

## ВОСПЛАМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ДРЕВЕСИНЫ ПОТОКОМ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ

В. Т. Кузнецов, А. И. Фильков

Томский государственный университет, 634050 Томск, filkov@mail.tsu.ru

Исследовано воспламенение различных видов древесины при воздействии излучения ксеноновой лампы ДКсР-10000. Получены зависимости времени задержки воспламенения от интенсивности потока лучистой энергии для различных сортов древесины: кедра, лиственницы, сосны, березы и осины. Исследовано влияние начальной температуры и влажности древесины на время воспламенения. Оптическим методом определена температура воспламенения древесины сосны и березы при различных интенсивностях потока лучистой энергии. Показано, что время воспламенения древесины сосны уменьшается в  $1.5 \div 2$  раза при повышении начальной температуры образцов на 100 градусов. Установлено, что температура воспламенения древесины увеличивается с ростом плотности потока лучистой энергии и зависит от сорта древесины. Повышение влажности древесины в 10 раз увеличивает время ее воспламенения более чем на 50 %.

Ключевые слова: поток лучистой энергии, древесина, температура поверхности, время воспламенения.

### ВВЕДЕНИЕ

Время воспламенения древесины зависит от большого количества факторов, в том числе от плотности, влажности, мощности внешнего источника нагрева, скорости воздушного потока, положения облучаемого элемента относительно источника нагрева и т. д. Изучению этого явления посвящены работы [1–6].

Известно [2–4, 6], что пожары на производственных объектах и складах строительных материалов характеризуются высокой лучистой составляющей теплового потока. Кроме того, при распространении лесных низовых и верховых пожаров выделяется большое количество тепла, которое может стать причиной воспламенения горючих материалов в населенных пунктах, расположенных близко к границе леса. Под действием теплового излучения повышается температура поверхности горючих материалов, что способствует быстрому распространению воспламенения и охвату пожаром больших площадей. Информация о температуре воспламенения древесины необходима не только для оценки пожарной безопасности, но и для решения кинетических задач [4]. В настоящее время в литературе отсутствуют научные результаты по температуре воспламене-

ния при потоках свыше  $40 \text{ кВт/м}^2$  [2]. В связи с этим представляет интерес изучить влияние начальной температуры образцов древесины и ее влажности на время воспламенения, а также определить температуру поверхности древесины в момент воспламенения при высоких плотностях потока лучистой энергии.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Источником потока лучистой энергии являлась оптическая печь «Уран-1» с ксеноновой лампой ДКсР-10000 [7] (рис. 1).

Из 10 кВт мощности, выделившейся на лампе, 5.5 кВт приходилось на излучение в оптической области. Распределение излучения по спектру следующее: 0.5 кВт (9 %) в ультрафиолетовой части, 2 кВт (36 %) в видимой и 3 кВт (55 %) в инфракрасной части спектра. Максимальная плотность потока лучистой энергии в пятне диаметром  $10^{-2}$  м составляла  $4000 \text{ кВт/м}^2$ . Установка обеспечивала стабильность излучения во времени не ниже 95 %, равномерность распределения потока лучистой энергии в пятне диаметром  $2 \cdot 10^{-2}$  м не менее 87 %. Изменение плотности потока лучистой энергии при отклонении от фокальной плоскости по оптической оси на расстояние  $2 \cdot 10^{-3}$  м не превышало 5 %. Диаметр сфокусированного потока составлял около  $2 \cdot 10^{-2}$  м. Распределение интенсивности излучения по площа-

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 200–2013 годы» (г/к № П 1109) и Роснауки (г/к № П 02.740.11.0674).

ди пятна определяли фотоэлектрическим методом с использованием световода из стекловолоконного жгута диаметром  $2 \cdot 10^{-3}$  м марки ГОЖВ-Б-2-250 и фотодиода ФД-К-155. Сигнал с фотодиода регистрировался шлейфовым осциллографом Н-117/1. Световод перемещали по диаметру пятна по взаимно перпендикулярным направлениям. Кривые распределения интенсивности излучения имели максимум в центре пятна и плавно снижались к периферии. Время экспозиции потока излучения в эксперименте задавали с помощью дискового затвора, который обеспечивал трапециевидную форму импульса. Время раскрытия (закрытия) затвора составляло 4 % от времени экспозиции. С помощью дискового затвора время экспозиции в экспериментах варьировалось в диапазоне  $0.1 \div 1$  с. При длительности экспозиции свыше 1 с использовался электромагнитный затвор с временем раскрытия (закрытия) 0.1 с.

Блок регистрации обеспечивал измерение плотности потока лучистой энергии, времени экспозиции, момента появления пламени, температуры воспламенения и контролировал условия проведения опыта. Он включал датчик плотности потока лучистой энергии, фотодиоды, реле времени, светолучевой осциллограф Н-117 и тепловизор JADE J530SB, который представляет собой радиометрическую инфракрасную камеру на базе охлаждаемого сенсора с диапазоном длин волн  $1.5 \div 5.1$  мкм. Температура поверхности образца фиксирова-

лась тепловизором с погрешностью измерений, не превышающей 1 %. В экспериментах применялся дисперсионный фильтр, позволяющий измерять температуру в диапазоне  $763 \div 1073$  К, спектральный интервал этого фильтра  $2.5 \div 2.7$  мкм. При измерениях использовались калибровки завода-изготовителя.

Начало и конец экспозиции, а также момент появления продуктов газификации и пламени фиксировали тепловизором при частоте съемки 100 кадр/с, показания которого дублировали фотоэлектрической системой и записывали на шлейфовый осциллограф Н-117/1. Временем воспламенения считался промежуток времени от начала воздействия потока лучистой энергии до момента появления пламени над поверхностью исследуемого образца. Погрешность измерения времени воспламенения по появлению пламени не превышает 4 % и в основном определяется физико-химическими свойствами исследуемого вещества. Плотность лучистого потока в месте расположения исследуемых образцов перед каждой серией опытов и для контроля в ходе серии измерялась калориметром. Калориметр представлял собой диск из меди диаметром  $10^{-2}$  м, толщиной  $3 \cdot 10^{-3}$  м с термопарой, зачеканенной по центру диска на глубину  $1.7 \cdot 10^{-3}$  м. Приемная поверхность калориметра зачернена ламповой копотью. Коэффициент отражения зачерненной поверхности калориметра в области спектра излучения  $0.36 \div 1.1$  мкм составлял  $1.5 \div 2.0$  %. Погрешность измерения интенсивности излучения не превышала 10 %. Плотность теплового потока изменяли в пределах  $q = 360 \div 1520$  кВт/м<sup>2</sup>.

В качестве исследуемых образцов использовали древесину сосны (*Pinus Silvestris*), березы (*Betula pubescens*), кедра (*Pinus sibirica*), лиственницы (*Larix sibirica*) и осины (*Populus tremula*), как наиболее распространенных на территории РФ ( $\approx 78$  %) [8]. Образцы представляли собой цилиндры диаметром  $1.6 \cdot 10^{-2}$  м и высотой  $10^{-2}$  м.

Поверхность образцов, поглощающую излучение, покрывали ламповой копотью. Световое излучение падало на образцы перпендикулярно волокнам древесины. Исследования проводили в среде воздуха при атмосферном давлении. Начальная температура образцов соответствовала комнатной — 297 К. Абсолютно сухое состояние древесины достигалось путем ее предварительного высушивания в сушильном шкафу при температуре 376 К в те-

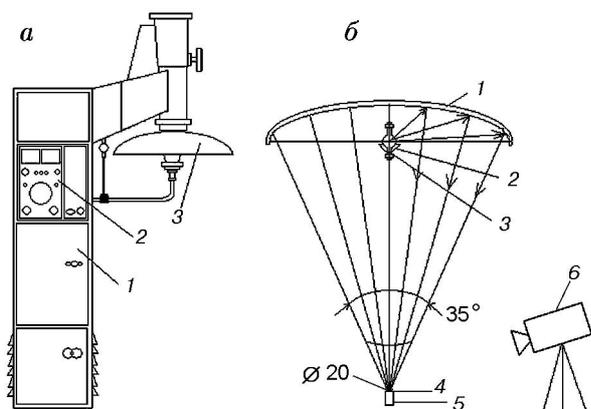


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

а — конструктивное выполнение оптической печи типа «Уран-1»: 1 — блок питания, 2 — пульт управления, 3 — излучатель; б — оптический излучатель: 1 — отражатель, 2 — контролтражатель, 3 — лампа, 4 — рабочее пятно, 5 — образец древесины, 6 — тепловизор

чение 48 ч. Неизменная влажность образцов обеспечивалась с помощью эксикатора, наполненного силикагелем. Для исследования влияния начальной температуры образца на время воспламенения высушенные сосновые образцы предварительно нагревали в сушильном шкафу около 1 ч при температуре 373 К. Влажность образцов определяли при помощи анализатора влажности A&D MX-50 с точностью 0.01 %.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ПОТОКОМ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ

На рис. 2 приведены зависимости времени воспламенения от плотности потока лучистой энергии для древесины березы, кедра, лиственницы, осины и сосны с начальной температурой  $T_{in} = 297$  К и влажностью  $1.5 \pm 0.4$  %. Видно, что при возрастании плотности потока излучения время задержки воспламенения опытных образцов сокращается. Время воспламенения древесины увеличивается по следующему ряду: кедр, лиственница, осина, сосна, береза. При уменьшении плотности потока ниже  $100 \text{ кВт/м}^2$  период воспламенения начинает быстро увеличиваться и возгорание материала становится маловероятным.

Под действием потока лучистой энергии происходит газификация древесины, так как при температуре поверхности свыше 573 К преобладает газообразование [9], скорость которого зависит от сорта древесины и плотности потока лучистой энергии. Косвенно о сте-

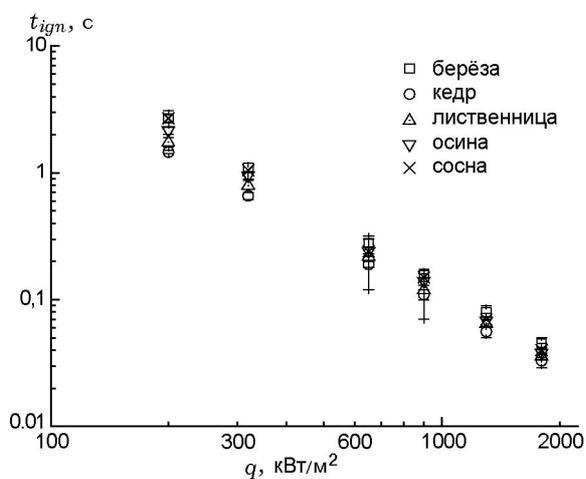


Рис. 2. Зависимость времени воспламенения от плотности потока лучистой энергии для различных образцов древесины

пени газификации можно судить по интенсивности отраженной лучистой энергии в процессе нагрева образца. Если степень газификации характеризуется отношением  $k = J/J_0$ , где  $J_0$  — интенсивность фона, определяемая по отражению излучения от поверхности датчика теплового потока, на поверхность которого нанесена ламповая копоть, а  $J$  — интенсивность отраженного излучения от продуктов газификации древесины и частиц ламповой сажи, то при плотности потока лучистой энергии  $1300 \text{ кВт/м}^2$  имеем:  $k = 1.2 \pm 0.2$  для березы,  $1.8 \pm 0.1$  для осины,  $2.3 \pm 0.5$  для лиственницы,  $3.4 \pm 1.4$  для сосны,  $3.4 \pm 1.5$  для кедра. Видно, что наиболее интенсивно идет газификация кедра и сосны. Слабо газифицируются береза и осина. Это, по-видимому, связано с повышенным содержанием смол в образцах кедра и сосны. Визуальное наблюдение показало, что после воздействия потока лучистой энергии на поверхности погашенных образцов березы образуется плотный и ровный слой углеродистых частиц. Погашенная поверхность образцов сосны волнистая, с неравномерным содержанием углеродистых частиц: на вершине волны повышенное содержание, в нижней части видны осмоленные волокна древесины.

После прекращения воздействия излучения ксеноновой лампы наблюдалось, как правило, погасание древесины. В процессе исследования было проведено 29 испытаний для образцов березы и 38 для образцов сосны. В результате только 0.6 % образцов березы, имеющих начальную температуру  $T_{in} = 297$  К, продолжали гореть в пламенном режиме и столько же в тлеющем. Образцы сосны горели в пламенном режиме в 1.5 % случаев, в тлеющем режиме, продолжавшемся не более 2 мин, — в 0.8 %. Полного сгорания исследуемых образцов в изученных условиях не наблюдалось.

На рис. 3 представлены результаты сравнения времен воспламенения образцов древесины сосны и березы при  $T_{in} = 297$  К и различных влажностях  $w$ . В исследованном диапазоне потоков лучистой энергии увеличение влажности древесины в пределах  $1.2 \div 18$  % приводит к росту времени воспламенения более чем на 50 %. Необходимо отметить, что с повышением влажности древесины существенно возрастает разброс опытных данных по времени воспламенения.

На рис. 4 приведены результаты, полученные в ходе воспламенения древесины сосны с

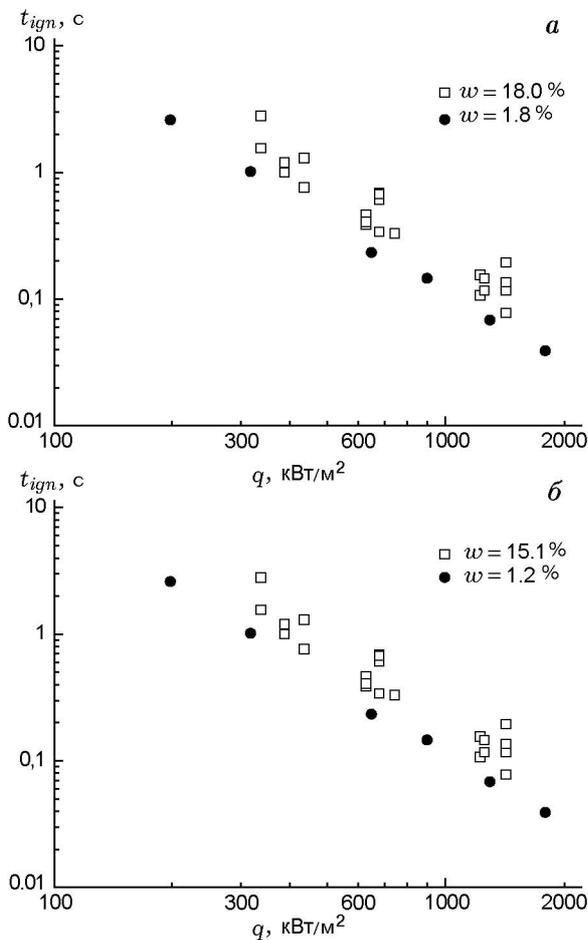


Рис. 3. Зависимость времени воспламенения от плотности потока лучистой энергии для образцов сосны (а) и березы (б) при  $T_{in} = 297$  К и различной влажности  $w$

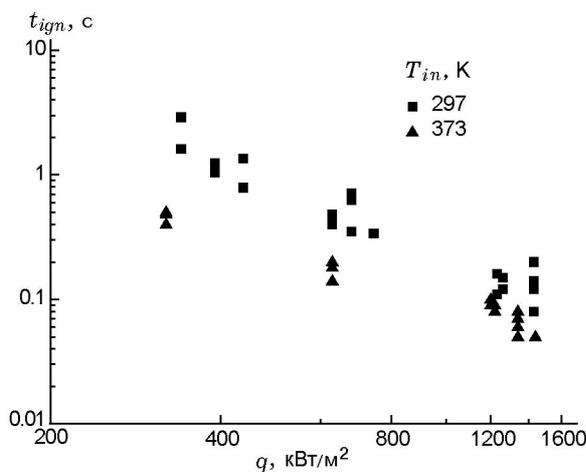


Рис. 4. Зависимость времени воспламенения от плотности потока лучистой энергии для образцов сосны при различной начальной температуре

начальной температурой  $T_{in} = 297$  и  $373$  К и влажностью  $w = 1.8\%$ . Видно, что время воспламенения образцов, предварительно нагретых при температуре  $373$  К, меньше, чем образцов при комнатной температуре. В зависимости от интенсивности теплового излучения повышение начальной температуры образцов от  $297$  до  $373$  К снижает время воспламенения древесины сосны в  $1.5 \div 2$  раза. Можно предположить, что это связано с уменьшением затрат на нагрев образцов сосны и испарение свободной воды. Однако при потоке лучистой энергии свыше  $1400$  кВт/м<sup>2</sup> время воспламенения нагретых и ненагретых образцов отличается незначительно. Видимо, в данном случае поглощенная энергия излучения в прогретом слое образца несоизмеримо больше той энергии, которая была накоплена при предварительном нагреве образцов в печи.

Для определения температуры поверхности образцов сосны и березы были сняты термограммы с помощью тепловизора JADE J530SB и фильтра  $2.5 \div 2.7$  мкм. Обработку термограмм проводили с использованием программного обеспечения Altair 5.60.027. Температуры поверхности образцов определяли осреднением данных на заданной окружности, которая составляла  $\approx 5\%$  от площади образца и располагалась в центре сфокусированного потока. На рис. 5 приведен профиль температуры поверхности образца березы влажностью  $1.2\%$  при  $q = 745$  кВт/м<sup>2</sup> и  $T_{in} = 297$  К.

Из анализа профиля температуры поверх-

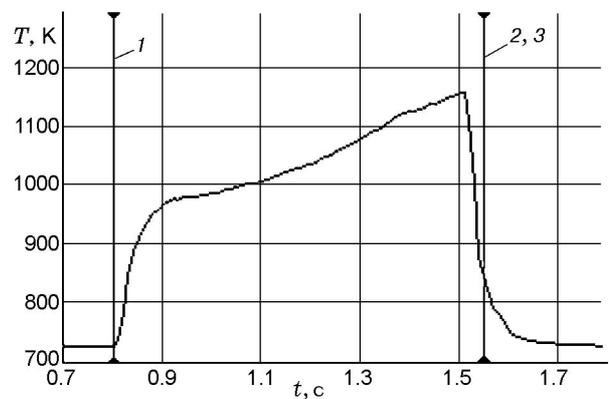


Рис. 5. Профиль температуры поверхности образца березы при воздействии излучения ксеноновой лампы:

1 — начало экспозиции, 2 — время воспламенения, 3 — конец экспозиции

ности и тепловизионной съемки процесса следует, что образец воспламенился после перекрытия затвора оптической печи. Видно, что температура воспламенения 844 К значительно ниже температуры образца во время его нагрева под действием излучения ксеноновой лампы, которая составила  $970 \div 1150$  К. По видимому, на показания тепловизора влияют разогретые продукты пиролиза, экранирующие поверхность образца. Поэтому в настоящей работе, чтобы исключить возможное влияние разогретых продуктов пиролиза и уменьшить погрешности измерений, использовались данные, полученные после перекрытия затвора.

В таблице приведены температуры поверхности воспламенения образцов сосны и березы влажностью  $\approx 1.5\%$  при различных плотностях потока лучистой энергии.

Установлено, что изменение плотности потока лучистой энергии от 438 до  $1420 \text{ кВт/м}^2$  привело к увеличению температуры поверхности воспламенения древесины на  $50 \div 60$  К, причем температура поверхности сосны примерно на  $15 \div 20$  К выше, чем у березы. Этот факт согласуется с результатами экспериментальных работ [10, 11], где отмечено, что температура поверхности воспламенения мягких пород древесины на 50 К выше, чем твердых. Объясняется это различным строением древесины. Как известно, древесина состоит из трех основных компонентов — целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина, каждый из которых имеет свою характерную температуру воспламенения [12]. Более высокая температура воспламенения у лигнина, а самая низкая у гемицеллюлозы. По сравнению с твердыми породами (береза) мягкие породы древесины (сосна) содержат меньшее количество гемицеллюлозы и большее лигнина, что соответственно может привести к повышению температуры поверхности воспламенения сосны по сравнению с бе-

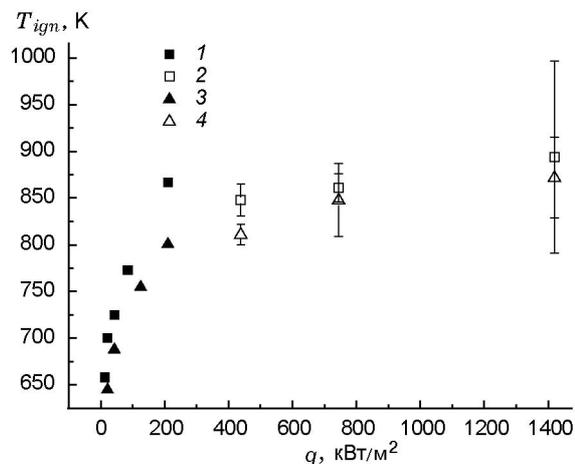


Рис. 6. Сравнение температур поверхности образцов сосны и березы в момент воспламенения:

сосна: 1 — работа [3], 2 — настоящая работа, береза: 3 — работа [3], 4 — настоящая работа

резой при прочих равных условиях.

На рис. 6 сопоставлены полученные в данной работе температуры поверхности образцов древесины сосны и березы (влажностью 1.5 %) в момент воспламенения с данными работы [3] при различных плотностях потока лучистой энергии. Представленные на рисунке результаты не противоречат расчету по тепловой модели из работы [3], где показано, что в диапазоне тепловых потоков  $21 \div 210 \text{ кВт/м}^2$  изменение температуры воспламенения составило для сосны  $700 \div 870$  К и для березы  $650 \div 800$  К.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что после кратковременного воздействия (до 5 с) мощных потоков лучистой энергии (до  $1500 \text{ кВт/м}^2$ ) устойчивое горение или тление древесины сосны и березы маловероятно (менее 2 %).

Кроме того, начальная температура образца влияет на время воспламенения, но с ростом плотности потока лучистой энергии влияние становится незначительным.

Авторы выражают благодарность профессору А. М. Гришину за ценные советы и замечания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Конев Э. В. Физические основы горения растительных материалов. — Новосибирск: Наука, 1977.

Температура поверхности образцов сосны и березы в момент воспламенения потоком лучистой энергии

q, кВт/м²	T <sub>ign</sub> , К	
	сосна	береза
438	848 ± 17	811 ± 11
745	861 ± 15	848 ± 39
1 420	894 ± 103	872 ± 43

2. Babrauskas V. Ignition of wood: a review of the state of the art // J. Fire Protection Eng. — 2002. — V. 12 (Aug). — P. 163–189.
3. Заболотный А. Е., Заболотная М. М., Тимошин В. Н. Определение зон безопасного применения твердотопливных генераторов пожаротушающих аэрозолей // Вопросы специального машиностроения. — 1995. — Вып. 7–8. — С. 15–22.
4. Гришин А. М. Математические модели лесных пожаров. — Томск: Изд-во ТГУ, 1981.
5. Исаков Г. Н. Теплоперенос и воспламенение в гетерогенных системах. — Новосибирск: Наука, 1999.
6. Абдурагимов И. М., Андросов А. С., Бартак М. Воспламенение и горение древесины под влиянием тепловых потоков // Физика горения и взрыва. — 1986. — Т. 22, № 1. — С. 10–13.
7. Лопатина Г. Г., Сосоров В. П. и др. Оптические печи. — М.: Metallurgy, 1967.
8. Соколовский В. Г. Состояние природной среды в СССР в 1988 г. — М.: Госкомприрода СССР, 1989.
9. Shafizadeh F. Utilization of biomass by pyrolytic methods // Joint Forest Biology/Wood Chemistry Mtg., Madison WI. — 1997. — P. 191–199.
10. Fangrat J., Hasemi Y., Yoshida M., Hirata T. Surface temperature at ignition of wooden based slabs // Fire Safety J. — 1996. — N 27. — P. 249–259.
11. Moghtaderi B., Novozhilov V., Fletcher D. F., Kent J. H. A new correlation for bench-scale piloted ignition data of wood // Fire Safety J. — 1997. — N 29. — P. 41–59.
12. Buchanan M. A. The ignition temperature of certain pulps and other wood components // TAPPI. — 1952. — N 35. — P. 209–211.

*Поступила в редакцию 11/1 2010 г.*

---