

докт. техн. наук **Чумаченко С.Н./ Chumachenko S.N., Ph.D.**<sup>1</sup>  
канд. техн. наук **Жартовский С.В./ Zhartovskiy S.V., Ph.D.**<sup>1</sup>  
канд. техн. наук **Титенко А.Н./ Titenko A.N., Ph.D.**<sup>1</sup>

Przyjęty/Accepted/Принята: 19.10.2016;  
Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 06.12.2016;  
Opublikowany/Published/Опубликована: 30.12.2016;

## **Методика создания математической модели энергетической составляющей химико-физических процессов, которые происходят в древесине при ее нагревании до начала фазы пламенного горения<sup>2</sup>**

### **Methods of Creating a Mathematical Model of an Energy Component of Chemical and Physical Processes that Occur in Wood When It Is Heated Prior To the Flaming Phase**

#### **Metodyka opracowania modelu matematycznego składnika energetycznego procesów chemiczno-fizycznych, które zachodzą w drewnie podczas jego nagrzewania do momentu nastąpienia spalania płomieniowego**

#### **АННОТАЦИЯ**

**Цель.** Целью данной работы является создание методики математического моделирования энергетической составляющей химико-физических процессов, которые происходят в древесине при её нагревании до наступления фазы пламенного горения, что даст возможность определить влияние введения антипиренов в поверхностные слои деревянных строительных конструкций на торможение процесса загорания (воспламенения) древесины.

**Методология.** Используя экспериментальные данные о развитии во времени химико-физических процессов (дериватограмм и данных газохроматографического анализа термодеструкции образца материала), которые происходят при нагревании древесины до момента её воспламенения, находятся формулы аппроксимаций, описывающих зависимости относительного количества веществ, которые выделяются в процессе термолитического разложения во времени. На основании определенных зависимостей в дальнейшем находятся зависимости накопленной искомой энергии, которая выделяется при образовании каждого вещества (вследствие нагревания образца древесины), от температуры, и общую выделенную накопленную искомую энергию. В дальнейшем определяется накопленная искомая энергия всех компонентов и их превращений, с учетом поглощения и выделения энергии от температуры. Вводится понятие эффективной искомой теплоемкости процесса превращений образца древесины (в температурных пределах данного исследования) с учетом всех компонентов и их структурных превращений, имеющих место при нагревании. Решается одномерная задача распространения тепла в изотропном твердом теле, имеющая переменную, зависящую от температуры эффективную теплоемкость. Получены формулы для элементарного объема, размещенного непосредственно на поверхности образца древесины, внутри его и на тыльной стороне.

**Результаты.** Используя представленную методику, была построена математическая модель энергетической составляющей химико-физических процессов, которые имеют место в образце заболони сосны толщиной 10 мм, плотностью 400-550 кг/м<sup>3</sup>, при его нагревании до наступления фазы пламенного горения.

**Выводы.** Представленная методика предоставляет возможность спрогнозировать необходимое количество антипиренов (для различных огнезащитных пропиточных составов), которое требуется ввести в поверхностные слои древесины (разной породы, толщины, плотности, качества поверхностной обработки и т.п.) для обеспечения продления промежутка времени от начала теплового воздействия до момента воспламенения.

**Ключевые слова:** огнезащитная древесина, фаза пламенного горения, антипирены, математическое моделирование, химико-физические процессы

**Вид статьи:** оригинальная научная работа

<sup>1</sup> Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты / Ukrainian Research Institute of Civil Protection; e-mail: zhart20@ukr.net;

<sup>2</sup> Авторы внесли одинаковый вклад в создание данной статьи / The authors contributed equally to this article;

## ABSTRACT

**Aim:** The purpose of this article is to create a method of mathematical modeling of an energy component of chemical and physical processes that occur in wood when it is heated prior to the flaming phase. This method will make it possible to determine the impact of using flame retardants in the surface layers of wooden building constructions on the processes of wood inflammation.

**Methodology:** Using experimental data regarding the development in time of chemical and physical processes (derivatograms and data of gas chromatographic analysis of sample material during thermal degradation) that occur during heating of wood prior to its ignition, approximation formulas were obtained. These formulas describe the relationship between the amount of substance emitted in the thermolysis process. Based on the obtained data, we then obtain dependencies between the desired stored energy which is released during the formation of each substance (as a result of heating wood samples) and the temperature, as well as the accumulated total desired energy. Subsequently the required cumulative energy of all components and their transformations is determined, taking into account the absorption and release of energy generated by the temperature. Introduced is the concept of effective heat capacity of the transformation process of a sample piece of wood (within the temperature range of this study) including all the components and their structural transformations that occur during the heating process. Then a one-dimensional problem is solved of heat spread in an isotropic solid, taking into account a variable, effective heat capacity that depends on temperature. Formulas were obtained for the elementary volume, placed directly on the surface of the wood sample, as well as inside it and in the back.

**Results:** Using the presented methodology we obtain a mathematical model of an energy component of chemical and physical processes that take place in a sample of pine wood (10 mm thick, density 400-550 kg/m<sup>3</sup>), when it is heated prior to the flaming phase.

**Conclusions:** The presented method presents the ability to predict the required amount of flame retardants (for a variety of fire-retardant impregnating compositions) to be entered into the outer layers of wood (different species, thickness, density, quality of surface treatment, etc.) to ensure the extension of the time period from the heat exposure point until the ignition point.

**Keywords:** wood protected against inflammation, flaming phase, flame retardants, mathematical modeling, chemical and physical processes

**Type of article:** original scientific article

## ABSTRAKT

**Cel:** Celem pracy jest opracowanie metodyki modelowania matematycznego składnika energetycznego procesów chemiczno-fizycznych, które zachodzą w drewnie podczas jego nagrzewania przed nastąpieniem fazy spalania płomieniowego. Metodyka ta pozwoli określać wpływ zastosowania antypirenow w warstwie powierzchniowej drewnianych obiektów budowlanych na inhibicję procesów zapłonu drewna.

**Metodologia:** Wykorzystując dane eksperymentalne na temat rozwoju w czasie procesów chemiczno-fizycznych (dane z termogramów i analizy chromatografii gazowej degradacji termicznej próbki materiału), które zachodzą podczas nagrzewania drewna do momentu jego zapłonu, otrzymano wzory aproksymacji, opisujące zależności między ilością substancji wydzielających się w procesie termolizy.

Na podstawie określonych danych następnie otrzymywane są zależności między nagromadzoną poszukiwaną energią, która wydziela się przy powstawaniu każdej substancji (wskutek nagrzewania próbki drewna) a temperaturą, oraz ogólna wartość wydzielanej zgromadzonej energii. Następnie określa się zgromadzoną poszukiwaną energię wszystkich składników i ich przemiany/transmutacji, z uwzględnieniem pochłaniania i wydzielenia energii wytwarzanej przez temperaturę. Wprowadza się pojęcie poszukiwanej efektywnej pojemności cieplnej procesu transmutacji próbki drewna (w zakresach temperatury objętych badaniem) z uwzględnieniem wszystkich składników i zmian zachodzących w ich strukturze podczas nagrzewania. Rozwiązano jednomiarowe zadanie rozprzestrzeniania ciepła w izotropowym ciele stałym, uwzględniające zmienną, zależną od temperatury pojemność cieplną. Otrzymano równania dla objętości elementarnej, bezpośrednio na powierzchni próbki drewna, w środku próbki i z tyłu.

**Wyniki:** Wykorzystując przedstawioną metodykę, opracowano model matematyczny składnika energetycznego procesów chemiczno-fizycznych, które zachodzą w drewnie sosny o grubości 10 mm, gęstości 400-550 kg/m<sup>3</sup>, podczas jego nagrzewania do nastąpienia fazy spalania płomieniowego.

**Wnioski:** Przedstawiona metodyka ukazuje możliwość prognozy potrzebnej ilości antypirenow (dla różnych ogniochronnych środków impregacyjnych), które należy wprowadzić do warstw zewnętrznych drewna (różnego gatunku, grubości, gęstości, jakości obróbki powierzchniowej itd.) w celu wydłużenia czasu od momentu rozpoczęcia oddziaływania cieplnego do momentu zapłonu.

**Słowa kluczowe:** drewno chronione przed zapaleniem, spalanie płomieniowe, antypireny, modelowanie matematyczne, procesy chemiczno-fizyczne

**Typ artykułu:** oryginalny artykuł naukowy

## 1. Введение

Анализ мировых тенденций использования экологически безопасных материалов в строительстве свидетельствует о том, что древесина была и остается популярным строительным материалом. Но при этом следует помнить, что древесина является горючим материалом, а продукты её термодеструкции являются чрезвычайно токсичными. Статистический анализ, выполненный в Научно-исследовательском институте пожарной охраны (СССР, Россия), свидетельствует о том, что в XX веке в более, чем 70% случаев на пожарах именно древесина была основным горючим материалом, а количество погибших от общего количества погибших на пожарах составляет 92%. Естественно такой статистикой нельзя довольствоваться, особенно когда речь идет об объектах с массовым пребыванием людей и/или объектах критической инфраструктуры. Следовательно, не теряет актуальность вопрос об качественной огнезащите древесины, которая входит в состав строительных конструкций [1-2].

Для создания соответствующих мероприятий и средств огнезащиты нужно иметь представление о сложном химико-физическом процессе развития пожара и характере его действия на различные объекты. В общем случае эти процессы описываются полной системой уравнений Навье-Стокса [3]: уравнением энергии (включает в себя перенос энергии за счет конвективных процессов, теплопроводности, излучения, диффузии, химических реакций горения пожарной нагрузки), уравнением неразрывности, диффузии, состояния и теплообмена. В связи с неопределенностью ряда предельных условий процесса развития пожара и трудностью учета всех значимых факторов, в том числе с сложностью описания и учета составляющей химической превращений продуктов горения, точное решение указанной системы уравнений является сложнейшей научной проблемой, особенно в контексте решения практических задач по переводению древесины из группы легко воспламеняемых материалов в группу трудно воспламеняемых или трудногорючих материалов.

Целью данной работы является создание методики математического моделирования энергетической составляющей химико-физических процессов, которые происходят в древесине при её нагревании до наступления фазы пламенного горения, что даст возможность определить влияние введения антипиренов в поверхностные слои деревянных строительных конструкций на торможение процесса загорания (воспламенения) древесины.

## 2. Методика исследования

Методика состоит из следующих этапов.

Этап 1. Используя экспериментальные данные [4] о развитии во времени химико-физических процессов, которые происходят при нагревании древесины до момента её воспламенения, находим формулы аппроксимаций, описывающих зависимости относительного количества веществ, которые выделяются в процессе термолиза во времени. Интересующий нас участок термограммы, построенной на основе экспериментальных данных и приведенной в [4], показан на рис. 1.

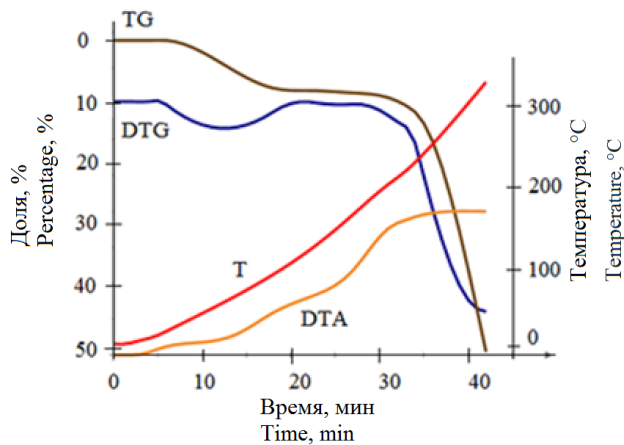


Рис. 1. Термограмм нагрева образца неогнезащитенной древесины (заболонь сосны, плотность – 400-550 кг/м<sup>3</sup>) [4]

Fig. 1. Heating thermogram of a non-fire-resistant wood sample (pine sapwood, density – 400-550 kg/m<sup>3</sup>) [4]

Используя результаты измерения выхода летучих веществ [4], получаем формулы аппроксимаций зависимостей накопленной массы веществ от времени нагревания. Принимая во внимание специфический характер исследуемых функциональных зависимостей, особенностью которых являются резкие скачки производных в близко размещенных точках, представляется очень неудобным аппроксимирование с использованием полиномиальной или других видов регрессии. Поэтому выбран метод кубической сплайн интерполяции, который генерирует кривые сплайна, которые приближаются к прямой линии, как метод, имеющий хорошие аппроксимирующие свойства и наиболее точное, для данного случая, отображение реальных зависимостей [5]. Результаты аппроксимаций представлены на рис. 2.

Этап 2. Объединяя термограммы (зависимость потери массы образца TG, соответствующее этому моменту температуре T, см. рис. 1) и результаты аппроксимации (см. рис. 2) находим зависимости накопленной массы летучих веществ от температуры нагревания (рис. 3).

Этап 3. Используя найденные зависимости количества различных веществ от температуры в условиях процесса изобарического нагревания, определяем с учётом энтальпии образования каждого из этих веществ [6], зависимо-

сти накопленной искомого энергии, которая выделяется при образовании каждого вещества (вследствие нагревания образца древесины), от температуры (1), и общую (2) выделенную накопленную искомого энергию согласно формул:

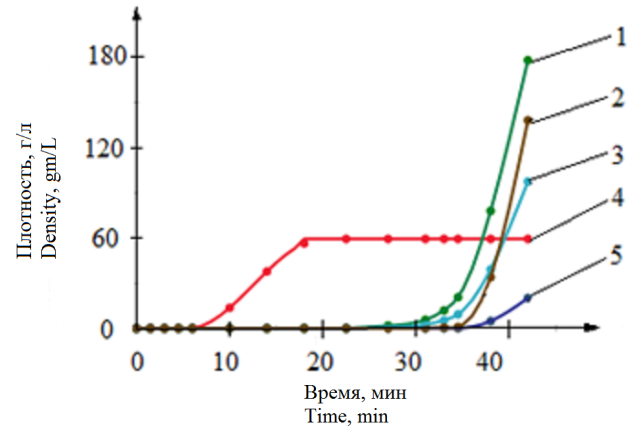


Рис. 2. Зависимость накопленного количества веществ, которые выделились из единичного объема образца незащищенной древесины от времени нагревания. Кривая 1 – диоксид углерода. 2 – Метан. 3 – Монооксидуглерода. 4 – Водяной пар. 5 – Водород.

Fig. 2. The dependence between the accumulated amount of substances, emitted from a single sample of non-fire-resistant wood and the heating time. Curve 1 – Carbon dioxide. 2 – Methane. 3 – Carbon monoxide. 4 – Water vapour. 5 – Hydrogen.

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

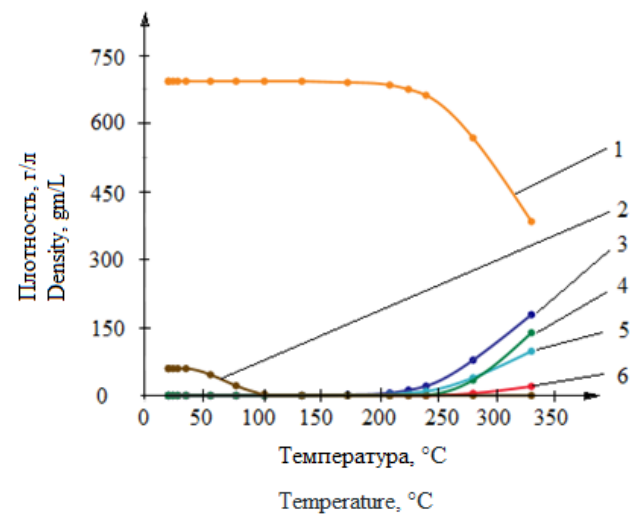


Рис. 3. Зависимость накопленного количества веществ, которые выделяются из единичного объема образца древесины от температуры. Кривая 1 – Целлюлоза. 2 – Водяной пар. 3 – Диоксид углерода. 4 – Метан. 5 – Монооксидуглерода. 6 – Водород

Fig. 3. The dependence between the accumulated amount of substances, emitted from a single sample volume of wood, and the temperature. Curve 1 – Cellulose. 2 – Water vapor. 3 – Carbon dioxide. 4 – Methane. 5 – Carbon monoxide. 6 – Hydrogen

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

$$A_i(T_{pr}) = \frac{1}{v} \cdot \frac{\Delta H_i}{mol_i} \cdot m_i(T_{pr}), \text{ (Дж/куб. м),} \quad (1)$$

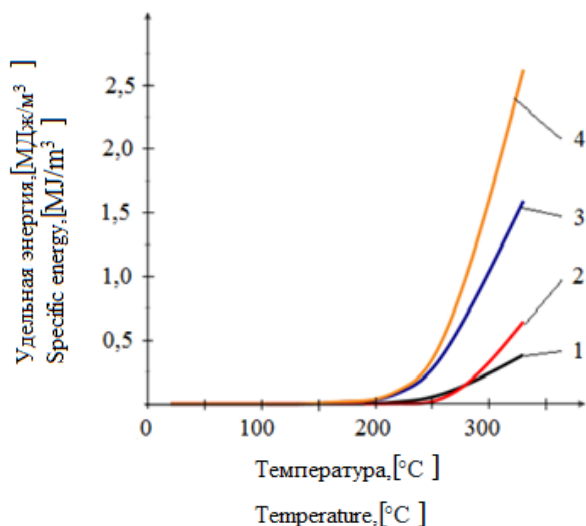
где,  $v$  – единичный объем образца древесины, из

которого выделяются летучие вещества разложения древесины при нагревании,

$\Delta H_i$  – энтальпия образования  $i$  – го компонента,  
 $mol_i$  – молекулярная масса  $i$  – го компонента,  
 $m_i(T_{pr})$  – масса  $i$  – го компонента, которая определяется температурой процесса,  
 $T_{pr}$  – температура процесса.

$$A(T_{pr}) = \sum_{i=1}^n A_i(T_{pr}), \text{ (Дж/куб. м)} \quad (2)$$

Результаты расчетов графически представлены на рис. 4 (кривые 1-3 согласно формулы (1), кривая 4 согласно формулы 2 (2)).



**Рис. 4.** Зависимость накопленной искомой энергии, которая выделяется при образовании летучих компонентов разложения древесины при нагревании. Кривая 1 – Монооксидуглерода. 2 – Метан. 3 – Диоксид углерода. 4 – Суммарная величина искомой энергии

**Fig. 4.** The dependence between the desired accumulated energy, which is released during the formation of the volatile components of wood decomposition and the heating. Curve 1 – Carbon monoxide. 2 – Methane. 3 – Carbon dioxide. 4 – The total value of desired energy

**Источник:** Собственная разработка.  
**Source:** Own elaboration.

При нагревании имеет место нагрев всех веществ (продуктов) разложения древесины. Величина этой накопленной энергии для условий процесса изобарического нагревания, согласно [7], определяется по формулам:

$$B_i(T_{pr}) = \frac{1}{v} \cdot c_i \cdot m_i(T_{pr}), \text{ (Дж/куб. м)} \quad (3)$$

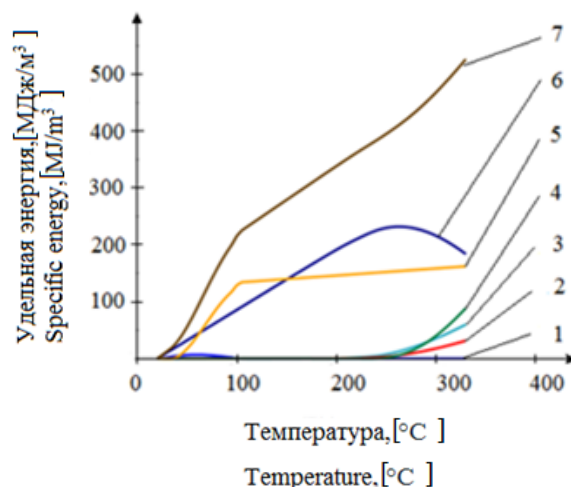
где,  $v$  – единичный объем образца древесины, из которого выделяются летучие продукты разложения древесины при нагревании,

$c_i$  – искомая теплоемкость  $i$  – го компонента,  
 $m_i(T_{pr})$  – масса  $i$  – го компонента, которая определяется температурой процесса,  
 $T_{pr}$  – температура процесса.

$$B(T_{pr}) = \sum_{i=1}^n B_i(T_{pr}), \text{ (Дж/куб. м)} \quad (4)$$

Результаты расчетов графически представлены на рис. 5 (кривые 1-6 согласно формулы (3), кривая 7 согласно формулы (4)).

Этап 4. В дальнейшем определяется накопленная искомая энергия всех компонентов и их превращений, с учетом поглощения и выделения энергии, которые име-



**Рис. 5.** Зависимость накопленной искомой энергии, которая поглощается при образовании летучих компонентов разложения древесины в процессе нагревания. Кривая 1 – Вода. 2 – Монооксидуглерода. 3 – Диоксид углерода. 4 – Водород. 5 – Водяной пар. 6 – Целлюлоза. 7 – Суммарная искомая энергия всех веществ.

**Fig. 5.** The dependence of desired accumulated energy that is absorbed during the formation of the volatile components in the wood sample during heating. Curve 1 – Water. 2 – Carbon monoxide. 3 – Carbon dioxide. 4 – Hydrogen. 5 – Water vapor. 6 – Cellulose. 7 – The total desired energy of all substances

**Источник:** Собственная разработка.  
**Source:** Own elaboration.

ют место при нагревании образца древесины, от температуры. Расчеты ведутся по формуле:

$$E(T_{pr}) = -A(T_{pr}) + B(T_{pr}), \text{ (Дж/м}^3\text{)} \quad (5)$$

Графически эта зависимость имеет вид кривой 1 на рис. 6.

Введем понятие эффективной (или суммарной) искомой теплоемкости процесса превращений образца древесины (в температурных пределах данного исследования) с учетом всех разом взятых компонентов и их структурных превращений, имеющих место при нагревании. Эта величина (с достаточной для поставленной задачи точностью) является аналогом искомой теплоемкости исследуемого материала (образца древесины). Она учитывает выделение и поглощение энергии образца древесины при соответствующих температурах процесса. Определяется эффективная теплоемкость как производная от  $E(T_{pr})$ :

$$c_{p\_wood}(T_{pr}) = \frac{d(E(T_{pr}))}{dT_{pr}}, \text{ (Дж/К*м}^3\text{)} \quad (6)$$

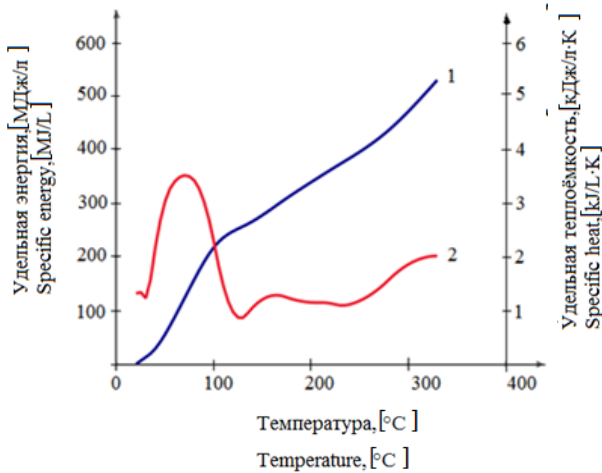
где,  $E(T_{pr})$  – накопленная искомая энергия, согласно формулы (5),

$T_{pr}$  – текущее время процесса.

Поведение этой функции проиллюстрировано на рис. 6 (кривая 2).

Этап 5. Находим математическое описание энергетической составляющей химико-физических процессов, которые проходят в образце древесины при его нагревании до наступления фазы пламенного горения. Для этого решается одномерная задача распространения тепла в изотропном твердом теле, имеющая переменную, зависящую от температуры эффективную теплоемкость, ко-





**Рис. 6.** Зависимость искомых энергетических характеристик процесса нагревания образца древесины от температуры. Кривые: 1- зависимость суммарной накопленной поглощенной искомой энергии от температуры; 2 – зависимость эффективной теплоемкости всех компонентов и их превращений, имеющих место при нагревании образца древесины, от температуры

**Fig. 6.** The dependence of the required energy characteristics of wood sample heating process on temperature. Curves: 1-dependence of the total required accumulated energy absorbed on temperature; 2 - the dependence of the effective heat capacity of all components and their transformations, that occur during heating of the wood sample, on temperature

**Источник:** Собственная разработка.  
**Source:** Own elaboration.

торию определили по формуле (6), что проиллюстрировано на рис. 6 (кривая 2). Уравнение теплопроводности (согласно [8]), для нашего случая будет иметь вид:

$$c_{p\_wood}(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \text{ (Дж/с)} \quad (7)$$

где,  $c_{p\_wood}(T)$  – эффективная теплоёмкость образца древесины, согласно (6), (Дж/К\*м<sup>3</sup>),  
 $T$  – текущая температура процесса, (К),

$\chi$  – коэффициент теплопроводности древесины, (Вт/м\*К).

Начальные и граничные условия для нашего случая:

$$T(x, t = 0) = 20^\circ\text{C}$$

$$\chi \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \omega \quad (8)$$

где,  $\omega$  – внешний поток тепла (Вт/м<sup>2</sup>).

Учитывая поведение функции  $c_{p\_wood}(T)$ , эффективной теплоемкости древесины (см. рис. 6, кривая 2), для решения поставленной задачи применим метод приближенной численной итерации по схеме конечных разностей первого порядка согласно [9]. Расчет ведется в двухмерном пространстве дискретных координат времени с индексом  $i$  и линейной пространственной координаты с индексом  $j$ . Критерием достоверности расчетных результатов считается относительная погрешность при сравнении двух результатов расчетов при уменьшении элементарного прироста времени и линейной координаты. Диаграмма итерационных формул приведена на рис. 7.

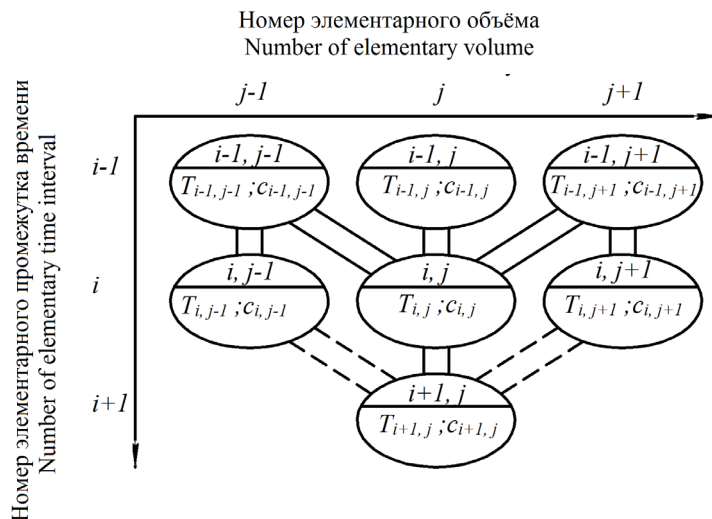
В узлах диаграммы, каждый из которых представляет собой определенный элементарный объем  $j$  образца древесины, взятый в определенный момент времени  $i$ , указаны следующие параметры элементарного объема:  $i, j$  – номер узла;  $T_{i,j}$  – температура;  $c_{i,j}$  – эффективная теплоёмкость элементарного объема в момент времени  $i$ .

Таким образом, согласно принятого алгоритма расчета, получаем следующие формулы для элементарного объема, размещенного непосредственно на поверхности образца древесины:

$$T_{i,1} = T_{i-1,1} + \omega \cdot \Delta t - \frac{\chi \cdot S \cdot (T_{i-1,1} - T_{i-1,2}) \cdot \Delta t}{c_{p\_wood}(T_{i-1,1}) \cdot S \cdot \Delta x} \quad (9)$$

Для промежуточных значений температуры элементарных объемов, которые размещены внутри массива материала:

$$T_{i,j} = T_{i-1,j} + \frac{\chi \cdot S \cdot \left( \frac{T_{i-1,j-1} - T_{i-1,j}}{\Delta x} - \frac{T_{i-1,j} - T_{i-1,j+1}}{\Delta x} \right) \cdot \Delta t}{c_{p\_wood}(T_{i-1,j}) \cdot S \cdot \Delta x} \quad (10)$$



**Рис. 7.** Диаграмма расчета по итерационным формулам  
**Fig. 7.** The diagram of the iterative formulas calculation

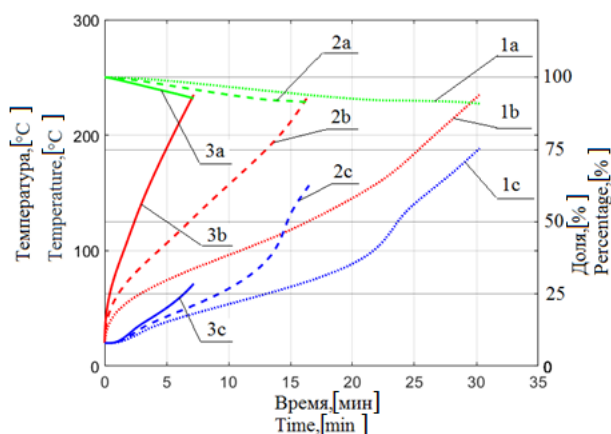
**Источник:** Собственная разработка.  
**Source:** Own elaboration.

Для обратной стороны образца древесины, который не нагревается внешним источником тепла:

$$T_{i,j\_lim} = T_{i-1,j\_lim} + \frac{\chi \cdot S \cdot \left( \frac{T_{i-1,j\_lim-1} - T_{i-1,j\_lim}}{\Delta x} \right) \cdot \Delta t}{c_{p\_wood}(T_{i-1,j\_lim}) \cdot S \cdot \Delta x} \quad (11)$$

### 3. Результаты и их обсуждение

Используя представленную методику, была построена математическая модель энергетической составляющей химико-физических процессов, которые имеют место в образце неогнезащитенной древесины (заболони сосны толщиной 10 мм, плотностью 400-550 кг/м<sup>3</sup>) при его нагревании до наступления фазы пламенного горения.



**Рис. 8.** Результаты расчетов основных характеристик процессов, имеющих место при нагревании образца неогнезащитенной древесины (заболонь сосны толщиной 10 мм) до момента воспламенения

**Fig. 8.** The results of calculations of the main characteristics of the processes that takes place when the non-fire-resistant wood sample is heated (pine sapwood, thickness of 10 mm) up to the moment of ignition

**Источник:** Собственная разработка.  
**Source:** Own elaboration.

На рис. 8 приводятся ключевые зависимости, полученные при помощи указанной модели (три семейства кривых):

1. Семейство кривых 1, что отвечает уровню теплового облучения 10 Вт/см<sup>2</sup>. Кривая 1а – зависимость твердой массы образца от времени, кривая 1б – зависимость температуры внешней поверхности, которая облучается, кривая 1с – температура задней поверхности, которая не находится под действием теплового облучения.
2. Семейство кривых 2, что отвечает уровню теплового облучения 20 Вт/см<sup>2</sup>. Кривая 2а – зависимость твердой массы образца от времени, кривая 2б – зависимость температуры внешней поверхности, которая облучается, кривая 2с – температура задней поверхности, которая не находится под действием теплового облучения.

3. Семейство кривых 3, что отвечает уровню теплового облучения 40 Вт/см<sup>2</sup>. Кривая 3а – зависимость твердой массы образца от времени, кривая 3б – зависимость температуры внешней поверхности, которая облучается, кривая 3с – температура задней поверхности, которая не находится под действием теплового облучения.

Как видно из рис. 8, температура воспламенения неогнезащитенной древесины равна приблизительно 235°С. Такие же значения получены экспериментально по методике стандарта [10], что подтверждает адекватность разработанной математической модели.

### 4. Выводы

Предложенная методика предоставляет возможность построения математической модели составляющей химико-физических процессов, протекающих в образце материала при его термодеструкции до температуры пламенного горения. Таким образом появляется возможность спрогнозировать необходимое количество антипиренов (для различных огнезащитных пропиточных составов), которое требуется ввести в поверхностные слои древесины (разной породы, толщины, плотности, качества поверхностной обработки и т.п.) для обеспечения продления промежутка времени от начала теплового воздействия до момента возгорания (воспламенения). А это, в свою очередь, создает возможность прогнозного расчета продления начальной стадии развития пожара в зависимости от расхода огнезащитного средства (качества обработки).

### Литература

- [1] Lowden L.A., Hull T.R., *Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction*, "Fire Science Reviews" 2013, 2(4), 19, [electr. doc.], <http://www.firesciencereviews.com/content/2/1/4> [accessed: 5.08.2013].
- [2] Baratov A.N., Andrianov R.A., Korol'chenko A.Ya. et. al., *Pozharnaya opasnost' stroitel'nykh materialov*, Stroyizdat, Moskva 1998, 380.
- [3] Kutateladze S.S., *Osnovy teorii teploobmena*, Atomizdat, Moskva 1979, 416.
- [4] Andriyenko V.M., But V.P., Zhartovs'kyy V.M., Zhartovs'kyy S.V., Maladyka I.H., Tsapko Yu.V., *Vohnezakhystderevyiny ta vyrobiv z neyi: Navchalnyy posibnyk*, APB im. Heroyiv Chornobylia MNS Ukrayiny, Cherkasy 2009, 254.
- [5] Rodzhers D., Adams Dzh., *Matematicheskiye osnovy mashinnoy grafiki*, Mir, Moskva 2001, 604.
- [6] Lautenschlager K.-Kh, Bibrak Kh., Shnabel A., Shreter V., *Khimiya: Spravochnik*, Khimiya, Moskva 1989, 648.
- [7] Bolgarskiy A.V., Mukhachev G.A., Shchukin V.K., *Termodinamika i teploperedacha*, 2nd ed., Vysshaya shkola, Moskva 1975, 495.
- [8] Aramanovich I.G., Levin V.I., *Uravneniya matematicheskoy fiziki*, Nauka, Moskva 1969, 288.
- [9] Korn G., Korn T., *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov*, Nauka, Moskva 1973, 832.
- [10] GOST 12.1.044-89 SSBT. *Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov. Nomenklatura pokazateley i metody ikh opredeleniya*.

\* \* \*

**Чумаченко Сергей Николаевич** – доктор технических наук, начальник отдела моделирования чрезвычайных ситуаций Украинского научно-исследовательского института гражданской защиты, г. Киев, Украина. Область научных интересов: математическое и имитационное моделирование систем, прогнозирование и управление риском возникновения чрезвычайных ситуаций.

**Жартовский Сергей Владимирович** – кандидат технических наук, научный сотрудник Украинского научно-исследовательского института гражданской защиты, г. Киев, Украина. Область научных интересов: методология предупреждения чрезвычайных ситуаций, обусловленных загораниями и пожарами, на объектах критической инфраструктуры.

**Титенко Александр Николаевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Украинского научно-исследовательского института гражданской защиты, г. Киев, Украина. Область научных интересов: математическое и имитационное моделирование химико-физических процессов термодеструкции различных веществ и материалов.

