

*Тринадцатая Международная научно-техническая конференция  
«Оптические методы исследования потоков»  
Москва, 29 июня— 03 июля 2015 г.*

УДК 535.31:681.7.001

И.Л. Расковская, Б.С. Ринкевичюс, А.В. Толкачев, Г.М. Янина

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,  
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: raskovskail@mail.ru*

**РЕФРАКТОМЕТРИЯ ПРОЗРАЧНЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ  
ПРИ НЕОДНОРОДНОМ НАГРЕВЕ**

**АННОТАЦИЯ**

Реализована методика восстановления температуры в слое оргстекла с двумерным градиентом температуры на основе рефракционных изображений структурированного лазерного излучения.

**РЕФРАКЦИЯ, ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНАЯ СРЕДА, СТРУКТУРИРОВАННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ПУЧКИ, НЕОДНОРОДНЫЙ НАГРЕВ ТВЕРДОГО ТЕЛА.**

**ВВЕДЕНИЕ**

В работах [1 – 2] была представлена методика восстановления поля температуры в неоднородно нагретой жидкости, основанная на регистрации рефракционных изображений (рефрактограмм) плоских и цилиндрических лазерных пучков. В данной работе указанная методика адаптируется для восстановления температуры в неоднородно нагретом слое прозрачного твердого тела и обобщается для исследования двумерной неоднородности, благодаря использованию для зондирования точно-структурированного лазерного излучения. Экспериментально реализовано измерение распределения температуры в слое оргстекла с двумерным градиентом температуры. Исследованы зависимости от времени характерной толщины слоя и его температуры при неоднородном нагреве и остывании.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ**

Объектом исследований являлся 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  $26 \times 38 \times 74,6$  мм. Ребра нижней грани имели радиус закругления 1 мм. В данный сосуд в ходе 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 некоторым углом.

Для обеспечения надежного теплового контакта между дном сосуда и поверхностью элемента из оргстекла была нанесена теплопроводная паста (кремнийорганическая) типа КПТ-8.

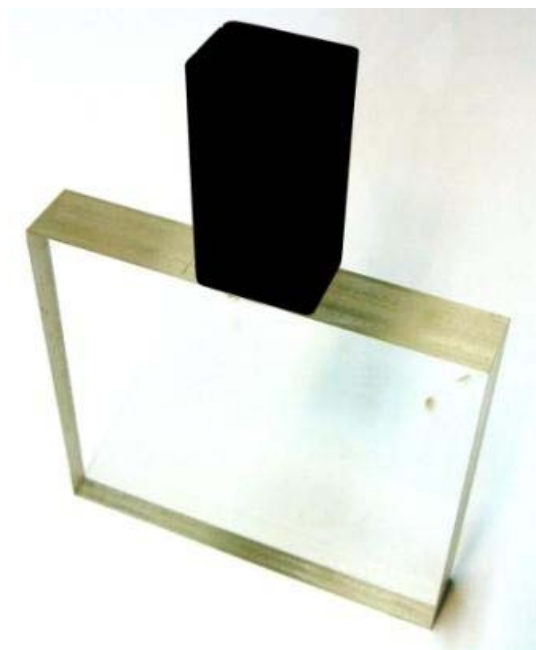


Рис. 1. Внешний вид и взаимное расположение элемента из органического стекла и алюминиевого сосуда для горячей воды

Основной особенностью выполненных экспериментов являлось применение в качестве зондирующего излучения системы параллельных лазерных пучков, образующей в сечении сетку ( $20 \times 20$  пучков). В качестве источника лазерного 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 (ДОЭ) фирмы «LASIRIS», на выходе которого формировалась система расходящихся лазерных пучков. В поперечном сечении данной системы лазерных пучков получалась сетка с числом пучков  $20 \times 20$ , 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 ДОЭ и этой линзой обеспечивалась параллельность системы лазерных пучков после данной линзы.

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 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).

Рис. 2 демонстрирует внешний вид отдельных элементов экспериментальной установки. На рис. 2, а показаны: дифракционный оптический элемент (ДОЭ), длиннофокусная линза, преобразующая расходящуюся после ДОЭ систему лазерных пучков в параллельную. За линзой расположен элемент из органического стекла с закрепленным на верхней его грани

алюминиевым сосудом с горячей водой. На рис. 2, б показан матовый экран с рефрактограммой, неискаженной нагревом верхней поверхности образца из органического стекла.

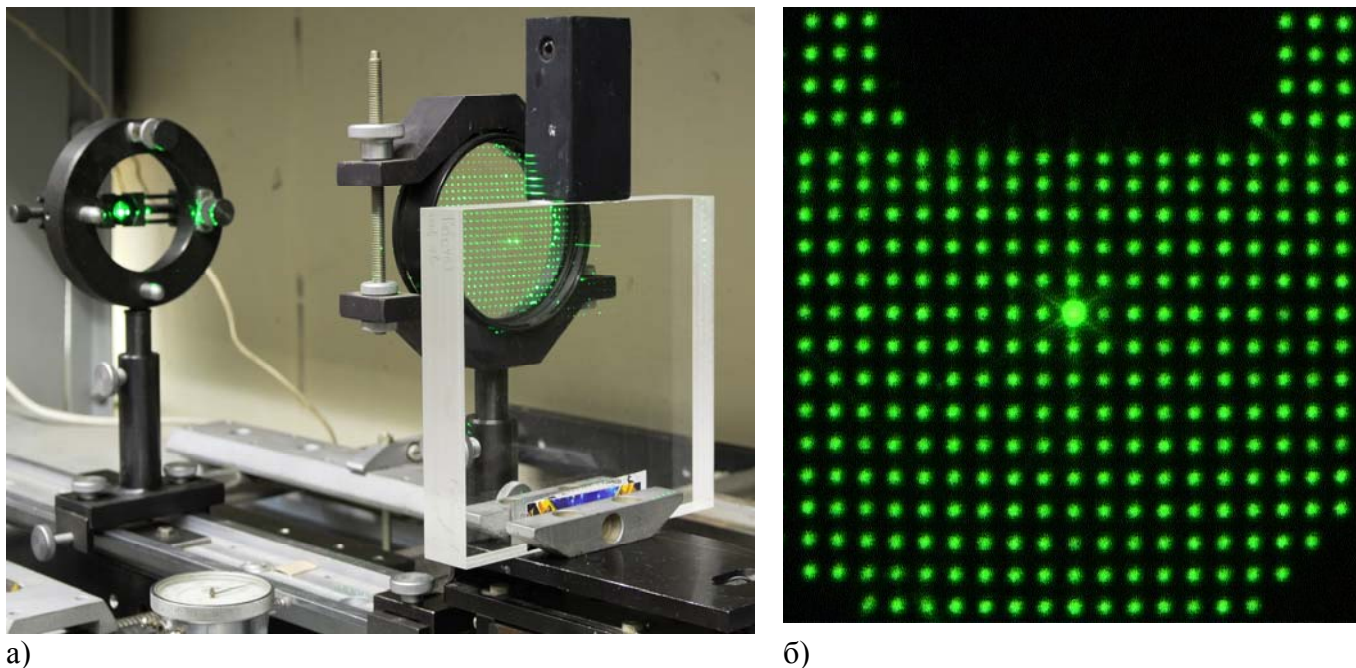


Рис. 2. Элементы экспериментальной установки

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

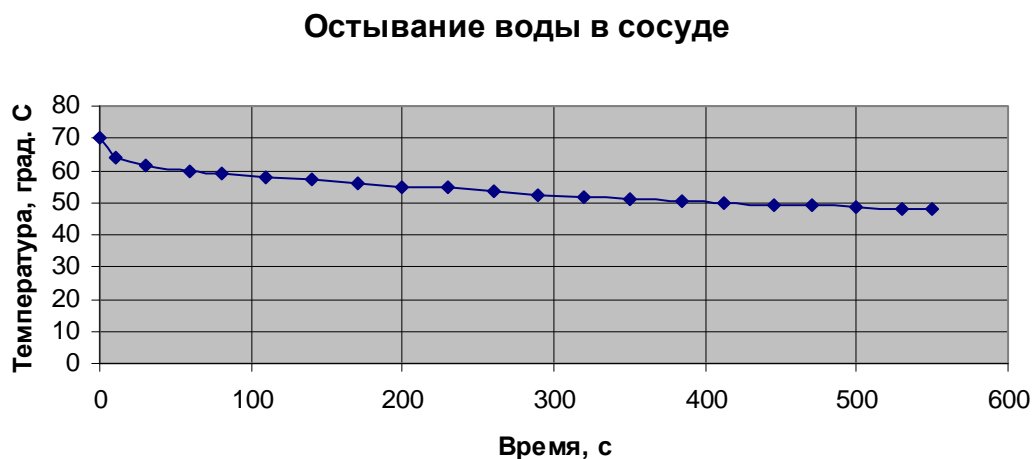


Рис. 3. Изменение температуры воды в алюминиевом сосуде, установленном на верхней поверхности элемента из органического стекла

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 20 формировался расходящийся в пространстве лазерный пучок. На этой стадии эксперимента пространственная фильтрация лазерного пучка с помощью микродиафрагмы не применялась. Для целей визуализации качество используемого лазерного пучка было достаточным.

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

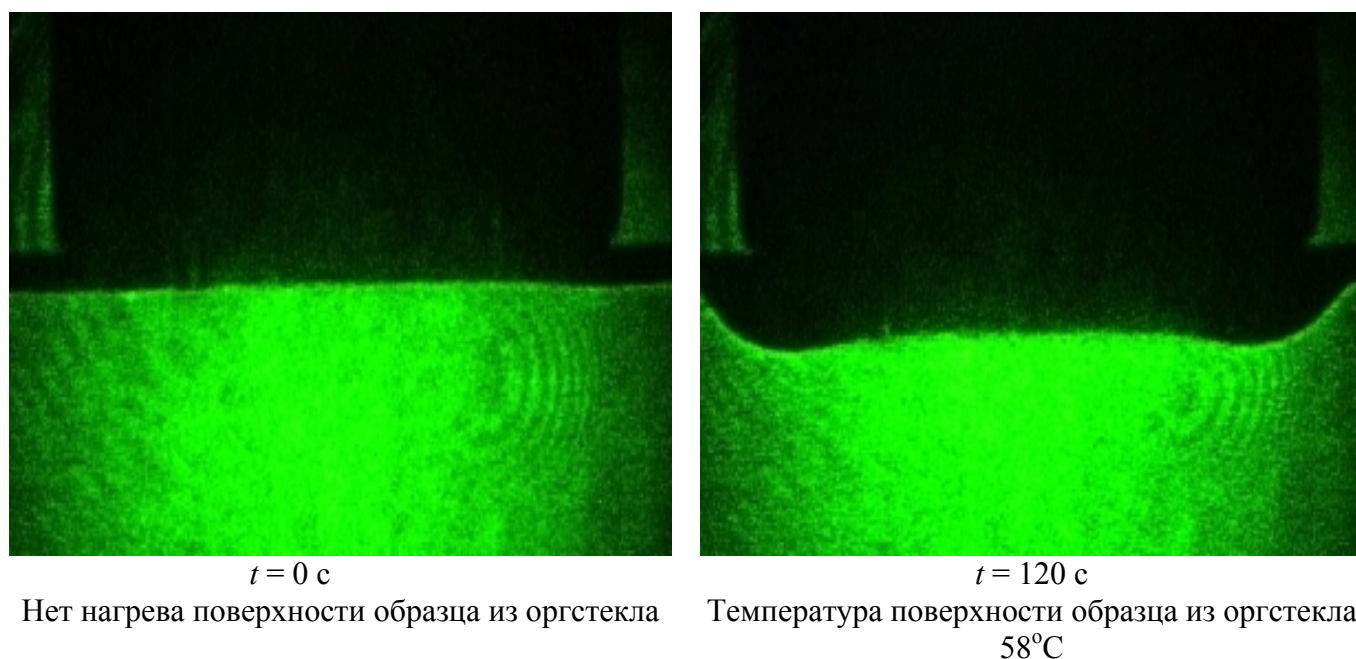


Рис. 4. Прямотеневые изображения зоны нагрева оргстекла

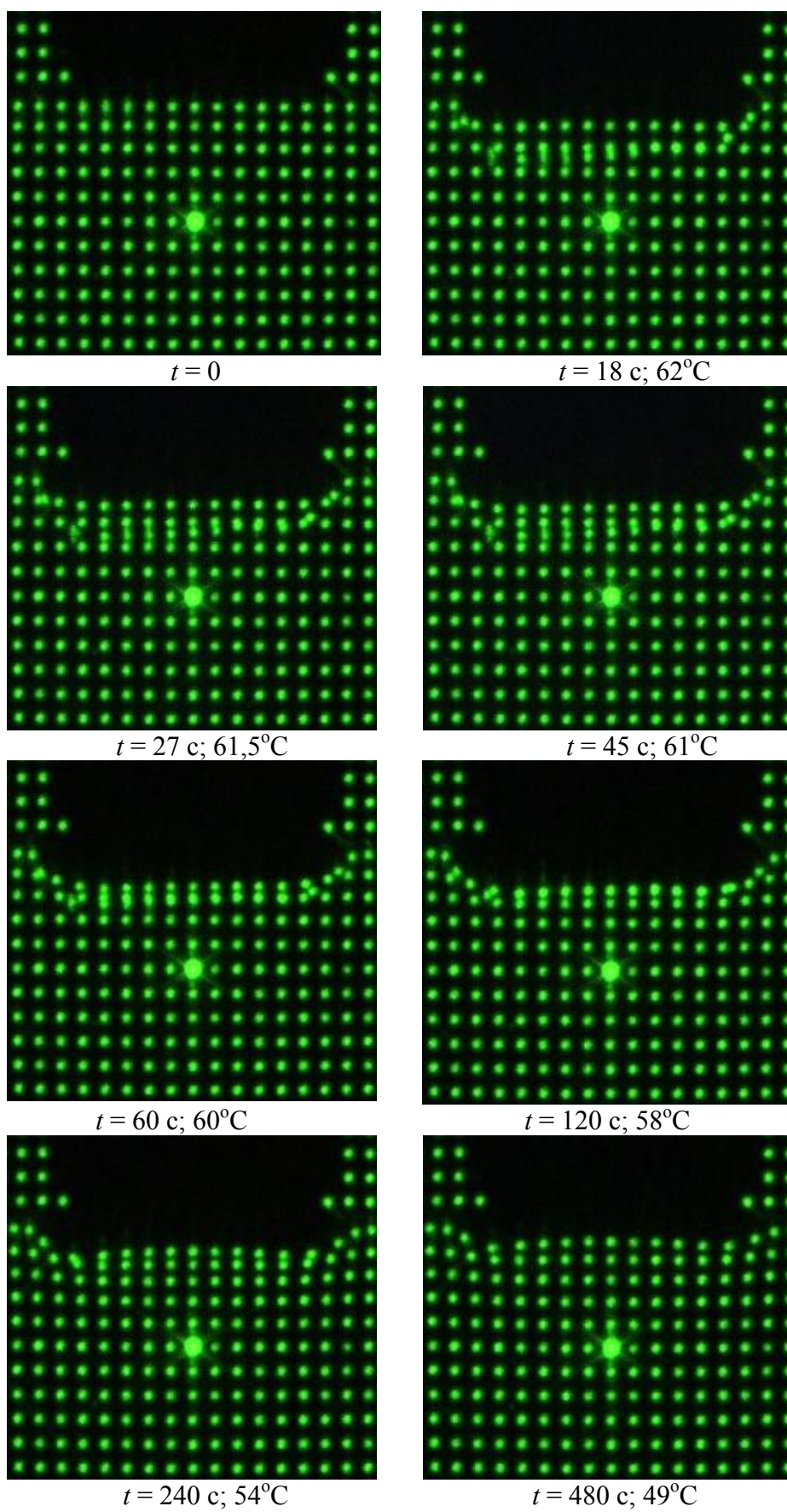
Как следует из рис. 4, прямотеневые изображения являются мало информативными с точки зрения количественной диагностики градиента температуры и зависящего от него градиента показателя преломления. Для получения количественной информации в этом случае требуется измерение распределения интенсивности в прошедшем 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 (рис. 5).

На рис. 5, а представлено видоизменение рефрактограмм по мере нагрева и остывания слоя оргстекла под алюминиевым сосудом с горячей водой. На рис. 5, б крупным планом показана область рефрактограммы, соответствующая максимальным градиентам температуры. Под каждым рисунком указано время с момента заполнения сосуда горячей водой и температура воды на указанный момент времени.

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

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



a)

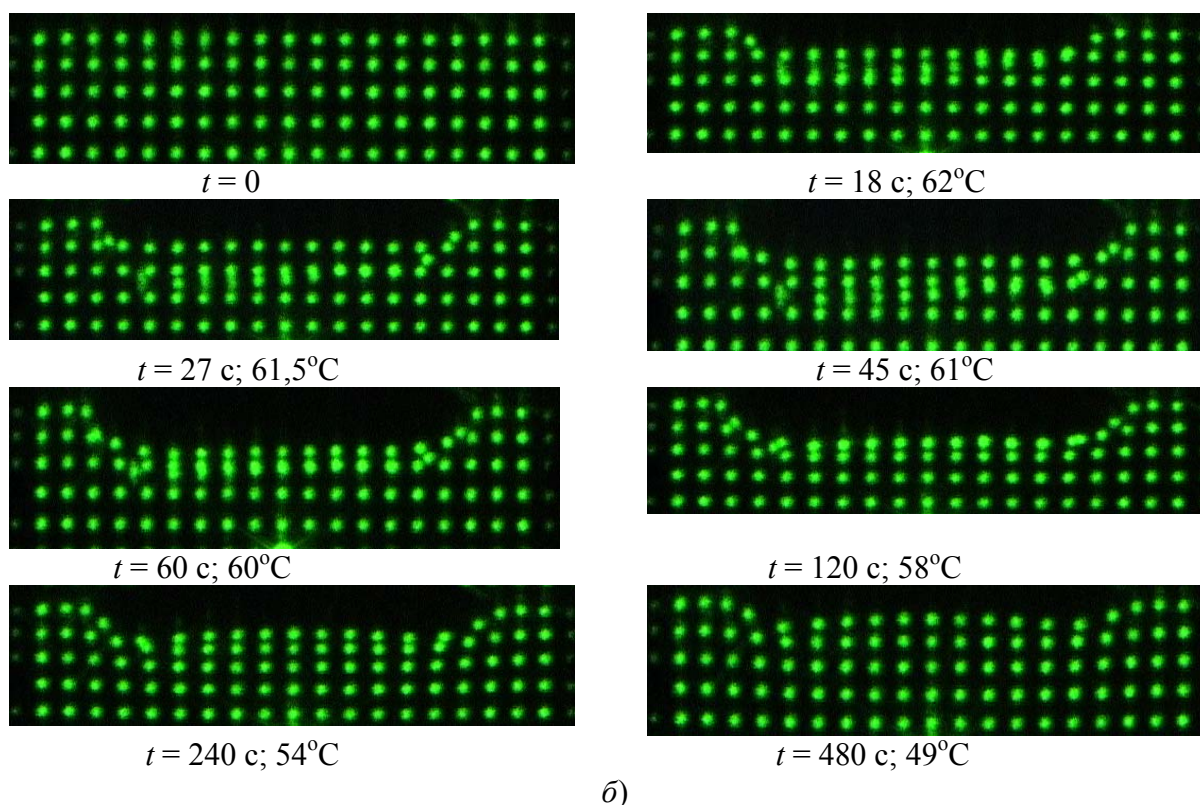


Рис. 5. Экспериментальные рефрактограммы точечного СЛИ, прошедшего через образец из органического стекла с температурным градиентом: а) общий вид сечения; б) — приведен участок сечения СЛИ, деформированный из-за наличия температурного градиента в верхней части образца из органического стекла

где коэффициент  $\alpha = 0,00015 \text{ K}^{-1}$ ,  $n_0$  – 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,  $\sigma$ -сигма функция.

Искомыми являются параметры модели, соответствующие минимуму целевой функции. Для описания измеренного распределения показателя преломления используется (2) с найденными параметрами. Однозначность решения обратной задачи для монотонных неоднородностей вида (2) обоснована в [3]. 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.

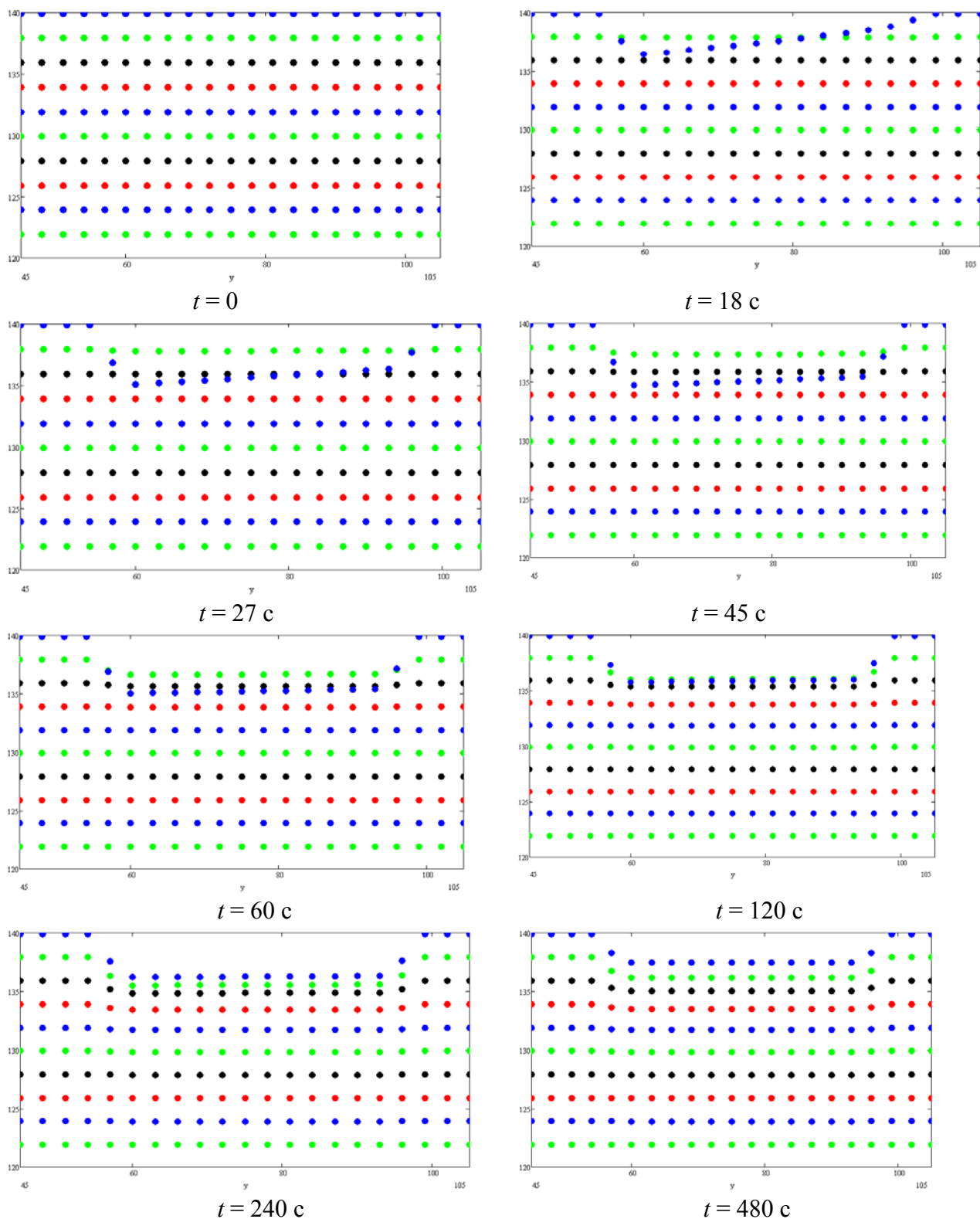


Рис. 6. Расчетные рефрактограммы, соответствующие экспериментальным на рис. 5, б

Рис. 7 демонстрирует восстановленное распределение температуры в слое в зависимости от времени наблюдения. 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. Зависимость от времени характерной толщины слоя и

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

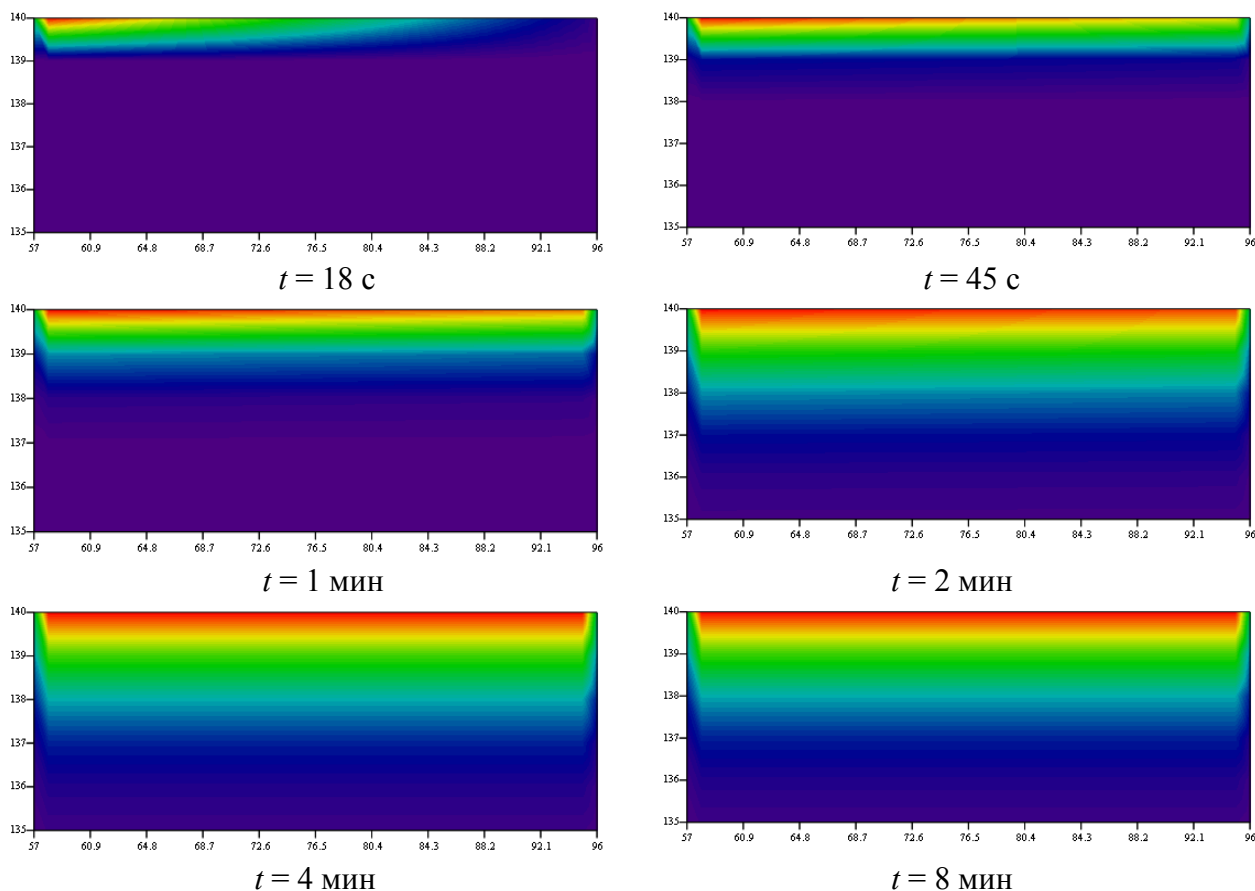
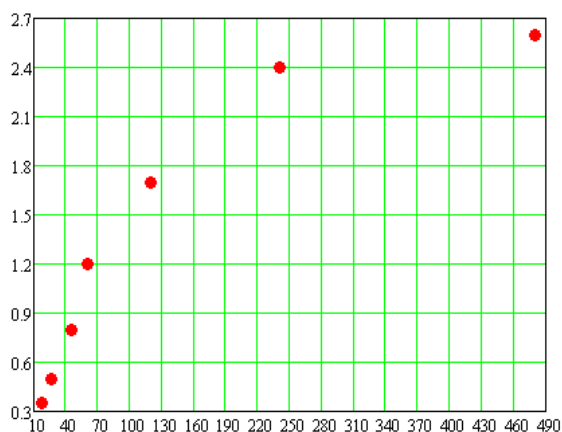
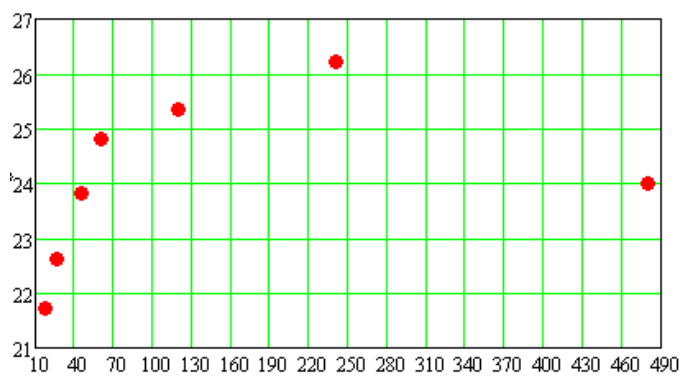


Рис. 7. Восстановленное распределение температуры в нагретом слое



а)



б)

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



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

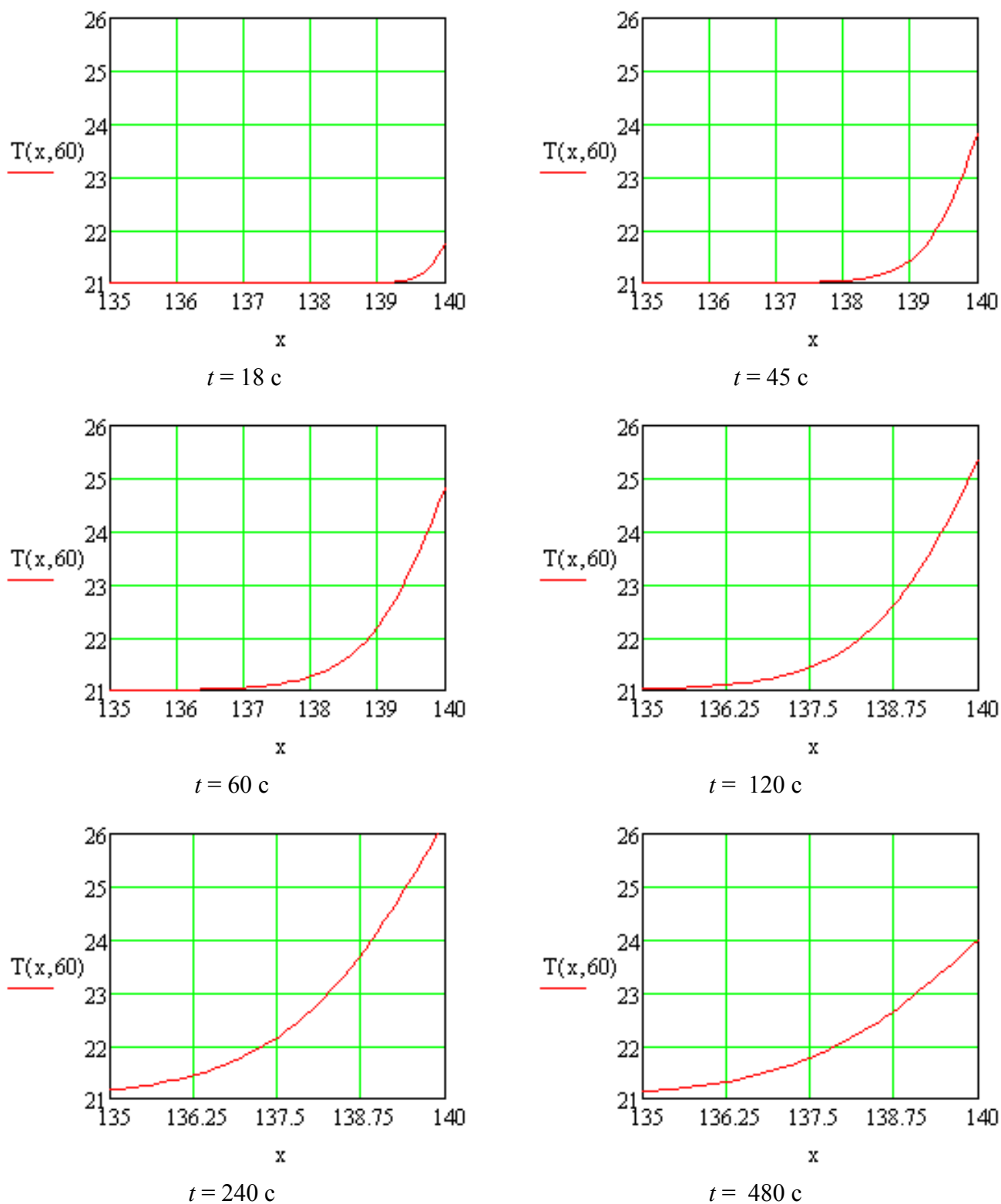


Рис. 9. Восстановленное распределение температуры в одном из вертикальных сечений ( $y = 60$  мм) нагретого слоя оргстекла

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработана экспериментальная методика количественной диагностики оптических неоднородностей в твердых телах на основе рефракции структурированного лазерного излучения. Методика реализована для случая неоднородного нагрева и остывания оргстекла. Получены двумерные распределения температуры в контактирующем с горячим телом слое оргстекла и значения характерной толщины пограничного слоя в зависимости от времени.

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-00948а).

## **СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ**

$T$  – температура (градусы Цельсия)

$t$  – время (с)

$n$  – показатель преломления

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Евтихиева О.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Лазерная рефрактография. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 176 с.
2. Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В. Лазерная рефрактография оптически неоднородных сред // Квантовая электроника, 2007. — № 12, с. 1176-1180.
3. Расковская И.Л. Лазерная рефракционная томография фазовых объектов / Квантовая электроника. 2013. 43, № 6. С.554-562

I.L. Raskovskaya, B.S. Rinkevichyus, A.V. Tolkachev, G.M. Yanina

National Research University (MPEI), Russia,  
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: [raskovskail@mail.ru](mailto:raskovskail@mail.ru)

### **REFRACTOMETRY OF THE TRANSPARENT SOLIDS IN THE CASE OF NONUNIFORM HEATING**

The technique of recovery of the temperature layer in Plexiglas with a two-dimensional temperature gradient on the basis of refractive images of structured laser radiation has been realized.

REFRACTION, OPTICALLY INHOMOGENEOUS MEDIA, STRUCTURED LASER BEAM,  
NONUNIFORM HEATING OF THE SOLID.