет собой сумму ~ 200 экспериментов с повтором через 1 сек. По регистрограммам можно восстановить (x-t)- диаграммы, подобные приведённой на рис.7 b), и получить данные относительно скоростей для пяти компонентов МУУВ по формуле (1) для расчёта величины U_{10}^{experim} . Предполагалось, что МУУВ распространяется уже поперёк, а не вдоль образца, в направлении его радиуса $R=5\text{мм}$):

$$\begin{aligned}
 U_{10}^{\text{experim}} &= 278 \text{ cm/sec} = 0.78 U_{10}^{\text{calc}} ; \\
 U_{11}^{\text{experim}} &= 163 \text{ cm/sec} = 0.91 U_{11}^{\text{calc}} ; \\
 U_{12}^{\text{experim}} &= 98.0 \text{ cm/sec} = 1.09 U_{12}^{\text{calc}} ; \\
 U_{13}^{\text{experim}} &= 45.4 \text{ cm/sec} = 1.01 U_{13}^{\text{calc}} ; \\
 U_{14}^{\text{experim}} &= 15.6 \text{ cm/sec} = 0.69 U_{14}^{\text{calc}} .
 \end{aligned}$$

Измерения с помощью термопары показали, что локальное изменение температуры в меди после прихода МУУВ выражается в ее повышении. В результате были найдены значения скоростей семи компонентов МУУВ, возбуждённых в меди. Они лежат в двух областях: в районе значений $i = 29, 30$ (величина скорости 3,33 и 1,63 мкм/сек, если в выражении (1) стоит в знаменателе «2,05») и в районе $i = 10; 11; 12; 13; 14$

величины скорости лежат в интервале значений от ~ 300 см/сек до ~ 15 см/сек.

IV. ВОЗБУЖДЕНИЕ МУУВ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Термопарные записи колебаний температуры стенки охлаждаемой медной трубки толщиной 3 мм, на которую подан электронный пучок с плотностью $(0,4-7)$ кВт/см², обнаруживают продвижение несколько медленных компонентов солитоноподобной волновой структуры. Они зарождаются на внешней и внутренней стенках облучаемого участка трубки и распространяются в нём со скоростями порядка 10^{-2} см/сек, 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.

В ряде работ, посвященных исследованию воздействия импульсного лазерного ИК излучения сначала на ВТСП- материалы [1, 50], а затем и на образцы четырёх главных типов кристаллов и ряда аморфных тел [9] было обнаружено новое явление, носящее название « Волна Изменения Отражения и Проводимости» (ВИОП) по первым методам регистрации волны. Позднее, когда выяснилось, что мы имеем дело не с одной волной, а с большим количеством Уединённых Волн, явление было названо «Медленные Уединённые Упругие Волны» (МУУВ) с дискретными скоростями. Это явление представляет собой трёхмерную солитоноподобную волновую структуру [А], в которой из области генерации в ответ на один возбуждающий импульс достаточной плотности (около 10 кВт/см²) по поверхности материала и сквозь него расходится целая последовательность одиночных волн - компонентов МУУВ. Они имеют одинаковый и постоянный знак амплитуды (положительный или отрицательный), а величина амплитуды слабо спадает с расстоянием. Каждый компонент МУУВ 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_1 (порядка км/сек) до скоростей порядка мм/сек и менее, согласно выражению:

$$U_i = (2)^{-i} v_1, \quad (1)$$

где индекс i , как установлено в [9], может принимать значения от 0 до 25. При этом не было видно ограничений на его дальнейшее увеличение до 30-35, что и произошло в дальнейшем.

МУУВ 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. Была предложена и реализована методика регистрации изменений давления как третьего независимо измеряемого параметра при прохождении МУУВ. В дальнейшем для её регистрации использовалось изменение пропускания образцов в видимой или ИК-областях спектра и тепловое излучение образца (с помощью термо-видеокамеры) [9]. Измерения колебаний температуры с помощью такого надёжного средства как термopара, представленные в [23] и настоящей работе делают результаты исследований МУУВ особенно достоверными.

Вопрос о возможной роли солитонов в переносе тепловой энергии в твердых телах обсуждался уже давно, в основном теоретически [9]. М. Тода [31] пришел к заключению, что солитоны играют важную роль в теплопроводности нелинейных кристаллических решеток с нарушениями. С экспериментальной точки зрения вопрос обсуждался в [51].

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 температуры связана с другой причиной - с возбуждением указанных выше медленных солитоноподобных компонентов МУУВ.

Подробное описание экспериментальной установки приведено в [52, 53]. 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 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 $(2 \div 3) \cdot 10^{-3}$ Па). Строчно-кадровая развёртка 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 около 1 сек. Регистрация температуры (с ошибкой около 1%) производилась хромель-копелевой термопарой с инерционностью порядка мсек, вмонтированной в рабочий участок трубы со стороны внутренней поверхности на глубину ~ 0,5 мм.

Система измерений, сбора и обработки информации для большого числа необходимых параметров [52], была полностью автоматизирована в стандарте приборного интерфейса МЭК 625.1. Измерения температуры по термо-ЭДС указанной термопары производились с помощью универсального цифрового вольтметра В7-43, обеспечивающего частоту измерений и записи 7 Гц.

В настоящей работе анализировались результаты 8 экспериментов, температурные записи которых представлены на рис. 8. Во всей серии температура воды на входе в измерительную систему была 10 °С, а среднее давление воды 12,6 атм.

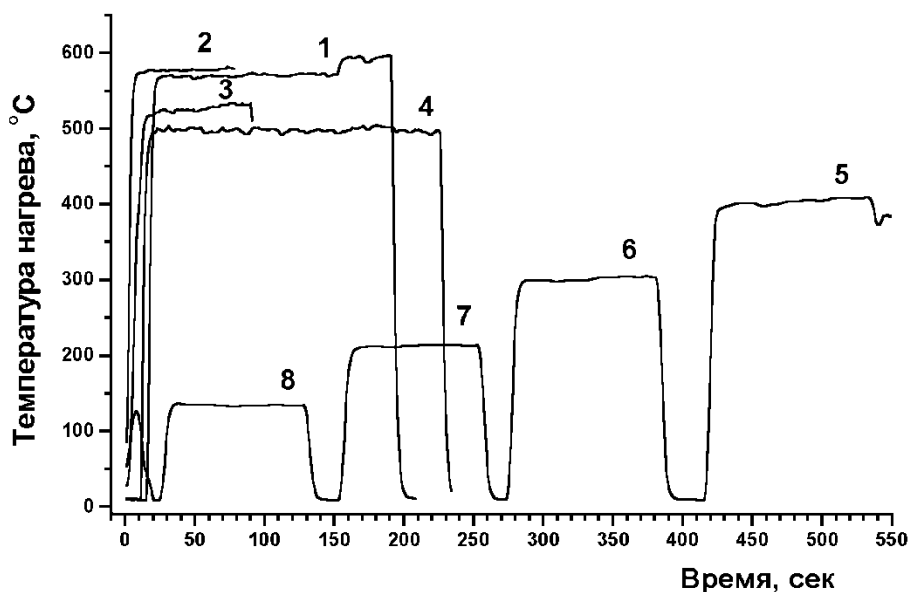


Рис.8. Общий вид температурных записей экспериментов.

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

Режим нагрева с кипением. На рис. 9 а) представлена сглаженная по 5 точкам часть одной из таких записей (запись 1).

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

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

На рис. 9 б) представлена $(x-t)$ -диаграмма, характеризующая волновой процесс, происходящий в рассматриваемом образце меди после включения электронного пучка, который приводит к изменениям температуры, показанным на рис. 9 а).

Было сделано предположение, что, при прохождении МУУВ через область расположения термопары, последняя регистрирует увеличение температуры. В настоящей работе приведены экспериментальные данные о положительном знаке изменения температуры при прохождении волн МУУВ через медный образец

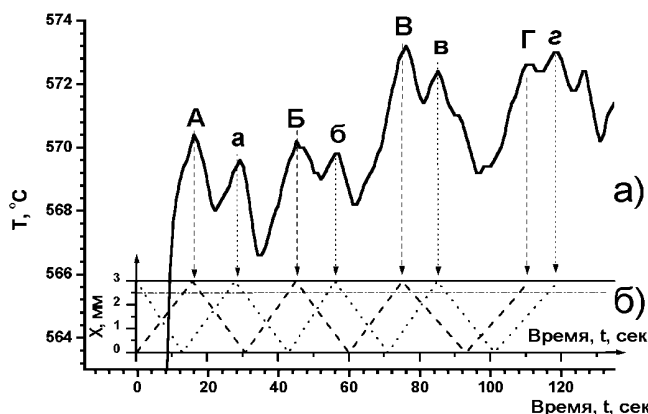


Рис.9. Случай режима нагрева с кипением. а)- вариации температуры; б)- соответствующая им $(x-t)$ - диаграмма волнового процесса.

На рис. 9 б) штриховыми отрезками представлена траектория движения с \sim постоянной скоростью одиночной волны, образовавшейся на лицевой, облучаемой е-пучком, поверхности. Она движется сначала к внутренней поверхности медной трубы, которую достигает, приблизительно, через 17 сек (это время соответствует первому максимуму А на кривой рис. 9 а)). Затем волна отражается от этой внутренней поверхности и движется с той же (или несколько меньшей) скоростью к лицевой поверхности, где снова отражается, обуславливая максимум Б при подходе к термопаре (положению термопары на (x-t)-диаграмме рис. 9 б) соответствует горизонтальная штрихпунктирная прямая при $x=2,5$ мм). Далее процесс повторяется многократно. Каждый раз, когда волна проходит область расположения термопары, она вызывает подъём средней температуры на величину порядка 1 % (пики А, Б, В, Г).

Пики А, Б, В, Г на кривой рис. 9 а) являются составляющими дублетов, в которые входят несколько меньшие по интенсивности пики а, б, в, г. Их регулярность позволяет предположить, что они, как и А, Б, В, Г, обусловлены приходом к термопаре другой одиночной волны, несколько меньшей по интенсивности, движущейся приблизительно с той же скоростью, но зародившейся на внутренней поверхности медной трубы (пунктирная линия на рис. 9 б)). Из расположения пиков а, 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.

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

В табл.1 приведены результаты расчёта скоростей для всей серии экспериментов. Опыту №1 соответствует запись температуры (рис. 9 а) и (x-t)- диаграмма рис. 9 б).

В соответствии с выражением (1), обе найденные для опыта №1 скорости соответствуют 25-му компоненту МУУВ, превышая его на $\sim 40\%$ (в расчёте использовано табличное значение продольной скорости звука для меди, равное $4,70 \cdot 10^5$ см/сек [54]). Это расхождение частично можно отнести за счёт распространения МУУВ по нагретому металлу. Увеличение скорости

МУУВ наблюдалось ранее в экспериментах с диэлектриками, когда повышалась температура образца [9].

Таблица 1.

Условия и результаты экспериментов.

| №№ опыт ов | Время до первого максиму ма, (сек) | Температ ура нагрева, (°С) | Длительно сть развёртки, (сек) | Скорость МУУВ (от лицевой поверхнос ти) (см/сек) | Скорость МУУВ (от внутренне й поверхнос ти) | Номер компо нента ВИОП | Отклоне ние от расчётно й 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 |

В табл.1 в первых 4-х строках приведены результаты экспериментов, выполненных при условиях малого расхода охлаждающей воды и высоких мощностей в пучке (нагрев медной трубки достигал ~ (500-580) °С). Для всех опытов были построены (x-t)-диаграммы, которые достаточно хорошо повторяют главные особенности рис. 9 б). Все данные первой части табл.1 с некоторым разбросом согласуются с рассчитанной по (1) скорости 25-ой компоненты МУУВ (компоненты с индексом $i = 25$).

На температурных записях в опытах №3 и №4 кроме пиков, отождествленных как U₂₅, между ними наблюдаются небольшие максимумы, соответствующие проявлениям предыдущего компонента МУУВ, то есть U₂₄, образовавшегося на лицевой стороне. Скорости этих компонентов U₂₄ на записях опытов №3 и №4, приблизительно, вдвое больше величины U₂₅.

Возбуждение МУУВ электронным пучком позволило получить новую информацию об условиях возбуждения этих волн по сравнению с возбуждением лазерными импульсами [9]. Это относится к образованию волн передним фронтом возбуждающего импульса, т.к. возбуждение компонентов происходило только в начале эксперимента, когда мощность пучка менялась, достигая постоянного уровня.

Важным результатом исследований МУУВ с возбуждением электронным пучком является фиксация образования некоторого i -го

компонента волны на противоположной поверхности образца, непрозрачного для частиц пучка, одновременно с аналогичным i -ым компонентом волны на облучаемой поверхности. Образование некоторого компонента волны на противоположной поверхности образца является обычным в лазерных опытах с диэлектриками, прозрачными для ИК-излучения, возбуждающего МУУВ [9]. Но для непрозрачных объектов таких результатов до сих пор не наблюдалось.

Режим нагрева без кипения. Как ранее отмечалось, 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. Такой режим характеризуется нестабильностью существования паровой плёнки на внутренней стенке трубки и её периодическими срывами.

В связи с этим были исследованы режимы нагрева электронным пучком медной трубы при расходах охлаждающей воды и мощностях пучка, когда кипение воды отсутствует.

В табл.1 этим условиям соответствует опыт №8 и близко к ним подходит опыт №7. Опыты № 5 и 6 соответствуют промежуточным условиям.

На рис. 10 а), б) представлены график изменения температуры и $(x-t)$ -диаграмма волновых процессов для опыта № 8.

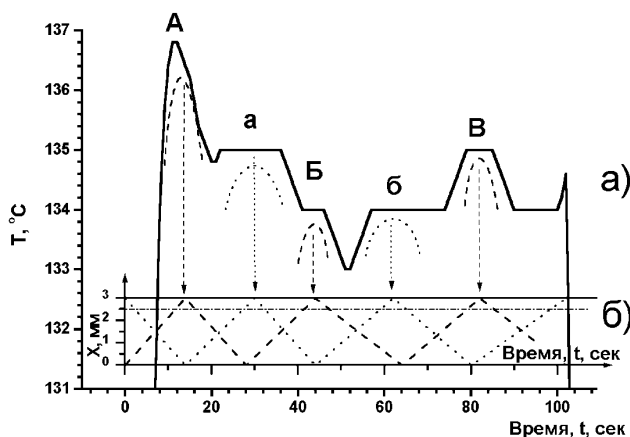


Рис.10. а), б). Режим нагрева без кипения. а)- изменение температуры; б) - соответствующая им $(x-t)$ - диаграмма волнового процесса..

Поскольку чувствительность схемы не менялась, а сигнал термопары при снижении температуры от 570°С до 137°С падает весьма существенно (в 4,2 раза), температурный ход на рис. 10 а) содержит гораздо меньше деталей, чем на рис. 9 а), и ожидаемые пики ΔT разрешены хуже (их величина не превышает $(1 \div 1,5)$ °С). Однако, исходя из тех же предположений, что и ранее, можно предложить аналогичную (x-t)- диаграмму процессов, рис. 10 б). Из табл.1 следует, что для опытов №8 и №7, для 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 (№ 5, 6) или когда процесс кипения можно считать определяющим для теплопередачи (№ 1-4). Анализ полученных результатов показывает, что при облучении электронным пучком с плотностью мощности $(0,4 \div 7)$ кВт/см² массивного образца меди в последнем возбуждаются медленные компоненты МУУВ, которые соответствуют расчётным значениям 24-го, 25-го и 26-го компонентов U_{24} , U_{25} , U_{26} этой волновой структуры.

Результаты исследований, проведенных при различных температурах (от 135°С до 580°С), показали, что обнаруженные температурные колебания связаны не только с изменением режима теплопередачи между теплоносителем и исследуемым образцом меди, но и подтверждают вывод о том, что МУУВ с её компонентами играет определённую роль в процессе теплопереноса [51].

V. Заключение

1. Как результат проведенных исследований приведем данные о скоростях исследованных компонентов МУУВ в меди. Они различаются на 6 порядков величины: от 0,2 мм/мксек до 0,1 мм/сек. Это один из основных результатов настоящей работы.

2. Значения скоростей компонентов МУУВ, найденные согласно выражению

$$U_i = v / (2,05)^i \quad (2)$$

сравниваются со скоростью звука в меди 0,371 см/мксек [54]. В уравнении (2), вместо числа «2» (как в выражении (1)) помещена уточнённая величина «2,05» (в скобках указан номер раздела настоящей работы). В результате этих уточнений получены соотношения для компонентов МУУВ.

$$(II) U_4^{эксп} = 0,207 \text{ мм/мксек} = 1,00 U_4^{расч}$$

$$(II) U_5^{эксп} = 0,08 \text{ мм/мксек} = 0,80 U_5^{расч}$$

$$(III) U_{10}^{эксн} = 278 \text{ см/сек} = 0,61 U_{10}^{расч}$$

$$(III) U_{11}^{эксн} = 163 \text{ см/сек} = 0,69 U_{11}^{расч}$$

$$(III) U_{12}^{эксн} = 98,0 \text{ см/сек} = 0,81 U_{12}^{расч}$$

$$(III) U_{13}^{эксн} = 45,4 \text{ см/сек} = 0,73 U_{13}^{расч}$$

$$(III) U_{14}^{эксн} = 15,6 \text{ см/сек} = 0,49 U_{14}^{расч}$$

$$(II) U_{19}^{эксн} = 0,27 \text{ см/сек} = 0,62 U_{19}^{расч}$$

$$(II) U_{20}^{эксн} = 0,14 \text{ см/сек} = 0,67 U_{20}^{расч}$$

$$(IV) U_{22}^{эксн} = 0,042 \text{ см/сек} = 0,83 U_{22}^{расч}$$

$$(IV) U_{23}^{эксн} = 0,020 \text{ см/сек} = 0,81 U_{23}^{расч}$$

$$(IV) U_{24}^{эксн} = 0,010 \text{ см/сек} = 0,83 U_{24}^{расч}$$

$$(III) U_{28}^{эксн} = 7,03 \text{ мкм/сек} = 1,03 U_{28}^{расч}$$

$$(III) U_{29}^{эксн} = 3,62 \text{ мкм/сек} = 1,09 U_{29}^{расч}$$

Литература

1. Kudriavtsev E.M., Zotov S.D., Krivov V.V., E.N. Lotkova, Yu.I. Rybalko. Reflection and conduction wave in HTSC after IR laser irradiation // Material Research Society - Meeting of Fall'92, Boston, USA, Book of abstracts, 1992. H3, 25 .
1. 2.. М.М. Ляховицкий, Н.А. Минина, Н.А. Семашко, Н.А. Семке, В.В. Рощупкин, М.А. Покрасин, А.Г. Кольцов. Кинетика структурных превращений в конструкционной стали мартенситного класса. ТВТ. 2007. Т. 45. № 1. С. 38-42.
2. М.М. Ляховицкий, М.А. Покрасин, В.В. Рощупкин, Н.Л. Соболев, А.И. Чернов. Исследование акустической эмиссии в армо-железе и конструкционной стали в процессе рекристаллизации и фазовых переходов. ТВТ. 2006. Т. 44. № 2. С. 225-229.
3. В.В. Рощупкин, М.М. Ляховицкий, М.А. Покрасин, Н.А. Минина, А.Г. Кольцов, Н.Л. Соболев. Исследование кинетики структурных превращений в металлах и сплавах акустическими и акустико-эмиссионными методами. «Ультразвук и термодинамические свойства вещества»: Сб. научных трудов. Вып. 34-35. Курск: КГУ, 2006. С. 33-55.
4. Е.М. Кудрявцев, С.Д. Зотов, А.А. Лебедев, А.А. Крайский. В.Н. Колокольцев, М.М. Ляховицкий, В.В. Рощупкин. Медленные уединённые упругие волны с дискретными скоростями, возбуждённые в твёрдом теле, «дирижируют» его акустической эмиссией. Физическая акустика. Нелинейная акустика. Сборник трудов научной конференции «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXIV сессия Российского акустического общества. Т.1. М.: ГЕОС. 2011. С. 118-122.
5. Кудрявцев Е.М., Зотов С.Д., Лебедев А.А., Ляховицкий М.М., Рощупкин В.В. Интерпретация «гребёнки» импульсов акустической эмиссии (в опытах с облучением стекла лазерным импульсом) как результата возбуждения медленных уединённых упругих волн. — Материалы XIV Российской конференции (с международным участием) по теплофизическим свойствам веществ (РКТС- 14) в 2 т. Казань: Изд-во «Отечество». 2014. Т. 1. С. 327-329.

6. Кудрявцев Е.М., Лебедев А.А. Зотов С.Д., Ляховицкий М.М. Рощупкин В.В. Результаты наблюдения лазерным шпирен-методом медленных упругих волн в стекле – подтверждены акустическим методом. Сборник трудов Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2014». Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова. СПб: Университет ИТМО, 2014. С.176-178.
7. Eugene Kudriavtsev, Vladimir Roshchupkin. Three difference at the Slow Solitary Elastic Wave (SSEW) with discrete velocities appearing in the glass. I. Laser excited SSEW components moving across the front part of cylindrical sample. II. Crack excited SSEW components in the plate shape sample. III. SSEW components moving along the cylindrical sample. Book of Abstracts, pp. 44; 111;112, Laser Ultrasonics 2016 (LU2016), July 4-8 2016, Linz, Austria
8. E.M. Kudriavtsev. Thermal solitons in the laser-surface interactions. In: High-Power Laser Ablation. Claude R. Phipps, Editor. Proceedings of SPIE. 1998. V. 3343. P. 411-422
9. Kudriavtsev Eugene. Solitonic type excitations in laser- condensed matter interaction: additional proof by independent publications», invited paper, in: «High-Power Laser Ablation III». Claude R. Phipps, Editor. Proceedings of SPIE. 2000. V. 4065, P. 411-424.
10. Е.М. Кудрявцев, В.И. Емельянов, М. Утрик. Нестационарный перенос энергии солитоноподобными волнами в твердом теле после воздействия лазерного импульса. Инженерно-физический журнал. 2000. Т. 73. № 6. С. 1261-1267.
11. Е.М. Кудрявцев. Последовательность из многих уединённых упругих волн с дискретными, вдвое убывающими, начиная от скорости звука, скоростями, возбуждаемая однократным импульсом в конденсированных средах. Сборник трудов XIII сессии РАО, т.1 Физическая акустика. Распространение и дифракция волн. Москва, ГЕОС, 2003. С. 204-207. <http://rao.akin.ru/rao/sess13/sect1f.htm>. (PDF,220K) p165-168).
12. E.M. Kudriavtsev, S.D. Zotov, M. Autric. Experimentally established in condense matter 3-dimensional many components soliton-type wave structure as a new physical object which is waiting for its equations. In: Progress in nonlinear science, Proceedings of the International Conference dedicated to the 100-th anniversary of A.A. Andronov. 2002. V.2. Frontiers of Nonlinear Physics, P. 96-101.
13. К.Б. Абрамова, В.П. Валицкий, Н.А. Златин, Б.П. Перегуд, И.Я. Пухонто. Излучение, возникающее при быстрой деформации и разрушении металлов. ДАН СССР. 1971. Т. 201, № 6, С. 1322-1325.
14. К.Б. Абрамова, В.П. Валицкий, Н.А. Златин, Б.П. Перегуд, И.Я. Пухонто, З.В. Федичкина. Люминесценция металлов, сопровождающая их деформацию и разрушение. ЖЭТФ, 1976, Т. 71, Вып.5 (11), С.1873-1879.
15. К.Б. Абрамова, А.Б. Пахомов, Б.П. Перегуд, И.П. Щербаков, Свет, излучаемый металлами при статическом их нагружении. Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. Вып. 17. С. 1025-1028.
16. К.Б. Абрамова, И.П. Щербаков, А.М. Кондырев, И.Я. Пухонто. Воздействие лазерных импульсов на металлические мишени. ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 5. С. 190-196.
17. E.M. Kudriavtsev, K.B. Abramova, I.P. Scherbakov. Soliton-type waves of reflection and conduction in metals at static loading as a possible tool of precatastrophic damage indications. In: Laser-Induced Damage in Optical Materials. Proceeding of SPIE. 2002. V. 4679. P. 167-172.
18. К.Б. Абрамова, Е.М. Кудрявцев, И.П. Щербаков. Временная структура импульса механолюминесценции. как подтверждение генерации солитоноподобных возбуждений в металлах при плоском ударе. Тезисы докладов, Международная конференция по люминесценции, посвящённая 110 - летию со дня рождения С.И. Вавилова. 2001. ФИАН, С. 206.
19. E.M. Kudriavtsev, S.D. Zotov. Discrete velocities of slow soliton-like excitations in a single crystal of silicon (comparison of experimental results with the data of other works).

- Proceedings of 4 Int. Conf. Single Cristal Growth and Heat and Mass Transfer, 2001. Vol. 3. P. 596-604.
20. E.M. Kudriavtsev, S.D. Zotov. Discret Velocities of Slow Soliton-Like Excitations in the Copper (Comparison of Two Independent Experimental Results). Technical Digest IQEC/LTA-2002. P. 330.
 21. V. Ralchenko, A. Vlasov, I. Vlasov, B. Zubov, A. Nikitin, A. Khomich. Spatial distribution of thermal conductivity of diamond wafers as measured by laser flash technique. Proceedings of SPIE. 1997. Vol. 3484. P. 214-221.
 22. Е.М. Кудрявцев, А.В. Варава, А.В. Дедов, А.Т. Комов. Наблюдение медленных компонент солитоноподобной волновой структуры в массивном образце меди при возбуждении электронным пучком. Краткие сообщения по физике. М.: ФИАН. 1999. № 10. С. 31-37.
 23. E.M. Kudriavtsev, A.V. Varava, A.V. Dedov, A.T. Komov. Slow Components of Solitonic-Type Wave Structure Excited by e-Beam in Massive Copper Sample. JINR Rapid Comm. № 5, 6 [97]-99. 1999. P. 13-21.
 24. Филиппов А.Т. Многоликий солитон. М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1986. 224 с. (Библиотечка «Квант», вып. 48).
 25. Korteweg, D.J. and de Vries, G. On the change of form of long waves advancing in a rectangular canal, and on a new type of long stationary waves. Phil. Mag. 1895. Vol. 39. P. 422-443.
 26. Т.А. Конторова, Я.И. Френкель. К теории пластической деформации и двойникования. ЖЭТФ. 1938. Т. 8. I, С. 89-95; II, С. 1340-1348; III, Трехмерная модель двойникования, С. 1349-1358.
 27. N.J. Zabusky, M.D. Kruskal. Interaction of "Solitons" in a Collisionless Plasma and the Recurrence of Initial States. Phys. Rev. Lett., 1965. V. 15. P. 240-243.
 28. M. Peyrard, M. Kruskal. Kink dynamics in the highly discrete sine-Gordon system. Physica D. Nonlinear Phenomena. 1984. Vol. 14. No. 1. P. 88-102.
 29. Collected Papers of Enrico Fermi. 1965. University of Chicago Press. Chicago. II, P. 978.
 30. Toda M. Solitons and Heat Conduction. Physica Scripta. 1979. V. 20, No. 3-4. P. 424-430.
 31. Solitons (Topic in current physics. Vol. 17). Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New-York. 1980. P. 273.
 32. Kudriavtsev E.M., Autric M. Solitonic approach to the wave of reflection and conduction mechanism. Eleventh International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High Power Laser Conference, D.R. Hall, H.J. Baker, Editors, Proceeding SPIE. 1997. Vol. 3092. P. 671-673.
 33. Yu.S. Kivshar, B.A. Malomed. Dynamics of solutions in nearly integrable systems. Rev. Mod. Phys., 1989. V. 61. No. 4. P. 763-915.
 34. Кудрявцев Е.М., Зотов С.Д., Лебедев А.А., Ляховицкий М.М., Рошупкин В.В. Акустическая эмиссия как метод регистрации медленных уединенных упругих волн с дискретными скоростями, возникающих при структурных превращениях в металлах и сплавах. Сборник материалов: The Third Intern. Conf. Deformation & Fracture of Materials and Nanomaterials (DFMN3009). М.: ИМЕТ РАН, 2009. vol. II. P. 238-239.
 35. Е.М. Кудрявцев, С.Д. Зотов, А.А. Лебедев, В.Н. Колокольцев, М.М. Ляховицкий, В.В. Рошупкин. Акустическая эмиссия как метод регистрации Медленных Уединённых Упругих Волн, имеющих дискретные скорости, с которыми связан солитонный теплоперенос в твёрдых телах. XIII Рос.конф.по теплофизическим свойствам веществ (с межд. участием). Тезисы докладов. Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2011. С. 235-236
 36. Е.М. Кудрявцев, С.Д. Зотов, А.А. Лебедев, А.Ф. Попович, В.Г. Ральченко, П.А. Цыганков. Упруго-волновая составляющая теплопроводности мультислойных биметаллических Al-Ti наносистем. Вестник ХНАДУ, 2010. Вып. 51. С. 105-112.

37. Кудрявцев Е.М., Лебедев А.А., Покрасин М.А., Ляховицкий М.М., Рошупкин В.В. Исследование температурных зависимостей скорости ультразвука и компонентов медленных уединенных упругих волн в нитиноле. Материалы 12-ой Международной научно-практической конференции «Качество, стандартизация, контроль: теория и практика». Киев: АТМУКРАИНЫ. 2012. С. 111-113.
38. Кудрявцев Е.М., Лебедев А.А., Покрасин М.А., Ляховицкий М.М., Рошупкин В.В. Наблюдение медленных уединенных упругих волн и зависимости их дискретных скоростей от температуры в нитиноле. Сборник трудов II Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ». СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012. С. 356-357.
39. Кудрявцев Е.М., Лебедев А.А., Зотов С.Д., Ляховицкий М.М., Покрасин М.А., Рошупкин В.В. Исследование (акустическим методом) проявлений Медленных уединенных упругих волн (МУУВ) с дискретными скоростями в металлах и сплавах. «Ультразвук и термодинамические свойства веществ». Сб. научных трудов. Вып. 39. Курск: КГУ. 2014. С. 25-41.
40. Новиков И.И., Ермишкин В.А., Кудрявцев Е.М., Минина Н.А. Колебания теплового поля в эллиптической мишени, возбуждаемые лазерным импульсом. Материалы XIV Российской конференция (с международным участием) по теплофизическим свойствам веществ (РКТС- 14) в 2 т. Казань: Изд-во «Отечество». 2014. Т. 1. С. 396-399.
41. Е.М.Кудрявцев, С.Д.Зотов, А.А.Лебедев, М.М.Ляховицкий, В.В.Рошупкин. О воздействии волн типа МУУВ на структуру деформированного никеля (для повышения эффективности отжига). Материалы XIV Российской конференция (с международным участием) по теплофизическим свойствам веществ (РКТС- 14) в 2 т. Казань: Изд-во «Отечество». 2014. Т. 1. С. 329-330.
42. E.M. Kudriavtsev, S.D. Zotov, A.A. Lebedev, V.V. Roshchupkin. Slow Soliton-Like Elastic Waves in Metals: One More Observation and Application. Laser Optics -2016 Conference. Session R8: Nonlinear Photonics: Fundamentals and Applications. Sankt-Petersburg. 2016. P. 45/107.
43. Kudriavtsev E.M., Zotov S.D. Lebedev A.A., Lyakhovitskii M.M., Pokrasin M.A., Roshupkin V.V. Laser Radiation Influence on the Parameters of Acoustic Emission from Nickel During the High Temperature Annealing. Book of Abstracts. 18th International Conference on Photoacoustic and Photohermal Phenomena (ICPPP18). 2015. O27. P. 83-84.
44. Гинзбург В.Л. Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными (тридцать лет спустя, причем на пороге XXI века)? УФН. 1999. Т. 169. № 4. С. 419-441.
45. E.M. Kudriavtsev. Soliton-Type Waves of Reflection and Conduction in Laser-Matter Interaction – As Appeared in Collected Papers of Symposium “Laser-Induced Damage in Optical Materials 1969-1998 (Review)”, In: Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2001, Gregory J. Exarhos, Arthur H. Guenter, Keith L. Lewis, M.J. Soileau, Christppher J. Stols, Editors, Proceeding of SPIE, 2002. Vol. 4679, P. 157-166.
46. Г.И. Канель, С.В. Разорёнов, А.В. Уткин, В.Е. Фортов. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. 408 с.
47. J.H. Smith. ASTM Spec. Tech. Publ. 1962. No. 336. P. 264.
48. V.I. Emel'yanov. Slow Waves of Defect Formation and Recombination in Laser-excited Solids. Laser Physics. 1997. Vol. 7. No. 2. P. 455-460.
49. E.M. Kudriavtsev, S.D. Zotov, V.V. Krivov, M. Autric. Reflection and conduction wave in ceramic HT SC after IR laser irradiation pulse. Physica C. 1994. V. 235-240. Part 2. p. 1439-1440.
50. Е.М. Кудрявцев, В.И. Емельянов, М. Утрик. О результатах исследования нестационарного переноса энергии солитоноподобными волнами в твердом теле

- после воздействия лазерного импульса. В сборнике: Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках. М.: Изд-во МЭИ. 1999. С. 298-301.
51. А.В. Дедов, А.Т. Комов. Особенности теплообмена в недогретом закрученном потоке. В сборнике: Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках. М.: Изд-во МЭИ. 1999. С. 287-290.
52. Варава А.Н., Дедов А.В., Комов А.Т., Щеглов В.А., Наумов В.К., Семашко Н.Н. Экспериментальное исследование процессов теплосъёма во фрагменте тепловоспринимающего элемента приемника пучков системы инжекции Т-15. Вопросы атомной науки и техники. Термоядерный синтез. 1998. Вып. 1-2. С. 70-73.
53. Физические величины: Справочник — А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.