

К ВОПРОСУ О ПРОСТРАНСТВЕННОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛУЧИСТОГО ПОТОКА ЭНЕРГИИ ОТ ИСТОЧНИКА БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДИ

В.Р. СОБОЛЬ¹, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой
П.Н. ГОМАН², преподаватель

В.И. ЯНУТЬ¹, кандидат физико-математических наук, доцент, декан факультета

¹УО «Белорусский государственный педагогический университет имени М. Танка»,
г. Минск

²ГУО «Командно-инженерный институт» МЧС Республики Беларусь, г. Минск

В работе приведены результаты выявления геометрического коэффициента облученности и пространственного распределения интенсивности радиационного потока энергии для плоского протяженного теплового источника, характерного, в том числе, и для условий пожара. Полученные данные могут быть полезны при оценке устойчивости теплопроводящих и изолирующих материалов к воздействию энергетических потоков, разработке систем противодействия и защиты от огня при ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: тепловое излучение, нагрев, термическая устойчивость, тепловой фронт.

Введение

Совершенствование противопожарной защиты включает в себя среди прочих мероприятий разрешение задач по определению термической устойчивости разнообразных материалов в условиях длительного воздействия интенсивных энергетических потоков. Это дает возможность устанавливать безопасные расстояния до охваченных огнем строений, участков леса, сельхозугодий и предпринимать меры к локализации уже возникшего пожара и предотвращению его пагубного воздействия на окружающую среду, животных и человека. При решении задач такого рода применяются методы экспериментального, аналитического и численного моделирования процессов переноса радиации с привлечением физических и технических основ теплоэнергетики для условий реального облучения и при имитации воздействия потоков энергии на исследуемые объекты с рассмотрением их последующей реакции на возмущение.

В ходе лабораторных испытаний достаточно не сложно смоделировать радиационный разогрев, характерный по величине для различных мощностей потока энергии, и проводить испытания материалов на малых по размерам образцах. Такой подход позволяет выявлять временные параметры устойчивости веществ к воздействию энергетических потоков различной интенсивности, конкретизировать закономерности разрушения и возгорания объектов после исчерпания ресурса термической сопротивляемости [1–2]. Для более масштабных по геометрическим размерам задач, например при расчете теплового воздействия больших участков пламени в естественных условиях – горение высоких строений, лесных массивов, сельскохозяйственных угодий, емкостей с горючими материалами, топливных трубопроводов и т.д. – принцип геометрического подobia для оценки действия потоков энергии может оказаться не применимым.

Соответственно, результаты лабораторного эксперимента следует корректировать и дополнять данными численного расчета. При этом требуется определять не только интегральные характеристики потока энергии в окружающее пространство, но и локальную величину интенсивности вблизи заданной точки. Т.е. для протяженных источников большой площади ситуацию естественно аппроксимировать в терминах энергетической силы излучения, энергетической яркости, интенсивности потока энергии в заданном направлении [3–6].

1. Обоснование целесообразности работы

При существовании протяженного фронта пламени, локальная величина интенсивности лучистого потока может достаточно быстро достигать значений, близких к предельным, способным разогревать объекты окружения вплоть до возгорания. Даже в случае неподвижного фронта распространение огня не может считаться предотвращенным, если лучистая энергия по своей интегральной величине и особенно на отдельных локальных участках способна привести к воспламенению удаленных объектов. Обсуждаемая ситуация прописана в ряде технических нормативных правовых актов Республики Беларусь, в которых определены требования к противопожарным разрывам между различными зданиями и сооружениями в зависимости от степени их огнестойкости и класса функциональной пожарной опасности, включая меры противопожарного обустройства лесного фонда с учетом предрасположенности лесных участков к возникновению и распространению пожара [7–10].

В разработанных нормативах используется методика расчета интенсивности теплового излучения и определения параметров противопожарных разрывов, в соответствии с которой сначала оценивается степень облученности материала радиационным потоком от заданного теплового источника. Рассчитанный уровень облученности сопоставляется с его критической величиной, полученной из эксперимента, и делается вывод о вероятности воспламенения материала при заданной величине расстояния до источника. Конвективную составляющую теплообмена и возможный перелет искр не учитывают. Также не конкретизируется, для какой геометрии излучающей поверхности приведено выражение по расчету коэффициента облученности и представлен не очень широкий перечень материалов, с установленной минимальной пороговой интенсивностью облучения. Кроме этого нормативы по противопожарным разрывам конкретизируют больше технические и экономические аспекты проведения работ, а не потенциальную тепловую обстановку в условиях местности. Указанные обстоятельства выдвигают ряд вопросов по обоснованности применения обсуждаемой методики ввиду возможности привнесения ощутимых погрешностей в ходе расчетов.

Тем не менее, запас надежности используемых методик и принятых нормативов достаточно велик и для обычной тепловой обстановки обсуждаемая наработанная методика и ее выводы вполне адекватны. Однако в нестандартных условиях состояния среды, рассчитанные барьеры и разрывы могут оказаться не в состоянии ограничить распространение огня. Действительно, поскольку общие положения по параметрам огневой устойчивости выработаны на основе среднестатистических данных из условий разумной целесообразности при конечной степени надежности действия систем защиты, то для экстремальных ситуаций имеет смысл дополнительно выявлять более жесткие допуски, чем записанные в регламентах [9, 10]. Например, в случае достаточно редко встречающихся засушливых летних периодов с аномально высокой температурой окружающей среды (1995 г., 2002 г., 2010 г.), когда число лесных пожаров резко возрастало, требования регламентов, предписывающих порядок проведения профилактических мероприятий особенно в парковых, лесных зонах, в сфере агротехнической

деятельности человека, как оказалось, могли быть более действенными. Стандартные параметры тепловой обстановки, создаваемой типичными по размерам масштабами площади огня и выделяемой при горении теплоты, естественно, оказались заниженными для сухих летних месяцев [11, 12]. Степень облучения среды за счет больших площадей пламени, более интенсивного горения обезвоженной растительности оказалась выше, что привело к серьезным последствиям в ряде регионов Российской Федерации. Это означает, что для подобной более напряженной тепловой обстановки нормы пожарной профилактики, включая безопасные расстояния до возникшего огня требуют точечной корректировки.

2. Постановка задачи

Работа посвящена выявлению закономерностей формирования радиационного интенсивного потока энергии, включая его пространственное распределение в условиях действия протяженного крупномасштабного теплового источника на примере плоского фронта пламени с широким диапазоном изменения температуры, отвечающим горению различных видов материалов, включая природный газ, нефтепродукты – нефть, мазут, бензин, керосин, а также продукты лесной и полевой растительности, включая древесину, кустарниковые и травянистые культуры. По существу выявляются закономерности распределения интегральной по фронту источника локальной интенсивности лучистого потока в непосредственной близости от очага и во всем пространстве, что дает основания в последующем оценить топологию распределения температуры и масштаба ее возрастания для облучаемого горючего материала в области пожара. Рассматриваемая экспозиционная интенсивность потока энергии позволяет в применении к конкретным облучаемым материалам расширить существующие положения и нормы противопожарной защиты, включая условия защитной ситуации, когда параметры теплового источника – геометрические размеры, температура пламени, длительность воздействия радиации не отвечают нормам существующих регламентирующих документов.

Исследованию тепловых потоков от протяженных источников посвящено изрядное количество работ в области анализа и математического моделирования, см., например, [13–15]. Тем не менее, констатировать о полном исчерпании темы затруднительно, поскольку представляемые данные позволяют оценить так называемый коэффициент облученности только в некоторых точках перед источником. В данной работе представлены результаты расчета распределения интенсивности, что означает, по сути, и коэффициента облученности по всему пространству перед плоским испускающим фронтом произвольных размеров по высоте, ширине, расположению его над уровнем Земли. Имеется в виду коэффициент облученности, формируемый компонентой интенсивности лучистого потока, которая нормальна к плоскости теплового источника. Родственная задача по выявлению распределения по пространству для составляющей интенсивности лучистого потока, которая параллельна плоскости вертикального излучателя и, соответственно, нормальна к поверхности Земли, исследована в [16].

3. Методология расчета пространственного распределения интенсивности радиационного потока энергии

В качестве исходной модели задачи рассмотрен плоский вертикальный по отношению к поверхности Земли излучатель с определенной температурой поверхности, задаваемой интенсивностью горения материала. Исследование пространственного распределения экспозиционной интенсивности излучения источника осуществлено методом выявления закономерностей распределения локальной плотности в заданном направлении, а именно, как указано ранее, проанализирована составляющая потока,

перпендикулярная плоскости источника. Такая составляющая на уровне почвы обычно воздействует с боку на напочвенный горючий материал, основания стеблей кустарниковых и травянистых растений нижнего яруса леса. На более высоких по высоте уровнях эффективно облучаются стволы деревьев, кустарников, техника, животные, люди. Общая схема исследования и исходные геометрические построения представлены на рис. 1.

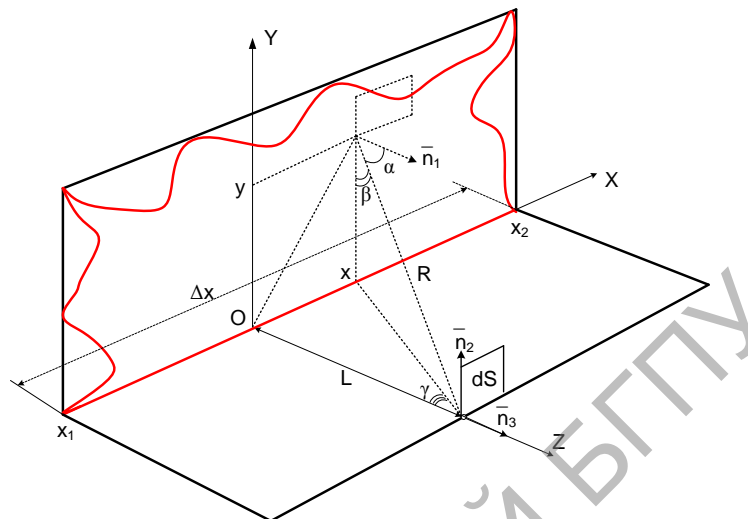


Рисунок 1 – Схема воздействия лучистого теплового потока от плоского источника на облучаемую поверхность перед фронтом излучателя

При рассмотрении используется приближение, что лучистая яркость источника не зависит от направления, соответственно, локальная интегральная плотность потока на облучаемой поверхности определяется как сумма вкладов элементарных участков источника. В данном случае при определении составляющей плотности потока, которая нормальна к плоскости источника, используются известные методы анализа ситуации [17]. Составляющая плотности радиационного потока вдоль нормали \bar{n}_3 параллельна в рамках выбранной схемы оси Z . Посылаемый в некотором направлении поток от элемента излучателя пропорционален участку поверхности, который виден из точки наблюдения, т.е. $dx dy \cos \alpha$, а также величине телесного угла $d\Omega$ в данном направлении. Угол между нормалью \bar{n}_1 и направлением на область наблюдения R назовем α . Телесный угол связан с видимой частью облучаемой площадки dS . Кроме того, если нормаль \bar{n}_2 , находящаяся в плоскости облучаемого участка поверхности dS составляет угол β с осью конуса телесного угла $d\Omega$ в направлении точки наблюдения, то искомый поток пропорционален и косинусу угла между нормалью \bar{n}_2 , и осью телесного угла $d\Omega$, и синусу угла β . В результате, падающий перпендикулярно площадке dS поток лучистой энергии $d\Phi$ может быть выражен как

$$d\Phi = B dS \frac{\cos \alpha}{R^2} \sin \beta \cos \gamma dx dy, \quad (1)$$

где B – энергетическая яркость источника. Соответственно, величина перпендикулярной к dS плотности лучистого потока dq от элемента излучателя $dx dy$, т.е. $\frac{d\Phi}{dS}$ может быть представлена в виде

$$dq = \frac{B}{R^2} \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma dx dy. \quad (2)$$

Суммирование вкладов всех элементарных излучателей по ширине и высоте источника дает возможность определить интегральную локальную плотность лучистого потока q в точке наблюдения. Для выбранной конфигурации излучающей поверхности и точки наблюдения внутри по координате x и на нижнем срезе по координате y т.е. ($x = 0$; $y = 0$) локальную плотность лучистого потока q можно представить как результат суммирования по координатам x и y

$$q = \int_{x_1}^{x_2} \int_0^h B \frac{Ly dx dy}{(L^2 + x^2 + y^2)^2}, \quad (3)$$

где L – кратчайшее расстояние от точки наблюдения до излучающей поверхности. Для случая, когда точка наблюдения находится на некоторой высоте, пределы интегрирования следует выбрать y_1 и y_2 с соответствующим учетом знаков.

Рассмотренная конфигурация излучающей поверхности и облучаемой площадки конечных размеров позволяет моделировать процесс воздействия лучистого потока энергии от теплового источника плоской формы при различных расстояниях до облучаемой площадки, ее положения по высоте и фронту источника, температуре теплового фронта. Исследовать облучение в любой точке по оси X или Y можно путем соответствующего выбора центра системы координат и варьирования пределов интегрирования в выражении (3).

4. Результаты расчета и их обсуждение

При расчете соотношения (3) использованы методы суммирования в два этапа [18, 19]. В результате, получено достаточно громоздкое выражение, позволяющее определить локальную составляющую плотности потока лучистой энергии, направленную вдоль нормали \vec{n}_3 . Выражение отвечает ситуации, отображенной на рис. 1 и может быть трансформировано для случая произвольного расположения точки наблюдения по высоте фронта.

$$q = \left(\frac{\sigma T^4}{\pi} \right) \left[\left(\frac{L^2}{2h} \right) \left[\frac{1}{L}(A-B) - C(D-E) \right] + \left(\frac{1}{2} \right) \left[F(D-E) - \left(\frac{L}{h} \right) (A-B) \right] + \left(\frac{1}{2} \right) [GH - IJ] \right], \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{где } A &= \arctg \left(\frac{x_2}{L} \right); & B &= \arctg \left(\frac{x_1}{L} \right); & C &= \frac{1}{\sqrt{h^2 + L^2}}; \\ D &= \arctg \left(\frac{x_2}{\sqrt{h^2 + L^2}} \right); & E &= \arctg \left(\frac{x_1}{\sqrt{h^2 + L^2}} \right); & F &= \frac{\sqrt{h^2 + L^2}}{h}; \\ G &= \frac{x_2}{\sqrt{L^2 + x_2^2}}; & H &= \arctg \left(\frac{h}{\sqrt{x_2^2 + L^2}} \right); & I &= \frac{x_1}{\sqrt{L^2 + x_1^2}}; \\ J &= \arctg \left(\frac{h}{\sqrt{x_1^2 + L^2}} \right); \end{aligned}$$

T – абсолютная температура излучающей поверхности, К;

σ – постоянная Стефана-Больцмана;

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

h – высота теплового фронта, м;

L – расстояние от точки наблюдения до плоскости излучателя, м.

Итоговое выражение представлено в элементарных тригонометрических функциях и содержит параметры фронта источника и местоположения точки наблюдения. В (4) излучатель аппроксимируется как черное тело с изотропным угловым распределением энергетической светимости. Как видно, фигурирующая в (4) тригонометрическая функция – арктангенс с различными аргументами $\frac{x_2}{L}$, $\frac{x_1}{L}$, $\frac{x_2}{\sqrt{h^2 + L^2}}$, $\frac{h}{\sqrt{x_2^2 + L^2}}$ и т.д.

формирует вид плотности потока энергии. Функция арктангенс достаточно слабо зависит от аргумента при его больших значениях, что приводит к слабой зависимости коэффициента облученности при предельном переходе, т.е. больших расстояниях до точки наблюдения (рис. 2). Действительно, представленное на рис. 2 семейство зависимостей плотности потока как функция смещения по ширине фронта от середины фронта обнаруживает тенденцию к насыщению с увеличением расстояния L . Соответственно, при малых расстояниях все кривые сходятся в одну точку, поскольку вблизи источника роль периферийных участков излучателя ослабевает из-за возрастания углов наклона к остальным участкам.

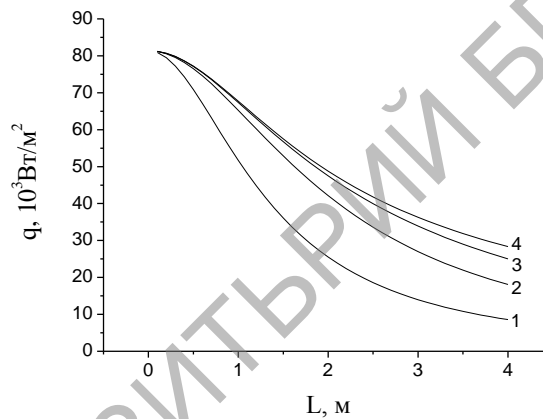


Рисунок 2 – Плотность лучистого теплового потока (q) в зависимости от удаления облучаемой площадки от середины пламени (L) при ширине теплового фронта, м: 2 (1), 5 (2), 10 (3), 30 (4); высота и температура теплового излучателя 1,5 м и 1300 К соответственно

Перемещение облучаемой площадки в горизонтальном направлении вдоль теплового фронта от его середины, как оказывается, достаточно существенно сказывается на условиях теплообмена излучением. Как упомянуто ранее, наибольшее значение плотности лучистого теплового потока характерно для точек расположенных напротив центра источника по его ширине. При смещении точки наблюдения вдоль оси OX к периферийной области источника обнаруживается достаточно резкое уменьшение интенсивности облучения (рис. 3). Представленная на рис. 3 интенсивность излучения как функция температуры при некоторых значениях смещения точки наблюдения к краю излучателя по горизонтали подтверждает этот тезис. Действительно, для теплового фронта шириной 8 м существенное уменьшение плотности лучистого теплового потока наблюдается после смещения точки наблюдения на расстояние более 2 м от середины теплового фронта. Для положения точки наблюдения напротив края источника значение интенсивности уменьшается в два раза по сравнению с точкой наблюдения напротив середины излучателя.

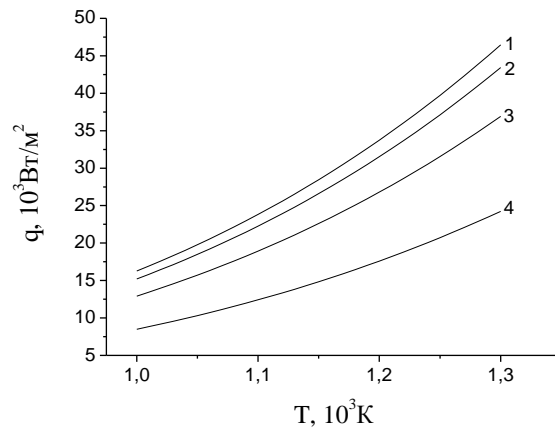


Рисунок 3 – Плотность лучистого теплового потока (q) в зависимости от температуры излучателя (T) при некотором смещении облучаемой площадки от середины теплового фронта ($x = 0$ м (1)), к краю – x , м.: 2 (2), 3 (3), 4 (4); расстояние от излучателя до облучаемой площадки и высота теплового фронта 2 м и 1,5 м соответственно, ширина излучателя 8 м

На рис. 4 представлены результаты моделирования комбинированного воздействия расстояния до точки наблюдения и высоты источника на локальное значение интенсивности излучения в точке наблюдения, расположенной напротив середины источника. Из данного рисунка видно, что роль высоты источника более существенна при сравнительно больших расстояниях от его центра. На малых расстояниях возрастание интенсивности не столь чувствительно к увеличению высоты, хотя общее значение плотности потока гораздо сильнее.

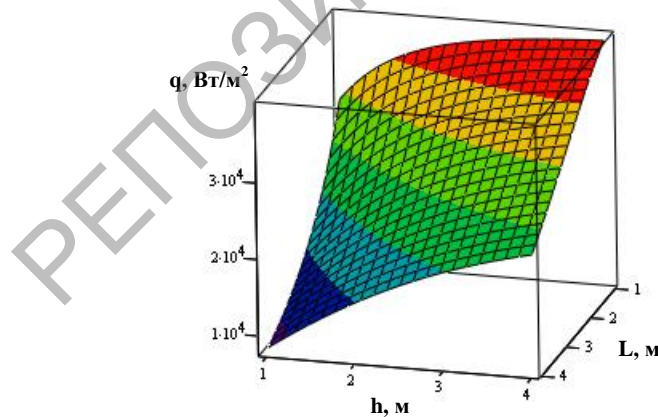


Рисунок 4 – Двумерное представление распределения плотности лучистого теплового потока (q) в зависимости от высоты теплового фронта (h) и расстояния от середины излучателя до точки наблюдения (L). Точка наблюдения расположена на нижнем срезе вертикальной плоскости излучателя. Температура и ширина излучателя составляют 1100 К и 8 м соответственно

Действительно, изменение расстояния от середины теплового фронта до облучаемой площадки от 1 м до 4 м при высоте излучателя 1 м и температуре 1100 К приводит к уменьшению интенсивности облучения с уровня 30 кВт/м² до 8 кВт/м². В свою очередь, увеличение высоты теплового фронта с 1 м до 4 м при расстоянии до облучаемой

поверхности 1 м и прочих равных условиях увеличивает плотность лучистого теплового потока в точке наблюдения от 30 кВт/м² до 40 кВт/м².

Заключение

1. Выявленные общие закономерности распределения интенсивности лучистого потока от плоского фронта протяженного излучателя показывают значительность степени влияния геометрических размеров источника энергии, а также его расположения по отношению к облучаемой области, которые не менее существенны, чем непосредственно температура пламени источника. Формирование тепловой нагрузки в прилегающей к пожару области можно оценить путем экстраполяции полученных выражений, что позволит определить конкретные параметры радиационного потока энергии в области очага пожара при горении больших массивов материалов различной теплопроводной способности.

2. Полученные соотношения в приближении реальной степени черноты пламени протяженного источника излучения позволяют оценить распределение плотности потока лучистой энергии в широком диапазоне значений начиная от малых, до критических масштабов и заканчивая большими сверхкритическими значениями при действии на типичные виды горючих материалов. Это дает возможность определить безопасные расстояния и безопасные временные интервалы воздействия лучистой энергии интенсивных источников на объекты окружающей среды.

3. Общий алгоритм расчета, полученный для случая расположения точки наблюдения по нижнему краю вертикального плоского источника, может быть распространен выбором соответствующих пределов суммирования для оценки степени облученности горизонтальной компонентой плотности лучистого потока энергии на любой высоте над поверхностью земли, применительно к определению степени воздействия излучения на строения, технику, растительность, животных и людей.

4. Установленный принцип определения интенсивности лучистого потока энергии по пространству может быть адаптирован для совершенствования системы противопожарных мероприятий и технических регламентов в различных отраслях народного хозяйства, включая градостроение, сельское и лесное хозяйства, особенно для условий экстремального воздействия внешней среды на состояние и способность к возгоранию материальных ценностей при аномальных погодных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Ф11М-005), а также в рамках подпрограммы «Кристаллические и молекулярные структуры» ГПНИ «Функциональные и машиностроительные материалы, наноматериалы» 1.14 на 2011-2013 годы.

Литература

1. Касперов, Г.И. Исследование пожароопасных свойств лесных горючих материалов сосновых насаждений / Г.И. Касперов, П.Н. Гоман // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообрабатывающая пром-ть. – 2010. – Вып. 18. – С. 337–340.

2. Гришин, А.М. Зажигание лесных горючих материалов потоком лучистой энергии / А.М. Гришин [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2002. – № 1. – С. 30–35.

3. Подгрушный, А.В. Защита населенных пунктов от лесных пожаров / А.В. Подгрушный, С.В. Гундар // Вестник Акад. гос. п/пож. службы. – 2005. – № 3. – С. 86–98.

4. Валуев, В.Е. Современные подходы к оценке температурных воздействий на конструкции зданий и сооружений / В.Е. Валуев, О.П. Мешик // Вестник Бр.ГТУ. Сер. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2010. – № 2. – С. 62–65.

5. Полежаев, Ю.В. Современные проблемы тепловой защиты / Ю.В. Полежаев // Инженерно-физический журнал. – 2001. – Т. 74. – №6. – С. 8–17.

6. Логинов, В.И. Результаты исследований по разработке различных видов специальной защитной одежды пожарных / В.И. Логинов // Пожарная безопасность. – 2003. – № 3. – С. 116–122.

7. Система стандартов пожарной безопасности. Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004–1991. – Введ. 01.07.1992. – М.: Ком-т стандартиз. и метролог. СССР, 1992. – 78 с.

8. Система стандартов пожарной безопасности. Пожарная безопасность технологических процессов. Методы оценки и анализа пожарной опасности. Общие требования: СТБ 11.05.03–2010. – Введ. 01.01.2011. – Минск: НИИ ПБиЧС МЧС Республики Беларусь, 2010. – 76 с.

9. Противопожарная защита населенных пунктов и территорий предприятий: СНБ 2.02.04–2003. – Введ. 01.07.2004. – Минск: ТКС 03 при РУП «Стройтехнорм», 2003. – 15 с.

10. Правила противопожарного обустройства лесов Республики Беларусь: ТКП 193–2009. – Введ. 05.08.2009. – Минск: ИЛ НАН Беларуси, 2009. – 11 с.

11. Природные пожары лета 2010 года [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.lenta.ru/story/pozhary>. Дата доступа: 02.02.2010.

12. Гоман, П.Н. Сравнительный анализ деятельности по охране лесов от пожаров в Республике Беларусь и Республике Греция / П.Н. Гоман, А.А. Людко // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2009. – № 2(4) – С. 13–17.

13. Кошмаров, Ю.А. Теплотехника / Ю.А. Кошмаров. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. – 501 с.

14. Уонг, Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Пер. с англ. Справочник / Х. Уонг. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.

15. Бородкин, А.Н. Модель распространения пожара между деревянными строениями / А.Н. Бородкин, В.И. Присадков, В.Г. Шамонин, С.Г. Ларцев // Пожаровзрывобезопасность. – 1997. – № 1. – С. 36–39.

16. Соболев, В.Р. О влиянии формы протяженного теплового источника на плотность лучистого потока энергии / В.Р. Соболев, П.Н. Гоман, В.И. Януть // Весці БДПУ. Сер. 3. – 2010. – № 4. – С. 3–9.

17. Ландсберг, Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг. – М.: Наука, 1976. – 926 с.

18. Градштейн, И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. – М.: Гос. изд. физ.-мат. л-ры, 1962. – 1100 с.

19. Гусак, А.А. Справочник по высшей математике / А.А. Гусак, Г.М. Гусак. – Минск: Навука і тэхніка, 1991. – 480 с.

V.R. Sobol, P.N. Goman, V.I. Yanut

SPACE DISTRIBUTION OF INTENSITY OF RADIANT FLUX FROM THE LARGE SURFACE SOURCE

The results of determination of geometrical ratio of irradiance and space distribution of intensity of radiation energy flow for plane extensive heat source have been given which is typical for fire conditions. The obtained data will be useful for the estimation of stability of heat-conducting and isolating materials against energy flows impact as well as for the development of system of fire resistance and protection at emergencies elimination.