

УДК 669.71:539.382:620.179.17

С.В. МАКАРОВ, В.А. ПЛОТНИКОВ*, А.И. ПОТЕКАЕВ**,****

МАКРОСКОПИЧЕСКАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ АКТОВ В СЛАБОУСТОЙЧИВОМ СОСТОЯНИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ И СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Показано, что в слабоустойчивой кристаллической среде колебания стоячей волны активируют элементарные деформационные сдвиги в некотором объеме, связанном с длиной стоячей волны и определяющем макроскопический масштаб корреляции. Установлено, что в то же время скоррелированные деформационные сдвиги генерируют акустические сигналы, отвечающие условию когерентности, в результате интерференции которых формируется единичный акустический сигнал аномально высокой амплитуды. Проведенный анализ низкочастотного спектра акустической эмиссии при высокотемпературной пластической деформации алюминия свидетельствует, что его дискретный вид обусловлен перераспределением колебательной энергии первичного акустического сигнала по резонансным колебаниям стоячих волн резонаторов.

Ключевые слова: слабоустойчивое состояние, акустическая эмиссия, деформация.

Введение

Накопленные в настоящее время теоретические и экспериментальные данные, характеризующие явление акустической эмиссии в ходе структурных и фазовых превращений, свидетельствуют об активной роли явления акустической эмиссии, например, в процессах пластической деформации [1–5]. В этих работах установлено, что в условиях термомеханического нагружения на протяжении всего процесса нагрева наблюдается накопление деформации, сопровождающееся акустической эмиссией [1, 2]. Характерны два варианта накопления деформации – монотонное и скачкообразное и два варианта проявления акустической эмиссии – монотонный и импульсный (дискретный) [1]. Показано, что амплитуда акустического сигнала может характеризовать корреляцию в ансамбле элементарных излучателей, т.е. в ансамбле элементарных деформационных актов. Существенно, что энергия активации (эффективная энергия активации) элементарных деформационных актов зависит от приложенной нагрузки как функция с максимумом, причем снижение эффективной энергии наблюдается после 15 МПа [2]. Снижение эффективной энергии активации при увеличении внешней нагрузки может свидетельствовать о переходе кристаллической решетки в слабоустойчивое состояние, причем этот переход сопровождается увеличением активационного объема при повышении температуры деформации. В свою очередь, увеличение активационного объема обуславливает увеличение масштаба корреляции элементарных деформационных актов и корреляции (точнее, синхронизации) сигналов акустической эмиссии. Однако макроскопический масштаб скачка деформации свидетельствует, что эффект корреляции охватывает дислокационный ансамбль в масштабе больше, чем одна деформационная полоса [3].

В рамках модели автоакустической эмиссии [4, 5] скачкообразная деформация и дискретная акустическая эмиссия свидетельствуют о пространственно-временном упорядочении движения дефектов в кристалле. При этом кристалл в условиях механического воздействия переходит в особое состояние, именуемое активным (в слабоустойчивое состояние в наших терминах [6–27]) и представляет собой автоколебательную систему, для которой характерно возбуждение колебаний, а микроскопические процессы происходят кооперативно и самосогласованно, способствуя синхронизации колебаний и возбуждению квазипериодических релаксационных колебаний [5].

Анализ скачкообразной деформации и акустической эмиссии приводит к выводу об активной роли акустической эмиссии в активации, а главное – в синхронизации элементарных деформационных актов в макроскопическом масштабе [28]. Макроскопический масштаб корреляции обусловлен волновой природой синхронизации элементарных актов в поле напряжений, формирующей слабоустойчивое состояние кристаллической решетки деформируемого материала. В этой связи определяющую роль играет интерференция волновых пакетов акустической эмиссии, приводящая к макроскопическому распределению критических колебательных смещений в слабоустойчивой кристаллической среде.

Цель данной работы – исследовать в процессах пластической деформации макроскопическую корреляцию деформационных актов в слабоустойчивом состоянии кристаллической решетки и природу распределения спектральной плотности на основе представлений об активной роли акустической эмиссии при высокотемпературной деформации алюминия.

Методика спектрального анализа сигналов акустической эмиссии

Регистрация акустической эмиссии осуществлялась с помощью широкополосного пьезопреобразователя GT300 (полоса пропускания до 800 кГц). Сигнал акустической эмиссии усиливался каскадом GT200A-01 (коэффициент усиления 40 дБ, приведённый ко входу шум менее 18 мкВ) и дополнительным каскадом усиления с коэффициентом усиления 51 дБ с полосой пропускания до 7 МГц. Таким образом, общий коэффициент усиления системы составлял около 91 дБ. Усиленный сигнал акустической эмиссии поступал на вход широкополосного аналого-цифрового преобразователя АЦП ЛА-н150-14РС1 (ширина полосы пропускания 500 кГц, частота дискретизации 7 МГц), его дальнейшая обработка осуществлялась с помощью универсальной программы «Регистратор данных АЦП» [29]. Программа регистрировала высокочастотный сигнал акустической эмиссии. Одновременно рассчитывался уровень среднеквадратического напряжения сигнала, по которому впоследствии можно было выбрать участки для быстрого преобразования Фурье, причем для этого использовался стандартный алгоритм [30].

В качестве объекта исследования был взят алюминиевый образец.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены данные процесса накопления деформации (*б*) в алюминиевом образце и сопровождающая его акустическая эмиссия при монотонном нагреве образца до 600 °С в условиях действия сдвиговой нагрузки величиной 25 МПа. Процесс накопления деформации при нагреве до 560 °С носит монотонный характер. После 560 °С накопление деформации представляет собой скачкообразные акты, перемежающиеся монотонными участками. Акустическая эмиссия (рис. 1, *а*) представляет собой две области акустической активности, связанные с монотонной и скачкообразной областями накопления деформации. На рис. 1, *б* область 1 соответствует монотонному накоплению деформации, область 2 – скачкообразному. Для акустической эмиссии в области 2 характерны высокоамплитудные акустические сигналы, коррелирующие с деформационными скачками, в то время как в области 1 амплитуды сигналов значительно ниже.

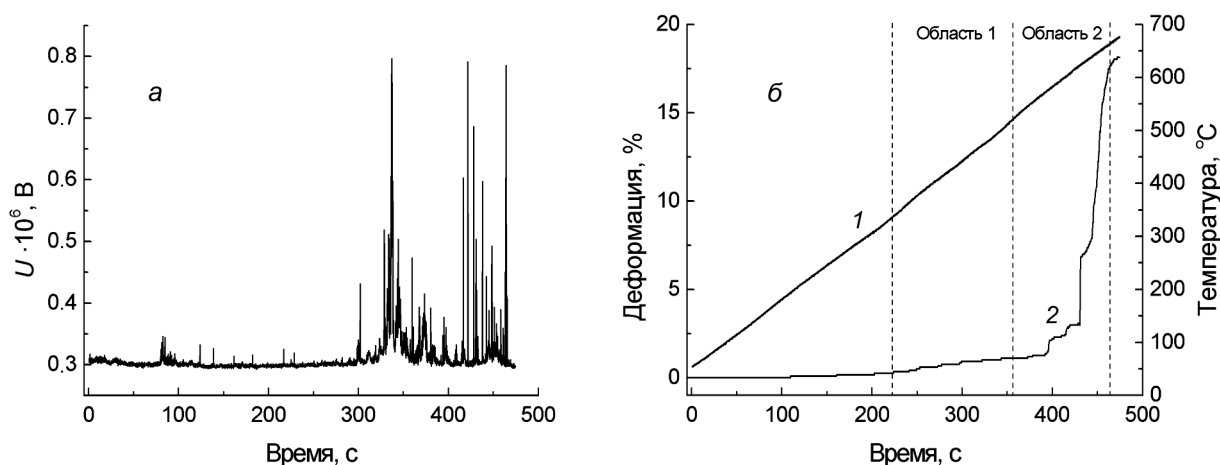


Рис. 1. Акустическая эмиссия при неизотермическом нагружении образца (*а*). Монотонный (кр. 1) и скачкообразный (кр. 2) характер накопления деформации в ходе нагрева до 640 °С нагруженного сдвиговой нагрузкой величиной 25 МПа образца (*б*)

Спектральный анализ сигналов акустической эмиссии проведен в двух интервалах накопления деформации (на рис. 1, *б* это области 1 и 2). На рис. 2 представлен спектр сигналов акустической эмиссии, полученный для монотонного накопления деформации (область 1) в ходе нагрева образца алюминия в условиях нагружения сдвиговой нагрузкой. Характерной особенностью спектра является его дискретный вид, представляющий собой совокупность низкочастотных пиков спектральной плотности сигналов акустической эмиссии, расположенных в частотном диапазоне

(примерно 10–100 кГц), причем в полосе частот 60–100 кГц спектральная плотность сигналов близка к спектральной плотности шума.

На рис. 3 представлен спектр сигналов акустической эмиссии для скачкообразного накопления деформации (области 2 на рис. 1). Характерной особенностью этого спектра является перераспределение спектральной плотности в частотную область 60–100 кГц. Кроме того, спектральная плотность потока сигналов акустической эмиссии в диапазоне 60–100 кГц на скачкообразном участке существенно (на порядок величины) выше, чем спектральная плотность акустической эмиссии в этом же диапазоне на монотонном участке накопления деформации.

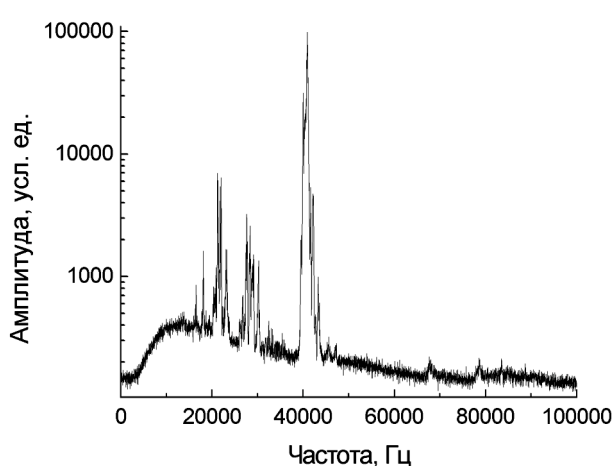


Рис. 2. Спектральная плотность сигналов акустической эмиссии, соответствующей монотонному накоплению деформации при нагреве образца

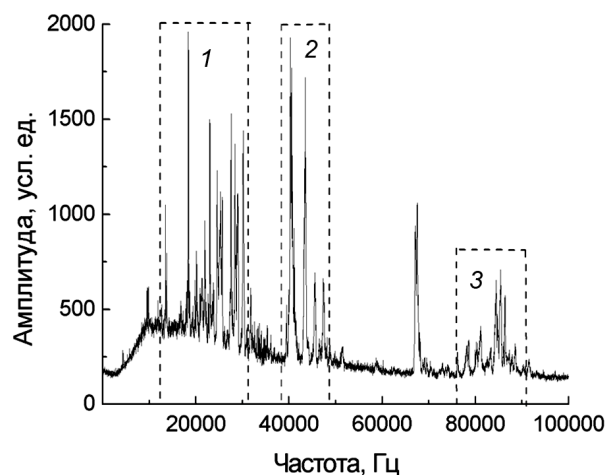


Рис. 3. Спектральная плотность сигналов акустической эмиссии, соответствующая скачкообразному накоплению деформации: 1, 2, 3 – выделенные участки спектральной плотности, соответствующие резонансам на участках волновода и концентраторе деформации

Согласно приведенным на рис. 2 и 3 данным, спектральная плотность сигналов акустической эмиссии распределена в трех диапазонах частот и существенно отличается от спектра шума пьезокерамики и усилительного каскада регистрирующей системы, спектральная плотность которого представляет собой слабо возрастающую функцию с максимумом около 11 кГц.

Дискретный характер спектральной плотности сигналов акустической эмиссии свидетельствует, что система «образец – волновод» представляет собой резонансную систему, состоящую из нескольких резонаторов, распределяющих колебательную энергию первичных элементарных излучателей акустической эмиссии по спектральным диапазонам. Это означает, что представленные спектры акустической эмиссии являются вторичным эффектом по отношению к первичному акустическому сигналу. Согласно [3], первичным источником акустической эмиссии является выход на поверхность ансамбля дислокаций одной системы скольжения, формирующих одну полосу деформации.

Волновод и образец представляли собой стержень цилиндрической формы общей длиной ~ 300 мм, часть которого длиной ~ 30 мм и диаметром ~ 4 мм являлся участком локализации деформации, делящей волновод на две части длиной 200 и 100 мм. Геометрия системы «волновод – образец» позволяет выделить в качестве резонаторной части участок волновода в виде стержня длиной ~ 200 мм, передающий акустическую энергию в пьезопреобразователь. Можно выделить участок волновода в виде стержня длиной ~ 100 мм, которым образец крепится в устройстве нагружения. Участок волновода длиной 30 мм и диаметром 4 мм, расположенный между этими двумя участками волновода, является областью локализации сдвиговой деформации.

Ясно, что резонаторы связаны с геометрией системы «образец – волновод», именно эти резонаторы определяют набор длин волн, соответствующий условиям образования стоячей волны [31] $L = k\lambda/2$. Здесь L – геометрический размер резонатора, λ – длина волны, k – номер резонанса, соответственно при $k = 1$ длина волны соответствует первому (основному) резонансу.

В таблице приведены геометрические параметры резонаторов, рассчитанные из условия образования стоячей волны, для случая распространения сигнала акустической эмиссии как в виде продольного волнового пакета, так и поперечного. Особенность распространения исходного пакета в виде продольной волны заключается в трансформации в пакет поперечных волн при падении

на границу раздела под критическим углом и перераспределении колебательной энергии между ними [31, 32].

Размер акустического резонатора

Номер резонанса	Частота, Гц	L , мм, продольная волна, $n = 1, V = 6420$ м/с [31]	L , мм, сдвиговая волна, $n = 1, V = 3040$ м/с [31]	L , мм, сдвиговая волна, $n = 1, V = 2530$ м/с [32]
1.1	13531	237.0	112.3	187.0
1.2	18420	174.0	82.5	137.4
1.3	20214	158.8	75.2	125.2
1.4	22045	145.6	68.9	114.8
1.5	23016	139.5	66.0	110.0
1.6	25284	127.0	60.1	100.1
1.7	27557	116.5	55.2	91.8
1.8	28417	113.0	53.5	89.0
1.9	29132	110.0	52.2	86.8
1.10	30303	105.9	50.2	83.5
2.1	40777	78.7	37.3	62.0
2.2	43634	73.6	34.8	58.0
2.3	45703	70.0	33.3	55.4
2.4	47515	67.6	32.0	53.2
	67382	47.6	22.6	37.5
3.1	78717	40.8	19.3	32.1
3.2	81280	39.5	18.7	31.1
3.3	84576	38.0	18.0	30.0
3.4	85382	37.6	17.8	29.6
3.5	86444	37.1	17.6	29.3

Примечание. Выделены резонансы, для которых размер резонаторов близок к размеру области локализации деформации.

Таким образом, наблюдаемое множество резонансов обусловлено, по-видимому, резонансами продольных и поперечных волн, а при высокой плотности первичных акустических сигналов также на соответствующих кратных частотах. Из данных таблицы и рис. 2 и 3 следует, что наблюдаются три резонансные области в соответствии с конфигурацией системы «образец – волновод». Среди представленного многообразия резонансов нас интересуют, в первую очередь, резонансы на концентраторе деформации длиной 30 мм и диаметром 4 мм, так как остальная часть волновода не деформируется. Такие резонансы наблюдаются как на продольных, так и на поперечных волнах в диапазоне частот 78–86 кГц. Характерно, что в спектре сигналов при монотонном накоплении деформации (область 1 на рис. 1, б) фактически не сформированы резонансы в этом частотном диапазоне, что свидетельствует о низкой корреляции акустических сигналов. Таким образом, при скачкообразном накоплении деформации в резонаторе, представляющем собой область локализации деформации, накапливается заметная энергия колебаний стоячих волн.

Следует заметить, что классические представления о механизме формирования стоячей волны требуют наложения прямой и отраженной бегущих волн [33]. В рассматриваемом случае волны представляют собой волновые пакеты, а в этой связи стоячая волна может быть сформирована на короткое время, если плотность потока сигналов акустической эмиссии низкая. Если же плотность потока сигналов велика, то стоячая волна может представлять собой достаточно устойчивое состояние колебательной системы.

Стоячие волны в условиях слабоустойчивого состояния кристаллической решетки как фактор самоорганизации элементарных деформационных актов

Материал в слабоустойчивом состоянии кристаллической решетки [2, 6–27] будем понимать, как и в [5], как активную среду. То есть при пластическом течении кристаллическая решетка представляет собой колебательную систему, возбужденную в режиме стоячей волны, а активация элементарного деформационного акта есть результат действия как тепловых флуктуаций [34], так и акустических колебаний. Так как стоячая волна имеет макроскопический масштаб, то и активация элементарных деформационных актов осуществляется в макроскопическом масштабе в некоторой совокупности плоскостей скольжения, благоприятно ориентированных по отношению к колебательным смещениям стоячей волны. В условиях слабоустойчивого состояния кристаллической решетки колебательные смещения активируют элементарные сдвиги, которые представляют собой коррелированный макроскопический ансамбль элементарных деформационных актов, формирующих макроскопический скачок деформации. Таким образом, стоячая акустическая волна определяет макроскопический масштаб корреляции элементарных деформационных сдвигов. В то же время стоячая волна, естественно, определяет и область локализации деформации, которая представлена в [35] как область концентрации источников акустической эмиссии.

В свою очередь, коррелированный ансамбль элементарных деформационных актов формирует единичный акустический сигнал, являющийся результатом интерференции некоторого множества элементарных акустических сигналов, удовлетворяющих условию когерентности. В этой связи система оказывается жестко синхронизированной как в отношении элементарных деформационных актов, так и в отношении формируемых акустических сигналов.

Заключение

В слабоустойчивой кристаллической среде колебания стоячей волны активируют элементарные деформационные сдвиги в некотором объеме, связанном с длиной стоячей волны, определяющей макроскопический масштаб корреляции. В то же время коррелированные деформационные сдвиги генерируют акустические сигналы, отвечающие условию когерентности, в результате интерференции которых формируется единичный акустический сигнал аномально высокой амплитуды. Проведенный анализ низкочастотного спектра акустической эмиссии при высокотемпературной пластической деформации алюминия свидетельствует, что его дискретный вид обусловлен перераспределением колебательной энергии первичного акустического сигнала по резонансным колебаниям стоячих волн резонаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров С.В., Плотников В.А., Потехаев А.И. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 3. – С. 47–54.
2. Макаров С.В., Плотников В.А., Потехаев А.И. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 6. – С. 23–30.
3. Плотников В.А., Макаров С.В. // ФММ. – 2008. – Т. 105. – № 4. – С. 424–430.
4. Бовенко В.Н. // Изв. АН СССР. Металлы. – 1984. – № 1. – С. 129–137.
5. Бовенко В.Н. // Известия АН СССР. Сер. физич. – 1986. – Т. 50. – № 3. – С. 509–512.
6. Потехаев А.И., Кулагина В.В. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 8. – С. 5–22.
7. Потехаев А.И., Кулагина В.В., Старостенков М.Д., Клопотов А.А. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 4. – С. 11–18.
8. Потехаев А.И., Кулагина В.В., Чаплыгина А.А. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 11. – С. 7–16.
9. Потехаев А.И., Кулагина В.В., Чаплыгина А.А. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 7. – С. 78–87.
10. Дмитриев С.В., Баимова Ю.А., Потехаев А.И. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 2. – С. 60–69.
11. Клопотов А.А., Козлов Э.В., Потехаев А.И. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 9. – С. 59–69.
12. Потехаев А.И., Старостенков М.Д., Медведев Н.Н. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 11. – С. 61–67.
13. Старостенков М.Д., Потехаев А.И., Сеница Н.В. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – № 2. – Т. 54. – С. 41–48.
14. Старостенков М.Д., Маркидонов А.В., Тихонов Т.А. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 3. – С. 42–46.
15. Старостенков М.Д., Кулагина В.В., Потехаев А.И. и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2012. – Т. 8. – № 3. – С. 367–374.

16. Старостенков М.Д., Кулагина В.В., Потекаев А.И. и др. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2012. – Т. 8. – № 4. – С. 503–509.
17. Старостенков М.Д., Кулагина В.В., Потекаев А.И. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2011. – Т. 8. – № 4. – С. 65–70.
18. Старостенков М.Д., Кулагина В.В., Потекаев А.И. и др. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2011. – Т. 8. – № 4. – С. 117–124.
19. Старостенков М.Д., Кулагина В.В., Потекаев А.И. и др. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2012. – Т. 9. – № 1. – С. 57–66.
20. Старостенков М.Д., Кулагина В.В., Потекаев А.И. и др. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2012. – Т. 9. – № 3. – С. 367–374.
21. Старостенков М.Д., Кулагина В.В., Потекаев А.И. и др. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2012. – Т. 9. – № 4. – С. 503–509.
22. Кулагина В.В., Клопотов А.А., Потекаев А.И. и др. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2013. – Т. 10. – № 2. – С. 185–193.
23. Потекаев А.И., Бубенчиков М.А., Бубенчиков А.М. // *Изв. вузов. Физика*. – 2013. – Т. 56. – № 3. – С. 94–100.
24. Потекаев А.И., Кулагина В.В., Чаплыгина А.А. и др. // *Изв. вузов. Физика*. – 2013. – Т. 56. – № 6. – С. 14–22.
25. Потекаев А.И., Бубенчиков М.А., Бубенчиков А.М. // *Изв. вузов. Физика*. – 2013. – Т. 56. – № 7. – С. 57–61.
26. Потекаев А.И., Клопотов А.А., Иванов Ю.Ф. и др. // *Изв. вузов. Физика*. – 2013. – Т. 56. – № 8. – С. 60–65.
27. Потекаев А.И., Клопотов А.А., Морозов М.М. и др. // *Известия Томского политехнического университета*. – 2013. – Т. 322. – № 2. – С. 96–100.
28. Макаров С.В., Плотников В.А., Потекаев А.И. // *Изв. вузов. Физика*. – 2014. – Т. 57. – № 4. – С. 14–18.
29. Регистратор данных АЦП (dotScope): свид. гос. рег. прогр. ЭВМ № 2008612034 / В. А. Плотников, А. С. Грязнов; заявитель и правообладатель Алтайский государственный университет. – № 2008610809. Заявл. 28.02.08. Оpubл. 23.04.2008.
30. Марпл. -мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
31. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. – М.: ИЛ, 1957. – 726 с.
32. Зуев Л.Б., Семухин Б.С., Бушмелева К.И. // *ЖТФ*. – 2000. – Т. 70. – № 1. – С. 52–56.
33. Исакович М.А. Общая акустика. – М.: Наука, 1973. – 496 с.
34. Слуцкер А.И. // *ФТТ*. – 2004. – Т. 46. – № 9. – С. 1606–1613.
35. Никитин Е.С., Семухин Б.С., Зуев Л.Б. // *Письма в ЖТФ*. – 2008. – Т. 34. – № 15. – С. 70–74.

*Алтайский государственный университет, г. Барнаул, Россия

Поступила в редакцию 03.03.14.

**Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова

Томского государственного университета, г. Томск, Россия

***Национальный исследовательский Томский государственный университет

г. Томск, Россия

E-mail: plotnikov@phys.asu.ru; potekaev@spti.tsu.ru

Макаров Сергей Викторович, к.ф.-м.н., доцент каф. общей и экспериментальной физики;

Плотников Владимир Александрович, д.ф.-м.н., профессор, зав. каф. общей и экспериментальной физики;

Потекаев Александр Иванович, д.ф.-м.н., профессор, директор СФТИ, профессор ТГУ.