МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НИИ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ ТГУ

Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики

Международная молодежная научная конференция

17–19 ноября 2014 г., Томск

Издательство Томского университета
2015

ОСОБЕННОСТИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УБЫВАЮЩЕГО ПОТОКА ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ

В.О. Гук, В.Т. Кузнецов, А.И. Фильков, Л.Ю. Катаева

Приводится анализ результатов зажигания образцов древесины сосны уменьшающимся со временем тепловым потоком. Изменение интенсивности теплового потока в процессе опыта осуществлялось путем перемещения исследуемого образца вдоль оптической оси эллиптического отражателя установки. Проведено сравнение полученных данных с данными для постоянного теплового потока.

CHARACTERISTICS OF WOOD IGNITION SUBJECTED TO THE DECREASING RADIANT ENERGY FLUX

V.O. Guk, V.T. Kuznetsov, A.I. Filkov, L.Yu. Kataeva

In this paper we analyzed the ignition of the pine wood samples subjected to the decreasing heat flux. The intensity of the heat flux was changed during the experiment by moving the test sample along the optical axis of the elliptic reflector in the setup. The received data were compared with the data for a static heat flux.

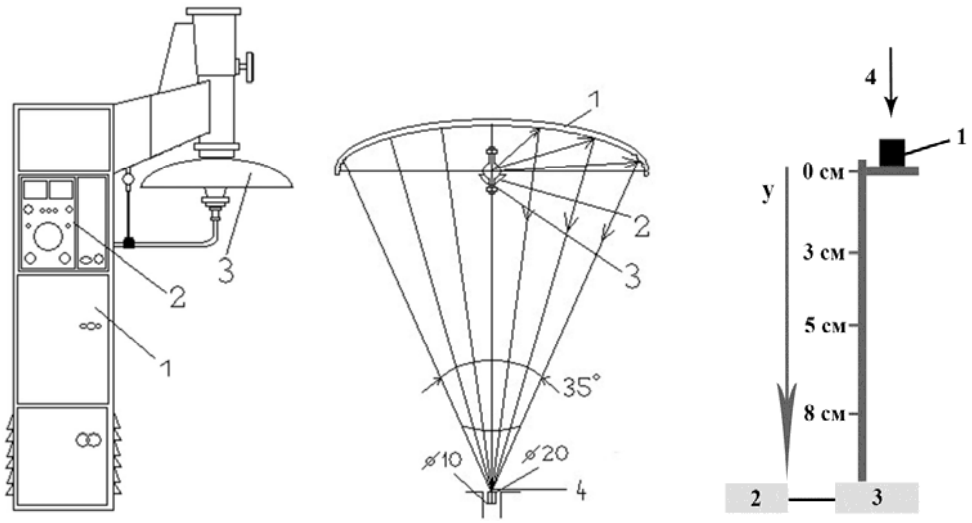
В работе [1] отмечается, что процесс зажигания существенно зависит от типа теплового потока, является ли он статическим или динамическим (когда зажигание горючих материалов происходит при переменных, зависящих от времени значений теплового потока). В последнее время при решении прикладных задач в области пожарной безопасности большое внимание уделяется динамическим режимам зажигания. В реальных условиях динамические режимы наблюдаются во время антропогенных и лесных пожаров. При этом зажигание горючих материалов в динамических условиях изучено недостаточно. Известны лишь отдельные экспериментальные работы [2, 3], где зажигание горючих материалов осуществлялось в динамических условиях подвода тепла. Если учесть, что в реальных условиях преобладает динамический тип теплового потока, то актуальность данной проблемы очевидна.

Для исследования зажигания древесины в динамических условиях была создана экспериментальная установка на базе оптической печи «Уран-1» (рис. 1, *а*, *б*) с источником излучения – ксеноновая лампа мощностью 10 кВт [4].

Из 10 кВт мощности, выделившейся на лампе, 5,5 кВт приходилось на излучение в оптической области. Распределение излучения по спектру составляло: 0,5 кВт (9 %) в ультрафиолетовой части; 2 кВт (36 %) в видимой и 3 кВт (55 %) в инфракрасной части спектра. Установка обеспечивала стабильность излучения во времени не ниже 95 %, равномерность распределения потока лучистой энергии в пятне диаметром $2\cdot10^{-2}$ м не ниже 87 %. Диаметр сфокусированного потока составлял около $2\cdot10^{-2}$ м.

Блок регистрации экспериментальной установки обеспечивал измерения плотности потока лучистой энергии, времени экспозиции, момента появления пламени и контролировал условия проведения опыта. Он включал датчик плотности потока лучистой энергии, фотодиоды, реле времени и светолучевой осциллограф Н-117.

Регулирование плотности лучистого потока в фокальном пятне осуществлялось с помощью ослабителей излучения и путем изменения мощности электрической энергии, подводимой к ксеноновой лампе. Ослабители лучистого потока представляли собой металлическую сетку, которая устанавливалась перпендикулярно оптической оси на расстоянии 0,3–0,4 м от фокальной плоскости. Для защиты исследуемого образца от преждевременного нагрева лучистым потоком и дозированной подачи энергии излучения служит система затворов.



а б с

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* – контротражатель, *3* – лампа, *4* – рабочее пятно; *в* – установка для передвижения образца: *1* – образец, *2* – пульт управления движением площадки с образцом, *3* – механизм, осуществляющий передвижение образца; y=0 см – фокальная плоскость, *4* – лучистый тепловой поток; 3, 5, 8 см – расстояние от фокальной плоскости

Динамический поток моделировался движением образца вдоль оптической оси. Для перемещения образца применялась установка, изображенная на рис. 1, *в*.

Одновременно со временем открытия затвора включался конвейер, и образец начинал перемещаться с постоянной скоростью, равной 0,117 м/с. Время раскрытия (закрытия) затвора составляло $4 \cdot 10^{-2}$ с.

Порядок проведения испытания на установке следующий. В верхней и нижней точках оптической оси измерялась интенсивность лучистого потока с помощью калориметра, закрепленного в держатель. Затем на место калориметра помещался исследуемый образец и проводились испытания. Блок регистрации фиксировал начало раскрытия затвора и момент появления пламени. Зажигание конденсированного вещества определялось по появлению пламени у поверхности образца.

Калориметр представлял собой диск из меди диаметром $1 \cdot 10^{-2}$ м, толщиной $3 \cdot 10^{-3}$ м с термопарой, зачеканенной по центру диска на глубину $1{,}7 \cdot 10^{-3}$ м. Термопара изготовлена контактной сваркой из медной и константановой проволоки диаметром 100 мкм. Приемная поверхность калориметра зачернена ламповой копотью. Значение коэффициента отражения зачерненной поверхности калориметра в области спектра излучения 0,36–1,1 мкм составляло 1,5–2,0 %. Погрешность измерения интенсивности излучения не превышала 10 %. Плотность теплового потока изменяли в пределах 20–110 кВт/м^2.

Для определения плотности лучистого потока экспериментально измеряли темп нагрева медного диска под действием излучения, поступающего к зачерненной поверхности.

Время задержки зажигания определялось фотоэлектрическим методом. За время воспламенения принимался промежуток времени от начала воздействия потока лучистой энергии до момента появления пламени над поверхностью исследуемого образца. Регистрация излучения пламени осуществлялась с помощью фотодиодов. За-

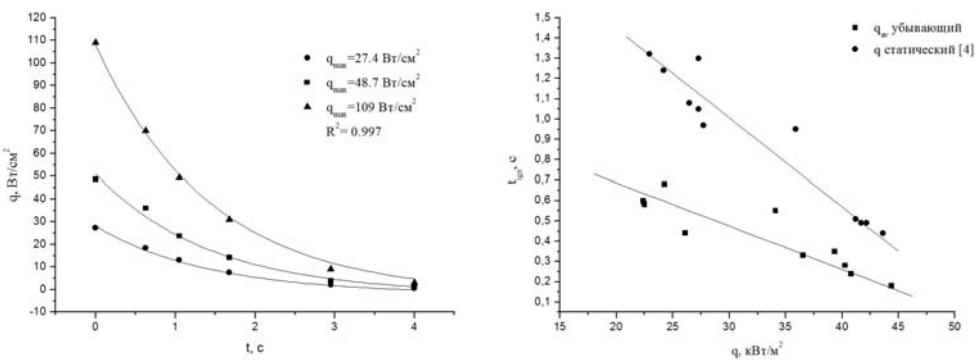
пись электрических сигналов проводилась на осциллографе Н-117/1. Погрешность измерения времени воспламенения по появлению пламени не превышает 4 % и в основном определяется физико-химическими свойствами исследуемого вещества.

В качестве исследуемых образцов использовалась древесина сосны. Образцы представляли собой цилиндры диаметром $1{,}9\cdot10^{-2}$ м и высотой $1{,}5\cdot10^{-2}$ м. Поверхность образцов, поглощающая излучение, покрывалась ламповой копотью. Световое излучение поступало на образцы перпендикулярно волокнам древесины. Начальная температура образцов соответствовала комнатной – 297 К. Влажность образцов составила 1,8 % и определялась при помощи анализатора влажности A&D MX-50 с точностью 0,01 %. Постоянная влажность образцов поддерживалась путем помещения их в эксикатор, заполненный силикагелем.

В данной работе приводится анализ результатов зажигания образцов древесины уменьшающимся со временем лучистым тепловым потоком. Для сравнения времен задержки зажигания в статических и динамических условиях тепловой поток в динамических условиях осреднялся. При этом использовали следующую методику. Измеряли с помощью микрокалориметра на фиксированных расстояниях от фокальной плоскости отражателя интенсивность потока излучения. При известной скорости перемещения образца вдоль оптической оси эллиптического отражателя можно перейти от фиксированных значений расстояния ко времени. Построенные таким образом зависимости теплового потока от времени достаточно хорошо (с корреляцией R^2=0,997) аппроксимируются функцией (рис. 2, *а*)

$$q = ae^{-0.7t} - 2\,, \tag{1}$$

где q – тепловой поток, Вт/м^2; t – время, с; a – безразмерный коэффициент.



а) б)

Рис. 2. Зависимость теплового потока от времени при удалении образца от фокальной плоскости (*а*); *б* – сравнение зависимостей времен задержки зажигания образцов сосны от теплового потока для динамических и статических условий [4]

Таким образом, в зависимости от величины теплового потока в фокальной плоскости (t=0) можно по формуле (1) определить коэффициент a и динамику изменения теплового потока на поверхности движущегося образца. Измерение времени задержки зажигания осуществляли с помощью фотодиода по появлению пламени. Зная время задержки зажигания образца, можно найти тепловой поток в момент за-

жигания, используя кривую распределения $q(t)$. Так как в исследуемом диапазоне теплового потока зажигание образца сосны происходило в пределах одной секунды, то из рис. 2, *а* можно видеть, что кривая имеет в этом диапазоне квазилинейный характер. В связи с этим средний тепловой поток для динамических условий определялся как среднеарифметическое.

На рис. 2, *б* представлено сравнение времен задержки зажигания образцов сосны при динамических ($q=f(t)$) и статических (q=const) [4] условиях подвода тепла. Так, для образцов сосны при убывающем потоке излучения время задержки зажигания в 2–2,5 раза меньше, чем для постоянного потока. При этом из рис. 2, *б* видно, что с уменьшением величины теплового потока время задержки зажигания в статических условиях растет быстрее, чем для динамических условий. Необходимо отметить, что при сравнении времен зажигания в условиях динамического и статического теплового потока в данной работе динамический режим определяется величиной среднего теплового потока в процессе опыта.

Из физических соображений следует, что если в условиях опыта время зажигания существенно меньше времени тепловой релаксации в исследуемом материале, то в условиях динамического подвода лучистой энергии на поверхности образца формируется прогретый слой, глубина которого меньше, чем в условиях статического теплового потока. И на прогрев данного слоя необходимо затратить меньше энергии для реализации условий воспламенения древесины. Оценка времени тепловой релаксации древесины сосны дает следующее значение:

$$t_r \approx \frac{a}{u^2} = 1{,}84 \cdot 10^3 \text{ с}, \qquad (2)$$

где a – температуропроводность древесины сосны, $1{,}84 \cdot 10^{-7}$ м^2/с [5]; u – нормальная скорость горения, 10^{-5} м/с [6]. Видно, что релаксационные процессы распространения тепла в древесине происходят значительно медленнее, чем процесс воспламенения для рассмотренных тепловых потоков. При этом градиент температуры на поверхности образца в условиях динамического режима, как правило, выше, чем в статическом, т.е. температура поверхности достигает своего критического значения быстрее, чем в условиях статического режима. Следовательно, при одинаковом тепловом потоке время зажигания в динамическом режиме должно быть меньше, чем в статическом. С ростом величины потока лучистой энергии разница во времени задержки зажигания уменьшается для динамических и статических условий (см. рис. 2, *б*), что подтверждает сделанное предположение. Кроме того, полученные результаты не противоречат работе [7], где в результате математического моделирования показано, что в случае убывающего теплового потока время задержки зажигания древесины меньше, чем при постоянном потоке.

В результате проделанной работы были получены времена задержки зажигания древесины сосны при нагреве в условиях убывающего теплового потока и сравнение полученных данных для постоянного теплового потока. Следующим этапом данной работы являются исследование особенностей зажигания при возрастающем тепловом потоке и анализ данных. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения прогнозирования опасных зон зажигания древесины при природных и техногенных пожарах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-33-50115-мол-нр.

Литература

1. *Filkov A.I., Kuznetsov V.T., Guk V.O. et al.* Ignition of Wood Under Dynamic Conditions of Supply of Radiant Energy Flow // Proceedings of the 4th Fire Behavior and Fuels Conference (Saint-Petersburg, Russia, July 1–4, 2013). USA. IAWF. 2013. P. 57.
2. *Розенбанд Р.Ш., Барзыкин В.В., Мержанов А.Г.* // Физика горения и взрыва. 1968. Т. 4, вып. 2. С. 171–175.
3. *Еналеев Р.Ш., Матеосов В.А., Синаев К.Н. и др.* // Физика горения и методы ее исследования. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1973. С. 80–86.
4. *Кузнецов В.Т., Фильков А.И.* // Физика горения и взрыва. 2011. Т. 47, вып. 1. С. 74–79.
5. *Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б.* Горение древесины и ее пожароопасные свойства. М.: Академия ГПС МЧС России, 2010. 262 с.
6. *Абдурагимов И.М., Андросов А.С., Бартак М.* // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, вып. 1. С. 10–13.
7. *Еналеев Р.Ш., Красина И.В., Гасилов В.С. и др.* // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, вып. 10. С. 99–106.

ПОВЕДЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТИПА МАТРИЦА – ВКЛЮЧЕНИЕ

О.С. Зиновьева, В.С. Шахиджанов

Обсуждается влияние внутренней структуры на рельеф поверхности деформируемого материала на примере модельной системы «матрица – включение». Установлены зависимости формы и амплитуды поверхностного деформационного рельефа от ориентации и расположения единичного включения относительно свободной поверхности, а также от соотношения упругих свойств включения и матрицы.

SURFACE DEFORMATION BEHAVIOR OF A SINGLE INCLUSION MODEL

O.S. Zinovieva, V.S. Shakhijanov

In this contribution, the influence of internal structure on surface roughening is discussed, using a model of a single inclusion embedded in a matrix as an example. The surface roughness shape and amplitude are established to be dependent on the inclusion orientation and location relative to the free surface and inclusion-to-matrix elastic modulus ratio.

Цель работы – изучить влияние внутренней структуры на формирование поверхностного деформационного рельефа на примере модельной системы «матрица – включение».

Стоит отметить, что задача «матрица – включение» в различных вариациях решалась много раз (см., например, [1]), но при этом смещения и деформацию на свободной поверхности в исследованиях игнорировали. В цикле работ авторов по тематике «Исследование деформационного рельефа» (см., например, [2, 3]), а также во многих других работах (см., например, [4]) численные исследования проводились с помощью достаточно сложных моделей. Для полного понимания процессов и механизмов возникновения рельефных образований, связанных с внутренней неоднородностью, было решено провести исследования на простых модельных системах, позволяющих исключить влияние множества параметров, присутствующих в сложных моделях.

Задача об одноосном растяжении двумерных (2D) и трехмерных (3D) образцов, содержащих единичные включения квадратной / кубической и сферической формы (рис. 1), решалась методами конечных разностей и конечных элементов соответственно. Математическая постановка плоской задачи в деформациях приведена в [5].