



ISSN 1818-8575

4/2010

# ВЕСЦІ БДУ



**Серыя 3**

ФІЗІКА

МАТЭМАТЫКА

ІНФАРМАТЫКА

БІЯЛОГІЯ

ГЕАГРАФІЯ

*В.Р. Соболев, доктор фізико-матэматычных навук, дацэнт,  
заведуючы кафедрай агульнай і тэарэтычнай фізікі БГПУ;  
В.И. Януга, кандыдат фізико-матэматычных навук, дацэнт,  
дэкан фізічнага факультэта БГПУ;*

*П.Н. Гоман, прафэсар (ад'юнкты) Дзяржаўнага  
ураджэння адукацыі «Камандна-інжынерны інстытут»  
МЧС Рэспублікі Беларусь*

## **О ВЛИЯНИИ ФОРМЫ ПРОТЯЖЕННОГО ТЕПЛОВОГО ИСТОЧНИКА НА ПЛОТНОСТЬ ЛУЧИСТОГО ПОТОКА ЭНЕРГИИ**

**Введение.** Процессы, связанные с необходимостью контроля и управления радиационными потоками энергии, пространственным распределением тепловой мощности, используются в ряде технологических циклов. К таковым можно отнести устройства для создания температурных полей заданной геометрической конфигурации и градиентности, применяемые в установках синтеза высококачественных моно- и поликристаллических материалов. При получении материалов из жидкой фазы, из состояния пара при распылении мишени в ходе импульсного термического, лазерного нагрева, а также по методу реакций в твердых фазах требуется температурное поле по рабочему пространству реактора обеспечивается за счет геометрии протяженных нагревателей и соответствующих тепловых экранов с изоляцией. Кроме этого, примером применения процессов перераспределения лучистых потоков энергии по пространству могут быть устройства рационального обогрева помещений, начиная от простых отражательных систем вплоть до схемных решений, предусматривающих возможность рекуперации отработанной тепловой энергии. В подобных системах предусматривается возможность концентрирования тепла, включая его радиационную компоненту, что, в частности, позволяет более интенсивно обогревать отдельные локальные места в помещении за счет остальных. В дополнение к вышесказанному следует отметить, что одним из важных направлений применения физических и технических основ теплоэнергетики является исследование термической стойкости различ-

ных материалов, включая новые синтетические композиции на основе высокомолекулярных полимеров. В подобных задачах материалы обычно исследуются при различных внешних условиях применительно к разработке рекомендаций по совершенствованию систем противопожарной защиты помещений, оборудования, сельскохозяйственных угодий, животных, непосредственно людей. По результатам изучения формируются базы данных по воздействию тепловых нагрузок различной интенсивности и длительности на способность тестируемых материалов противодействовать нагреву, передаче тепла, воспламенению и т. д.

**1. Целесообразность выполнения работы, постановка задачи, методика анализа и расчета.** В большинстве из перечисленных ранее аспектов теплоэнергетики используется локальная величина плотности лучистого потока, создаваемого протяженными источниками. Если расстояние от точки наблюдения до излучателя не велико по сравнению с его размерами, что действительно имеет место в значительном количестве практических случаев, то применение, как известно, закона обратных квадратов для определения энергетической освещенности, едва ли приемлемо. В данном случае источник следует представлять как большое количество точечных излучателей с последующим суммированием вкладов от каждого. Надо отметить, что по исследованию тепловых потоков, создаваемых протяженными источниками, имеется обширная литература, среди которой значительную долю занимают

данные аналитических расчетов и оценок, см., например, [1–4]. Тем не менее в монографии [2] представлен коэффициент облученности между плоским источником прямоугольной формы и удаленной точкой наблюдения, проекция которой совпадает только с центром излучающей поверхности. Для точек облучаемой поверхности с проекциями вне центра источника коэффициент облученности не определен. Для другого справочного издания [3] рассмотрена ситуация, когда излучение падает из одного неограниченного полосового излучателя на другую поверхность в виде бесконечной параллельной полосы меньшей ширины. Здесь коэффициент облученности предлагается определять в виде выражения, оперирующего комбинацией отношений ширины каждой из полос к расстоянию между полосой излучателя и полосой облучения. Однако в представленное соотношение не входит координата высоты точки наблюдения при том, что ее положение вдоль источника может быть не конкретизировано ввиду бесконечной длины последнего. Поскольку не указана высота точки наблюдения в полосе облучения, к которой относится результат, то задавать полосу облученности как геометрическое место для различных точек не совсем корректно, поскольку для них коэффициент не одинаков. Можно отметить, что и в довольно исчерпывающей работе [4] для оценки степени облученности человека перед фронтом низового пожара предлагается использовать выражение, которое может быть расширено посредством учета действия фронта пламени не только с уровня человеческого роста, но и с более высокого уровня, то есть для излучателя произвольной высоты.

В настоящем сообщении представлены результаты расчета геометрического коэффициента пропорциональности между плоским излучающим фронтом произвольных размеров и величиной плотности лучистого теплового потока в произвольной точке перед фронтом. Указанный геометрический коэффициент пропорциональности позволяет определить плотность радиационного потока энергии и расширяет представления о характере распределения коэффициента облученности в контексте аспектов, упомянутых в [2–4]. В качестве примера получены оценочные значения распределения плотности потока энергии по пространству, создаваемого плоской излучающей поверхностью пламени с температурой порядка 1300 К.

При радиационной передаче энергии, как упомянуто выше, существенную роль играет

геометрия теплового излучателя, то есть его размер, форма, удаленность от точки наблюдения, ориентация по отношению к направлению на тестируемую поверхность и ряд других факторов. В виду этого, при расчете использованы традиционные методы на основе представлений об освещенности участков экранов протяженными световыми источниками, произвольно ориентированными в пространстве [5]. Привлечены закономерности действия теплового излучения в приближении изотропности распределения энергетической светимости излучателя по различным направлениям. Аналитический расчет дополнен изображением пространственного распределения локальной плотности лучистого потока, смоделированным посредством компьютерной графики. Исследование выполнено для посылаемого плоским тепловым фронтом потока энергии. Лучистый поток может, например, быть создан раскаленной металлической поверхностью, непосредственно пламенем, расположенным вертикально по отношению к поверхности Земли. Рассмотрена составляющая лучистого потока, которая нормальна к поверхности Земли и которая обычно воспламеняет напочвенный горючий материал при низовых и, особенно, при верховых пожарах в лесу, в населенных пунктах деревянной застройки.

Основные элементы геометрии задачи и исходные посыпки расчета представлены на рисунке 1.

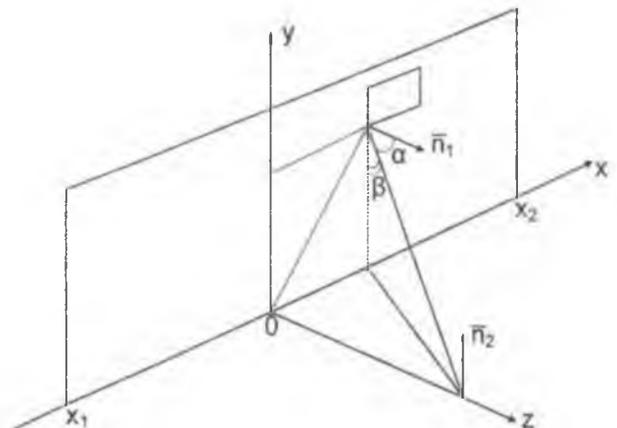


Рисунок 1 – Схема воздействия лучистого теплового потока от плоского источника в произвольной локальной точке перед фронтом излучателя

Расчет проведен с использованием известных представлений, согласно которым посылаемый в некоторую точку элементарный поток от излучателя пропорционален участку поверхности, который виден из точки наблюдения, то есть  $dx dy \cos \alpha$ , и величине телесного угла  $d\Omega$ , опирающегося на облу-

чаемую площадку  $dS$ . Здесь  $\alpha$  угол между нормалью  $\vec{n}_1$  и направлением на точку наблюдения. Кроме того, если нормаль  $\vec{n}_2$  к облучаемому участку поверхности  $dS$  составляет угол  $\beta$  с осью конуса в направлении телесного угла  $d\Omega$ , то искомый поток пропорционален и косинусу угла между нормалью  $\vec{n}_2$  и осью телесного угла  $d\Omega$ . Телесный угол  $d\Omega$  записывают как  $d\Omega = \frac{dS \cos \beta}{R^2}$ ,

где  $R$  – расстояние от элемента фронта источника до облучаемого участка поверхности. Таким образом, падающий искомый элементарный поток на площадку  $dS$  вдоль нормали  $\vec{n}_2$  к ней может быть выражен как

$$d\dot{Q} = B dS \frac{\cos \alpha \cos \beta}{R^2} dx dy. \quad (1)$$

Здесь  $B$  – энергетическая яркость источника. Соответственно, величина плотности лучистого потока  $dq$  от элемента излучателя

$dx dy$  как  $\frac{d\dot{Q}}{dS}$  может быть представлена в

виде  $dq = \frac{B}{R^2} \cos \alpha \cos \beta dx dy$ . Общая плот-

ность лучистого потока  $q$  в точке наблюдения может быть получена путем суммирования всех вкладов от всей излучающей площади. Для выбранной конфигурации излучающей поверхности и точки наблюдения локальную плотность лучистого потока  $q$  можно представить как

$$q = \int_{x_1}^{x_2} \int_0^h B \frac{Ly dx dy}{(L^2 + x^2 + y^2)^2}. \quad (2)$$

Здесь  $L$  – кратчайшее расстояние от точки наблюдения до плоскости, содержащей излучающую поверхность.

В рассматриваемом случае положение точки наблюдения определяется пределами интегрирования по координате  $x$  и  $y$ , которые в общем случае можно задавать так, что проекция точки наблюдения будет попадать внутрь плоскости излучателя (вид на рисунке 1 для координаты  $x$ ), на ее край (вид на рисунке 1 для координаты  $y$ ), а также находиться вне плоскости излучателя. То есть выбирая соответствующие пределы суммирования, можно установить характер распределения плотности лучистого потока по пространству для всех возможных точек наблюдения по фронту излучателя и по расстоянию до плоскости излучателя. По существу выражение (2) после взятия интеграла будет

задавать геометрию задачи, то есть являться произведением коэффициента облученности от протяженного температурного фронта в некоторой локальной точке и энергетической яркости источника. Выражение (2) можно классифицировать как интеграл от комбинации рациональных элементарных функций, и для его расчета допустимо воспользоваться правилами интегрирования в два этапа – по переменным  $x$  и  $y$  в соответствии с рекомендациями [6–7].

**2. Результаты расчета и их обсуждение.** В приближении изотропности испускающей способности плоского излучающего фронта выражение для нормальной по отношению к Земле составляющей плотности лучистого потока было вычислено для широкого диапазона изменения пределов интегрирования по координате  $x$  ( $x_1$  и  $x_2$ ). Переменная  $y$  изменялась от нуля до высоты  $h$ , что означало положение точки наблюдения по высоте нижнего среза фронта, то есть на уровне Земли. В итоге в общем случае нормальная к Земле составляющая плотности потока имеет вид:

$$q = \frac{\sigma T^4}{2\pi} \left[ \arctg \frac{x_2}{L} - \arctg \frac{x_1}{L} - \frac{L}{\sqrt{L^2 + h^2}} \left( \arctg \frac{x_2}{\sqrt{L^2 + h^2}} - \arctg \frac{x_1}{\sqrt{L^2 + h^2}} \right) \right]. \quad (3)$$

Здесь:

$T$  – абсолютная температура излучающей поверхности;

$\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;

$x_2, x_1$  – координаты, ограничивающие ширину фронта излучающей поверхности;

$h$  – высота излучателя.

Представленное выражение для плотности потока отвечает по сути плотности потока излучения черного тела и для более реалистических оценок следует вводить поправку, учитывающую степень отличия испускающей способности рассматриваемого излучателя от черного тела. Отметим, что в выражении (3) два первых члена задают плотность потока от источника с бесконечной высотой, а третье слагаемое в квадратной скобке учитывает конечную высоту излучающего плоского фронта. Видно, что локальная плотность потока энергии определяется шириной фронта источника, приведенной к расстоянию от источника до точки наблюдения  $\frac{x}{L}$ , а также положением точки наблю-

дения вдоль фронта. Характер пространственного распределения теплового потока вблизи плоского излучателя можно конкретизировать путем графического представления зависимости  $q$  от переменных, входящих в параметры задачи.

На рисунке 2 представлена степень влияния ширины теплового фронта, приведенной к расстоянию до точки наблюдения, на эффективность действия источника при некоторых значениях относительной высоты плоского фронта  $h/L$ , для случая, когда точка наблюдения симметрична, то есть равноудалена от краев источника. По сути, на рисунке 2 представлен коэффициент облученности в функции от относительной ширины излучающей поверхности. Из этого рисунка следует, что в целом при заданном расстоянии до источника, увеличение относительной ширины над расстоянием в конечном итоге приводит к насыщению плотности потока. Однако для значений величины  $x/L$  в пределах трех–четырех крат насыщение коэффициента облученности четко просматривается только для сравнительно малых значений приведенной высоты излучателя  $h/L$ , составляющих 0,5–2. При значениях  $h/L$  в пределах 3–4 просматривается только тенденция к насыщению коэффициента облученности при трех–четырех кратном превышении ширины фронта источника над расстоянием до точки наблюдения. Следовательно, высота фронта излучателя в общем случае существенно влияет на плотность лучистого потока энергии и требует учета, особенно вблизи источников энергии.

Исходя из соображений симметрии и вида

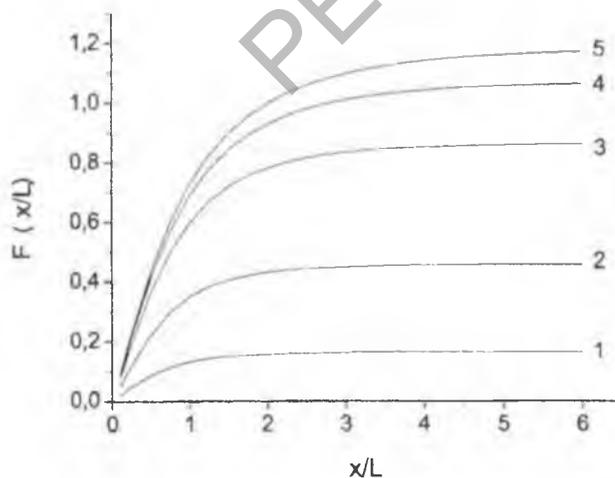


Рисунок 2 – Степень влияния ширины теплового фронта, приведенной к расстоянию до точки наблюдения на эффективность действия источника при некоторых значениях относительной высоты плоского фронта  $h/L$ : 0,5 (1); 1 (2); 2 (3); 3 (4); 4 (5); точка наблюдения симметрична, то есть равноудалена от краев источника

выражения, описывающего распределение плотности потока, естественно ожидать, что при заданной геометрии излучателя по ширине и высоте, изменение положения проекции точки наблюдения на излучатель от центра к краю должно сопровождаться уменьшением коэффициента облученности и плотности потока. Действительно, при больших смещениях вдоль фронта координаты  $x_2$  и  $x_1$  будут различаться мало, что означает сближение пределов интегрирования по величине. Степень воздействия смещения точки наблюдения вдоль фронта излучающей поверхности на величину потока в функции расстояния до плоскости излучателя представлена на рисунке 3. Здесь отображена зависимость плотности лучистого теплового потока ( $q$ ) от расстояния между плоскостью источника и точкой наблюдения ( $L$ ) при некоторых значениях смещения точки наблюдения вдоль координаты  $x$  от центра на периферию.

Как следует из рисунка 3, густота расположения кривых свидетельствует, что для фронта шириной 10 м при высоте пламени 1,5 м смещение по фронту от центра на 3 м не существенно влияет на уменьшение теплового потока при указанных расстояниях до плоскости излучателя. Это же касается значений координаты  $x = 4,0$ ;  $x = 4,5$  м. Ощутимое уменьшение потока имеет место только на самом краю фронта излучателя, то есть при  $x = 5$  м. За пределами фронта излучателя естественно ожидать более сильного ослабления потока энергии.

Отметим, что на рисунке 3 высота источника была включена в выражение для плотности лучистого потока опосредованно, то есть

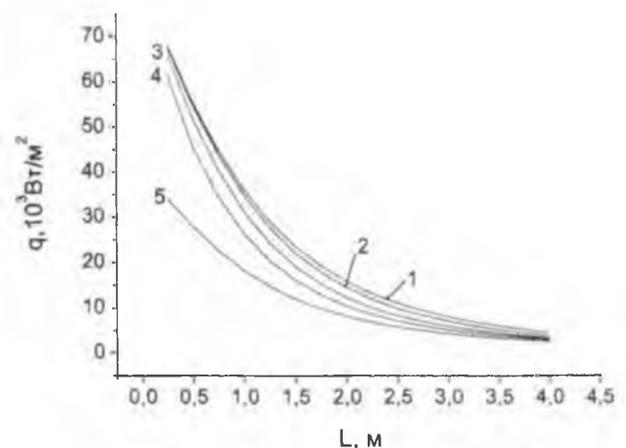


Рисунок 3 – Зависимость плотности лучистого теплового потока ( $q$ ) от расстояния между плоскостью источника и точкой наблюдения ( $L$ ) при некотором смещении вдоль фронта от центра ( $x = 0$  м (1)), к краю –  $x$ , м: 3 (2), 4 (3), 4,5 (4), 5 (5); высота фронта излучателя  $h = 1,5$  м, ширина фронта 10 м

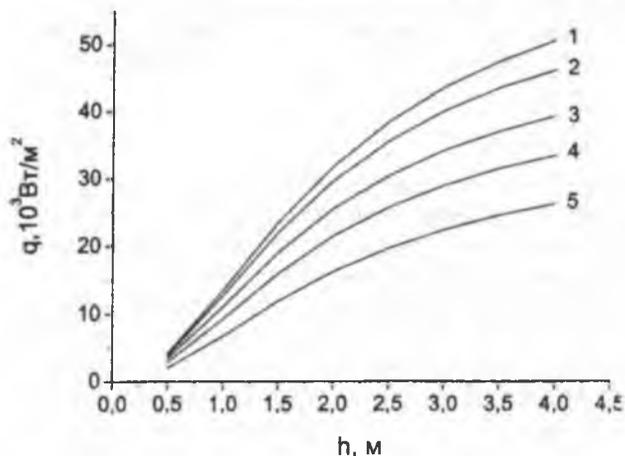


Рисунок 4 – Воздействие высоты фронта теплового источника ( $h$ ) на плотность лучистого теплового потока ( $q$ ) при некотором смещении вдоль фронта от центра ( $x = 0$  м (1)), к краю –  $x$ , м: 3 (2), 4 (3), 4,5 (4), 5 м (5); кратчайшее расстояние от точки наблюдения до фронта источника  $L = 1,5$  м, ширина фронта 10 м

как высота, приведенная к расстоянию до плоскости источника. На рисунке 4 представлена степень влияния непосредственно высоты теплоизлучающей поверхности ( $h$ ) на плотность лучистого теплового потока ( $q$ ) при некотором смещении проекции точки наблюдения по источнику вдоль фронта от центра к краю и фиксированном расстоянии до плоскости излучателя. Существенно, что при малых высотах фронта излучателя ( $h = 1$  м;  $h = 2$  м) поток зависит от высоты излучающей поверхности по линейному закону, а затем обнаруживает слабую тенденцию к насыщению, что более отчетливо выражено для точек, проецирующихся на края излучателя (кривая 5).

На рисунке 5 представлена плотность лучистого теплового потока ( $q$ ) при фиксированном расстоянии от точки наблюдения до плоскости излучателя в зависимости от смещения точки наблюдения от центра пламени ( $x$ ). Высота и ширина фронта излучателя выбраны как 1,5 и 10 м соответственно. Результаты, представленные на указанном рисунке, перекликаются с данными рисунка 3 и показывают, что при перемещении вдоль фронта источника во внутренних областях наблюдения плотность потока довольно медленно уменьшается. Только вблизи самого края излучателя (то есть при  $x = 4$  м,  $x = 5$  м) наблюдается резкий спад плотности потока, что особенно сильно выражено при малых расстояниях до фронта излучателя (кривая 1,  $L = 1$  м).

**Заключение.** Таким образом, полученное выражение для нормальной составляющей плотности лучистого потока энергии, посылаемого плоским вертикально ориентирован-

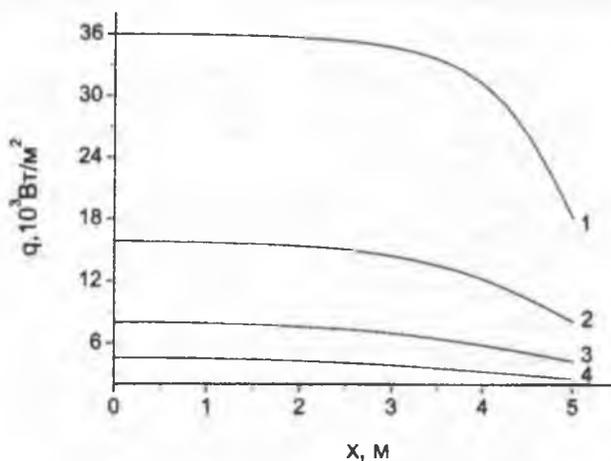


Рисунок 5 – Плотность лучистого теплового потока ( $q$ ) как функция удаления точки наблюдения от центра пламени ( $x$ ) при фиксированных значениях расстояния до фронта  $L$ , м: 1 (1), 2 (2), 3 (3), 4 (4); высота и ширина фронта источника 1,5 м и 10 м соответственно

ном тепловым источником, позволяет оценить распределение локальной плотности лучистого потока в различных точках поверхности почвы перед фронтом излучающего участка с учетом размеров источника, величины кратчайшего расстояния до плоскости излучателя, величины смещения точки наблюдения от центра как по ширине, так и по высоте фронта источника лучистой энергии. Как видно из общей картины распределения теплового потока, слабая зависимость тригонометрической функции арктангенс от своего аргумента при его больших значениях, тем не менее, вовсе не означает, что при решении практических задач по определению тепловых нагрузок от протяженных излучателей, размером фронта излучающей поверхности и положением точки облучения можно пренебречь. Выполненный расчет показывает, что зависимость теплового потока от места положения точки наблюдения достаточно сильна в абсолютном исчислении, особенно при промежуточных значениях аргумента полученной функции. Для составления рекомендаций по использованию защитных материалов, противопожарных барьеров и т. д. необходимо учитывать характерные размеры возможных тепловых излучателей, то есть типичные масштабы фронтов пламени и расстояний до него. В представленном виде выражение для нормальной составляющей плотности радиационного потока может быть использовано для определения безопасных расстояний до излучающей протяженной поверхности пламени при выявлении мер противодействия возгоранию напочвенного горючего материала при низовых и верховых пожарах, в том числе и в лесных массивах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Устойчивое лесопользование и лесопользование. Требования к мероприятиям по охране леса: СТБ 1582–2005. – Введ. 17.11.2005. – Минск: Белгипролес и ИЛ НАН Беларуси, 2005. – 14 с.
2. Кошмаров, Ю.А. Теплотехника / Ю.А. Кошмаров. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. – 501 с.
3. Уонг, Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: справочник / Х. Уонг; пер. с англ.. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.
4. Гусев, В.Г. Оценка облученности пожарных перед кромкой низового и верхового лесных пожаров / В.Г. Гусев // Лесные пожары и борьба с ними: сб. науч. тр. / ЛенНИИЛХ; редкол.: Е.С. Арцыбашев (отв. ред.) и др. – Л., 1989. – С. 133–137.
5. Ландсберг Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг. – М.: Наука, 1976. – 926 с.
6. Градштейн, И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. – М.: Гос. изд. Физико-математической литературы, 1962. – 1100 с.
7. Гусак, А.А. Справочник по высшей математике / А.А. Гусак, Г.М. Гусак. – Минск: Навука і тэхніка, 1991. – 480 с.

## SUMMARY

*Features of spatial distribution for density of a stream of energy emitted by a flat surface are represented and discussed for some special cases. The energy thermal source as the flat heated up surface is approximated as a black body, with isotropic distribution of emission like a Lambert source. The expression for energy flux is received, allowing to calculate the component of local density of the stream of radiant energy which is parallel to the plane of the source and reaches any point of space outside the source. Ways of applying the established laws to define safe distances from extended thermal radiators are discussed in terms of struggle against local and riding forest fires.*

Поступила в редакцию 30.06.2010 г.