

Лазерная визуализация тепловых процессов в прозрачных твердых телах

Б.С. Ринкевичюс, И.Н. Павлов, И.Л. Расковская, А.В. Толкачев
rinkevbs@mail.ru|inpavlov@bk.ru|raskovskail@mail.ru|avtolk2008@yandex.ru
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Россия

Экспериментально визуализированы поля температуры в слое полиметилметакрилата и исследована их динамика при неоднородном нагреве и остывании образца.

Ключевые слова: рефракция, визуализация температурных полей, оптически неоднородная среда, структурированные лазерные пучки, неоднородный нагрев твердого тела.

Laser visualization of thermal processes in transparent solid bodies

B.S. Rinkevichyus, I.N. Pavlov, I.L. Raskovskaya, A.V. Tolkachev
rinkevbs@mail.ru|inpavlov@bk.ru|raskovskail@mail.ru|avtolk2008@yandex.ru
National Research University "MPEI", Moscow, Russia

The fields of temperature in a piece of polymethylmethacrylate are experimentally visualized and its dynamics is shown upon inhomogeneous heating and cooling of a sample.

Keywords: refraction, visualization of temperature fields, optically inhomogeneous medium, structured laser radiation, inhomogeneous heating of a solid body.

1. Введение

В работах [1–6, 8–14] были представлены методики экспериментальной визуализации и восстановления полей температуры и других физических параметров в жидкости, основанные на регистрации рефрактограмм лазерных пучков. В статье [7] указанные методики были адаптированы для восстановления температуры в неоднородно нагретом слое прозрачного твердого тела и обобщены для исследования двумерной неоднородности при использовании для зондирования точечно-структурированного лазерного излучения.

Как хорошо известно, в настоящее время широко распространены компьютерные методы визуализации различных физических процессов, как в жидкостях, так и в твердых телах. Однако следует обратить внимание, что при компьютерном моделировании не всегда могут быть учтены все факторы, влияющие на физический процесс. Например, в (9) авторами было показано, что даже простейшая задача обтекания металлического нагретого шара, помещенного в холодную воду не позволяет учесть появление термиков сверху шара, которые хорошо визуализируются с помощью методов лазерной рефрактографии (1).

В данной работе экспериментально визуализированы поля температуры в слое полиметилметакрилата (оргстекла) и исследована их динамика при неоднородном нагреве и остывании.

2. Экспериментальная установка и методика измерений

Объектом исследований являлся прямоугольный элемент из органического стекла с размерами: ширина 153 мм, высота 140 мм и толщина 25 мм. На верхней грани элемента по центру располагался прямоугольный сосуд из тонкостенного алюминия толщиной 0,5 мм с внутренними размерами 26 × 38 × 74,6 мм. Ребра нижней грани имели радиус закругления 1 мм. В данный сосуд при проведении эксперимента заливалось 52 мл горячей воды. На рис. 1 показан внешний вид элемента из оргстекла и алюминиевого сосуда, расположенного на верхней грани

элемента. Фотографирование проводилось сверху под небольшим углом. Для обеспечения надежного теплового контакта между дном сосуда и поверхностью элемента из оргстекла была нанесена теплопроводная паста (кремнийорганическая) марки КПТ-8.

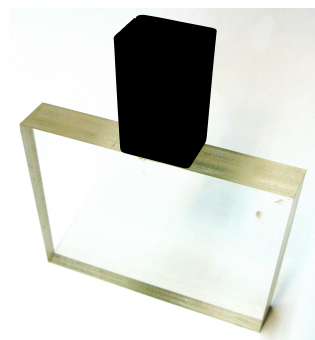


Рис. 1. Внешний вид элемента из оргстекла и алюминиевого сосуда, расположенного на верхней грани элемента.

В качестве источника излучения был применен маломощный (5 мВт) твердотельный лазер с диодной накачкой, работающий на длине волны $\lambda = 532$ нм (зеленый цвет). Лазерный пучок направлялся на дифракционный оптический элемент (ДОО), на выходе которого формировалась система расходящихся лазерных пучков. В поперечном сечении данной системы лазерных пучков получалась сетка с числом пучков 20×20 , расположенных равномерно по сечению. Для того, чтобы сформировать систему параллельных лазерных пучков, использовалась длиннофокусная сферическая линза с фокусным расстоянием 260 мм и световым диаметром 75 мм. За счет подбора расстояния между ДОО и этой линзой обеспечивалась параллельность системы лазерных пучков после данной линзы. На рис. 2 показаны элементы экспериментальной установки.

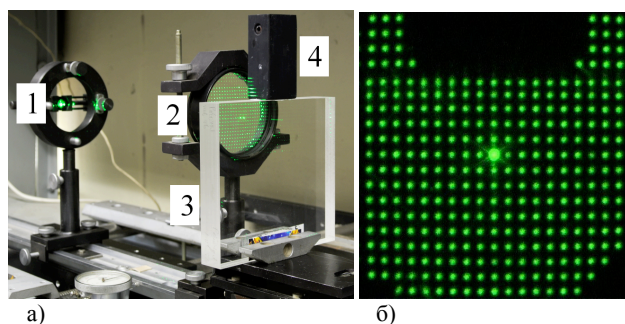


Рис. 2. а) – элементы экспериментальной установки:
1 – источник структурированного лазерного излучения,
2 – объектив, 3 – пластина из оргстекла, 4 –
алюминиевый сосуд,
б) – вид матового экрана для холодной пластины.

Система параллельных лазерных пучков использовалась для зондирования области в органическом стекле под алюминиевым сосудом с горячей водой.

На расстоянии 317 мм от задней поверхности элемента из оргстекла располагался матовый экран, на котором наблюдалось изменение во времени соответствующих рефрактограмм (по мере нагрева и остывания пограничного слоя оргстекла). За экраном была установлена цветная цифровая видеокамера для регистрации рефрактограмм.

Методика проведения эксперимента состояла в следующем:

- осуществлялась юстировка оптической системы экспериментальной установки;
- на экране видеокамеры (на мониторе, сопряженного с ней персонального компьютера) наблюдалась неискаженная точечная рефрактограмма;
- видеокамера включалась на «ЗАПИСЬ»;
- в алюминиевый сосуд заливалась горячая вода;
- видеокамера регистрировала изменение рефрактограмм во времени по мере остывания воды в алюминиевом сосуде (запись велась примерно 9 минут).

На рис. 2б) показан внешний вид отдельных элементов экспериментальной установки. На рис. 2а) показаны: дифракционный оптический элемент (ДОО), длиннофокусная линза, преобразующая расходящуюся после ДОО систему лазерных пучков в параллельную. За линзой расположен элемент из органического стекла с закрепленным на верхней его грани алюминиевым сосудом, наполненным холодной горячей водой. На рис. 2б) показан матовый экран с рефрактограммой, до проведения эксперимента (неискаженной нагревом верхней поверхности образца).

На рис. 3 приведена экспериментально полученная зависимость положения тонких пучков на экране, характеризующая остывание воды в алюминиевом сосуде, установленном на верхней поверхности элемента из органического стекла.

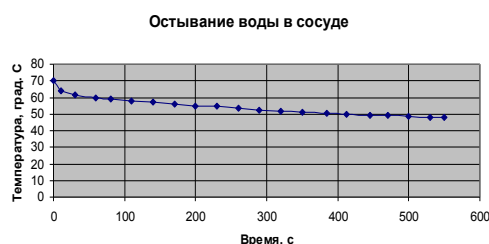


Рис. 3. Изменение температуры воды в алюминиевом сосуде, установленном на верхней поверхности элемента из органического стекла.

Перед проведением измерения температуры с помощью цифрового мультиметра с термопарой было проведено сравнение показаний ртутного термометра и системы мультиметр-термопара. Получено, что данные, измеренные мультиметром с термопарой, отличаются от показаний ртутного термометра не более, чем на $\pm 2\%$.

Для получения более полной информации о динамике прогрева верхней поверхности элемента из органического стекла этот процесс визуализировался прямым теневым методом при освещении исследуемой части элемента широким лазерным пучком.

С этой целью была смонтирована экспериментальная установка, в которой источником излучения являлся лазер с параметрами: мощность излучения 100 мВт; длина волны излучения 532 нм. С помощью микрообъектива с увеличением $\times 20$ формировался расходящийся в пространстве лазерный пучок.

Прямые теневые картины на матовом экране регистрировались цветной цифровой видеокамерой и их примеры показаны на рис. 4.

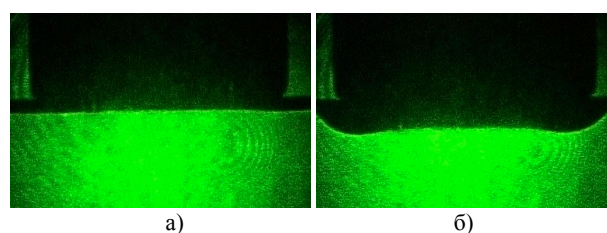


Рис. 4. Прямотеневые изображения зоны нагрева оргстекла: а) вид образца без нагрева в начальный момент времени $t = 0$ с; б) вид образца при температуре поверхности 58°C и времени нагрева $t = 120$ с.

Как следует из рис. 4, прямотеневые изображения являются малоинформативными с точки зрения количественной диагностики градиента температуры и зависящего от него градиента показателя преломления. Для получения количественной информации в этом случае требуется измерение распределения интенсивности в прошедшем пучке.

Использование структурированного лазерного излучения позволяет проводить количественную диагностику оптических неоднородностей на основе измерения смещения структурных элементов пучка, в данном случае «точек», отображающихся в сечении точно-структурированного пучка. На рис. 5а и 5б крупным планом показаны области рефрактограмм, соответствующая максимальным градиентам температуры. Под каждым рисунком указано время с момента заполнения сосуда горячей водой и температура воды на указанный момент времени.

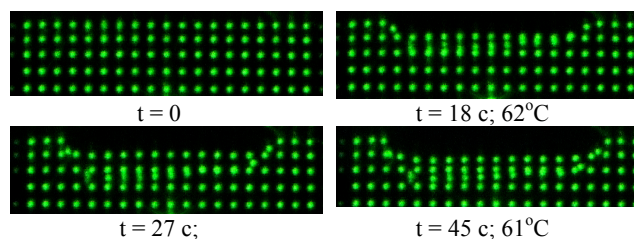


Рис.5а. Экспериментальные рефрактограммы точечного СЛИ.

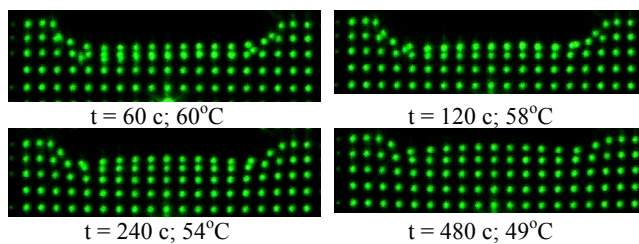


Рис. 5.6. Экспериментальные рефрактограммы точечного СЛИ, показанные крупным планом.

Приведен участок сечения СЛИ, деформированный из-за наличия температурного градиента в верхней части образца.

В рассматриваемой задаче температурное поле можно считать двумерным, так как градиент температуры в направлении перпендикулярном поверхности образца превышает градиенты температуры в других направлениях. Это означает, что в данных экспериментах имеет место слоистая неоднородность распределения температуры в исследуемом образце.

Для восстановления распределения температуры в пограничном слое оргстекла используется известное [7] соотношение, связывающее температуру T и показатель преломления n в оргстекле:

$$T(x, y) = T_0 + (n_0 - n(x, y)) / \alpha, \quad (1)$$

где коэффициент $\alpha = 0,00015$, n_0 - показатель преломления оргстекла при температуре T_0 . Зависимость показателя преломления $n(x, y)$ от вертикальной координаты x и горизонтальной координаты y может быть найдена в результате решения обратной задачи рефракции на основе метода минимизации целевой функции. В качестве целевой функции принимается среднеквадратичное отклонение элементов расчетной рефрактограммы от элементов оцифрованной экспериментальной рефрактограммы. Расчет рефрактограммы проводится на основе параметрической модели поля показателя преломления вида:

$$n(x, y) = n_0 + \frac{(n_1(1 + ky) - n_0)}{2} (1 + th(\frac{x - x_0}{h + ay})) (\sigma(y - b_1) - \sigma(y - b_2)) \quad (2)$$

где x , y - вертикальная и горизонтальная координаты, соответственно, параметр n_1 характеризует величину градиента в нагретом слое, h - характерную толщину слоя, x_0 задает положение слоя на оси x , параметры k и a характеризуют неоднородность слоя вдоль y , b_1 и b_2 задают границы слоя, наличие которых обусловлено конечными размерами сосуда и его положением, σ -сигма функция. Искомыми являются параметры модели, соответствующие минимуму целевой функции. Для описания измеренного распределения показателя преломления используется формула (2) с найденными параметрами. Однозначность решения обратной задачи для монотонных неоднородностей вида (2) обоснована в [1]. На рис. 6 показаны расчетные рефрактограммы, наилучшим образом, по выбранному критерию, соответствующие экспериментальным. Некоторое их отличие от экспериментальных объясняется тем, что при построении расчетных рефрактограмм не учитывались эффекты, обусловленные закруглением краев сосуда.

Рис. 7 демонстрирует восстановленное распределение температуры в слое в зависимости от времени. Наблюдается некоторая асимметрия распределения температуры вдоль горизонтальной оси, обусловленная, вероятно, неравномерным заполнением сосуда горячей водой в начальный момент времени. С течением времени эта температура дна сосуда выравнивается, и асимметрия

исчезает. Градиент температуры по вертикальной оси много больше, чем по горизонтальной.

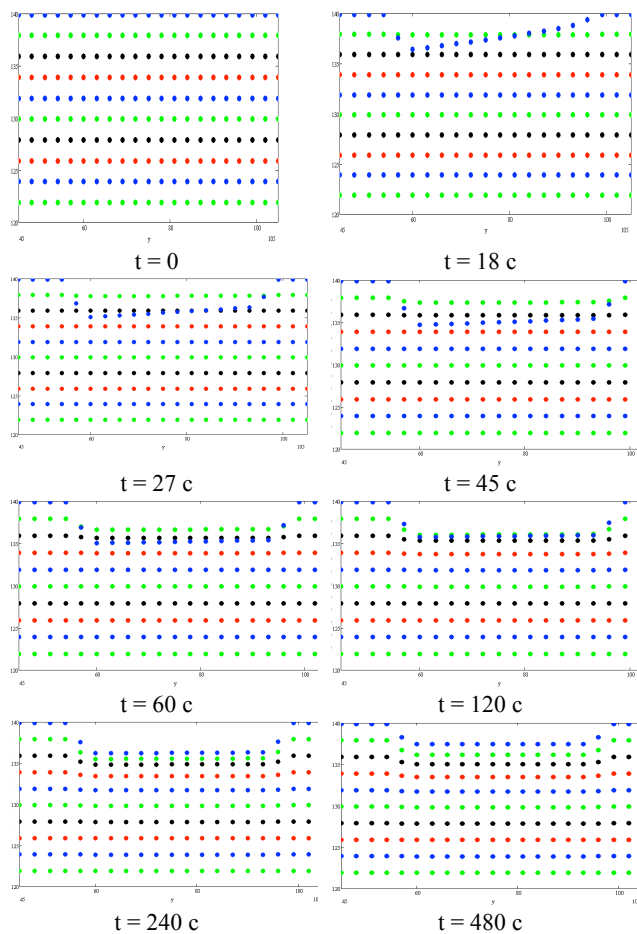


Рис. 6. Расчетные рефрактограммы, соответствующие экспериментальным.

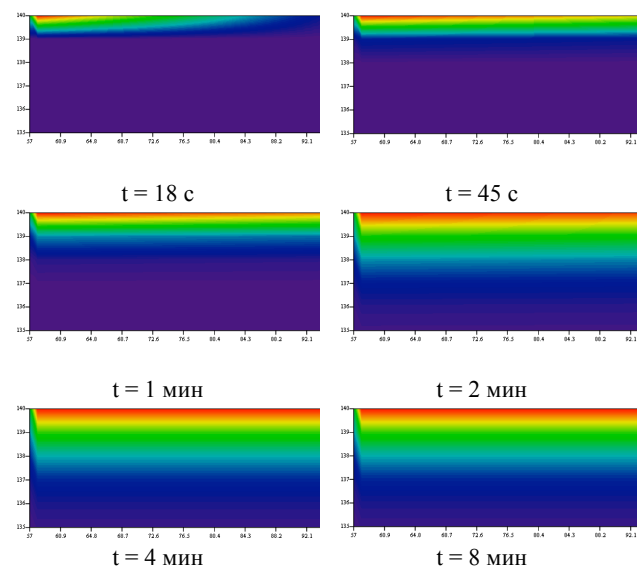


Рис. 7. Восстановленное распределение температуры в нагретом слое.

Зависимость от времени характерной толщины слоя и максимальной температуры в выбранном сечении показаны на рис. 8. Из рис. 8а следует, что с течением времени происходит рост толщины слоя, который постепенно

замедляется и фактически прекращается, а затем, как следует из рис. 8б, начинается остывание слоя.

Зависимость от времени характерной толщины слоя и максимальной температуры в выбранном сечении показаны на рис. 8. Из рис. 8а следует, что с течением времени происходит рост толщины слоя, который постепенно замедляется и фактически прекращается, а затем, как следует из рис. 8б, начинается остывание слоя.

Зависимость от времени характерной толщины слоя и максимальной температуры в выбранном сечении показаны на рис. 8. Из рис. 8а следует, что с течением времени происходит рост толщины слоя, который постепенно замедляется и фактически прекращается, а затем, как следует из рис. 8б, начинается остывание слоя.

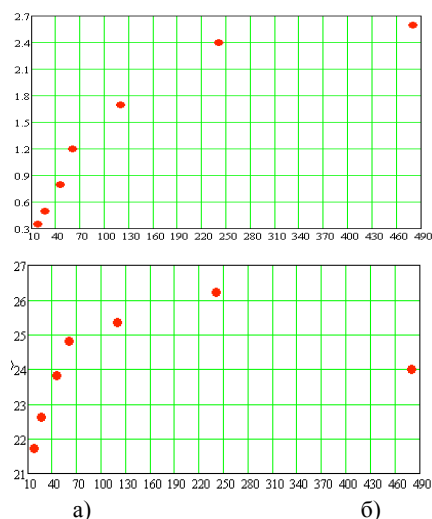


Рис. 8. Изменение характерной толщины (а) нагретого слоя оргстекла и температуры (б) в сечении $x=140$ мм в зависимости от времени наблюдения.

На рис. 9 показаны примеры восстановленных распределений температуры в одном из вертикальных сечений ($y=60$ мм) нагретого слоя оргстекла для различных моментов времени.

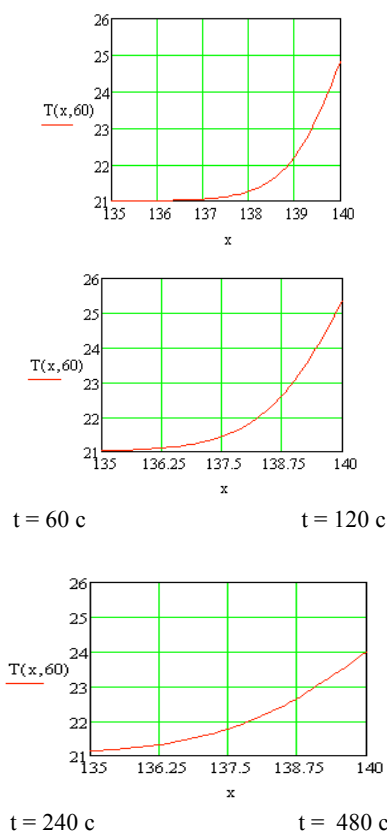
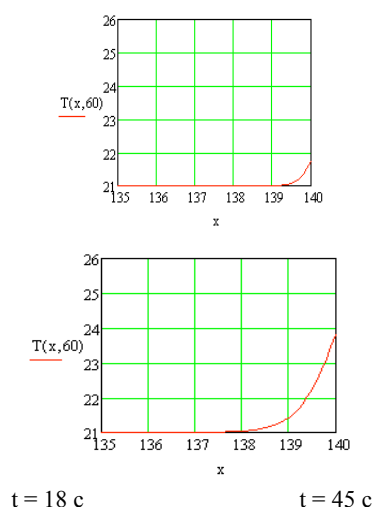


Рис. 9. Восстановленное распределение температуры в одном из вертикальных сечений ($y=60$ мм) нагретого слоя оргстекла.

3. Заключение

Разработана экспериментальная методика визуализации и количественной диагностики оптических неоднородностей в твердых телах на основе рефракции структурированного лазерного излучения. Методика реализована для случая неоднородного нагрева и остывания оргстекла. Визуализированы двумерные распределения температуры в контактирующем с горячим телом слое оргстекла и исследованы временные зависимости характеристик нагреваемого слоя.

4. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № 14-08-00948а).

5. Литература

- [1] Evtikhieva O.A., Rinkevichyus B.S., Raskovskaya I.L., Laser Refractography. Springer, New York, 2010.
- [2] Grechikhin V.A., Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S. Influence of the acousto-optic effect on measurement error of particle vibration velocity in using the laser doppler anemometer. //Автометрия. 2000. № 5. С. 92-101.
- [3] Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S., Tolkachev A.V. Structured beams in laser refractography applications // In The book Laser Beams: Theory, Properties and Applications 2011. Pp. 399-413.
- [4] Rinkevichyus B. S. Optical refractography: principles and applications. // In: The 2013 International Doctoral Forum

- of Electronic Science and Technology. Beijing, China, 9-13 July, 2013, 2013. Pp. 25 – 32.
- [5] Расковская И.Л. Волновая модель рефракции лазерных пучков с дискретным изменением интенсивности по поперечному сечению и их применение для диагностики протяженных нестационарных фазовых объектов. // Квантовая электроника. 2015. 45, № 8. С.765-770.
- [6] Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В. Лазерный рефракционный метод визуализации и количественной диагностики диффузионного слоя жидкости при наличии внутренних волн // Научная визуализация. 2015. Т. 7. № 4. С. 76-86.
- [7] Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В. Лазерная рефракционная термометрия прозрачных твердых тел при неоднородном нагреве // Измерительная техника, 2016, №10, С.42-44.
- [8] Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В., Ширинская Е.С. Рефракция цилиндрического лазерного пучка в температурном пограничном слое. // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 106. № 6. С. 992-997.
- [9] Ринкевичюс Б.С., Ведяшкина А.В., Расковская И.Л., Толкачев А.В., Пудовиков Д.Е. 3d-визуализация и количественная диагностика процессов тепло-и массообмена с помощью метода лазерной рефрактографии. В сборнике: ГРАФИКОН'2016, Труды 26-й Международной научной конференции. 2016. С. 156-160.
- [10] Ринкевичюс Б.С., Есин М.В., Расковская И.Л., Толкачев А.В. Способ визуализации и измерения параметров физических процессов в жидкой среде. Патент на полезную модель RUS 105433 30.11.2010.
- [11] Павлов И.Н., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В. Установка для визуализации испарения капли жидкости методом нарушенного полного внутреннего отражения лазерного пучка // Приборы и техника эксперимента, 2013, № 2. С. 130–135.
- [12] Павлов И.Н., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В. Визуализация процессов кристаллизации в пристеночном слое капли воды // Метрология, 2013. №3. С. 11-17.
- [13] И.Н. Павлов, И.Л. Расковская, А.В. Толкачев, Структура микрорельефа поверхности испаряющейся с шероховатой подложки капли как возможная причина гистерезиса краевого угла, ЖЭТФ, 2017, Т. 151, №4, 670–681.
- [14] Павлов И.Н., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Восстановление профиля поверхности капли жидкости на основе послыного лазерного зондирования // ПЖТФ, 2017, Т. 43, № 13, С.19-25.

Об авторах

Ринкевичюс Бронюс Симович, д.ф.-м.н., профессор кафедры физики им. В.А. Фабриканта НИУ «МЭИ». E-mail: rinkevbs@mail.ru.

Павлов Илья Николаевич, к.т.н., доцент кафедры физики им. В.А. Фабриканта НИУ «МЭИ». E-mail: inpavlov@bk.ru.

Расковская Ирина Львовна, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики им. В.А. Фабриканта НИУ «МЭИ». E-mail: raskovskail@mail.ru.

Толкачев Александр Владимирович, к.т.н., доцент кафедры физики им. В.А. Фабриканта НИУ «МЭИ». E-mail: avtolk2008@yandex.ru.