

УДК 699.81:614.84:536.21

**Беликов А. С.**, д-р техн. наук, профессор,  
**Шаломов В. А.**, канд. техн. наук, доцент,  
**Шаранова Ю. Г.**, магистр  
(ГВУЗ «ПГАСА»)

**Рагимов С. Ю.**, канд. техн. наук, доцент  
(Национальный университет гражданской защиты Украины)

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАДИЙНОСТИ  
ПРЕВРАЩЕНИЙ ДРЕВЕСИНЫ В ВОЛНЕ ГОРЕНИЯ**

**Беліков А. С.**, д-р техн. наук, професор,  
**Шаломов В. А.**, канд. техн. наук, доцент,  
**Шаранова Ю. Г.**, магістр  
(ДВНЗ «ПДАБА»)

**Рагімов С. Ю.**, канд. техн. наук, доцент  
(Національний університет цивільного захисту України)

**ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАДІЙНОСТІ ПЕРЕТВОРЕНЬ  
ДЕРЕВИНИ У ХВИЛІ ГОРІННЯ**

**Belikov A. S.**, D. Sc. (Tech.), Professor,  
**Shalomov V. A.**, Ph. D. (Tech.), Associate Professor,  
**Sharanova Yu. G.**, M.S (Tech.)  
(SHEI "PSACEA")

**Ragimov S. Yu.**, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher  
(National University of Civil Protection of Ukraine)

**THEORETICAL RESEARCHES OF PHASICNESS OF  
TRANSFORMATIONS IN THE WOOD-COMBUSTION WAVE**

**Аннотация.** Исследования показали, что деревянная крепь в горных выработках при возникновении в ней пожара претерпевает значительные изменения. При высокотемпературном нагреве в режиме стандартного пожара, когда  $t_{cl(\tau)} = t_0 + 345 \lg(8\tau + 1) > 0$  при  $\tau > 0$  уже на стадии прогрева и высушивания древесины происходит образование двух зон по сечению конструкции с разнообразным протеканием процессов тепло- массообмена, предел фазовых переходов между этими зонами подвижен, и определяется соответствующими условиями развития процесса. Сформулирована краевая задача переноса тепла и влаги в частных производных, с известным начальным распределением температуры и влаги, при заданных предельных тепловых условиях стандартного пожара, что позволяет рассчитать поля температуры и влаги к моменту возгорания древесины. Для практической оценки огнестойкости и управления процессом горения при моделировании были выделены эффективные стадии и определены условия существования волны горения. В зависимости от внешних условий, ведущая стадия, которая определяет скорость горения и распространения волны горения, может вести или быть ведомой. Анализ трех режимов стадийного процесса горения (управления, отрыва и слияния) показал, что скорость газификации в режиме управления ведет к интенсивному образованию обугленной прослойки (конденсируемой к- фазы), которая имеет низкие значения теплопроводности.

**Ключевые слова:** горение, температура, тепловой поток, теплопроводность, химические превращения, древесина, пожар

**Постановка проблемы.** Анализ пожарной опасности показывает, что ощутимый материальный ущерб экономике во всем мире наносят пожары, подвергая опасности жизнь людей. Так, в Украине ежегодно возникает более 50 тыс. пожаров, в которых гибнут люди, а материальный ущерб превышает 20 млн. грн., побочные убытки в 20 раз больше. В значительной мере такая тревожная статистика обусловлена возросшей пожарной опасностью возводимых и эксплуатируемых зданий и сооружений за счет изменения технологии производства, повышения этажности и плотности застройки, смены традиционных и материалоемких технологий возведения зданий на новые прогрессивные технологии с эффективными строительными материалами из дерева, пластмасс, полимеров, металла и т.д. [1].

**Анализ последних исследований, выделение нерешенных ранее частей общей задачи.** До настоящего времени остается недостаточно изученным процесс горения и прогрева конструкций при наличии специальных мер огнезащиты: облицовка, экранирование, нанесение вспучивающихся покрытий, красок и т.д. Многогранность влияния при этом различных теплофизических факторов на происходящие процессы не позволяет получить математические модели, позволяющие определять изменение температуры прогрева конструкции под покрытием в зависимости от свойств покрытия, свойств входящих в его состав компонентов, толщины покрытия, а также продолжительности огневого влияния [2-5].

**Изложение основного материала исследований.** Быстрое возникновение и развитие пожары получают при наличии в их очаге горючих материалов и конструкций. Такое положение затрудняет, а в отдельных случаях и делает невозможным эффективное тушение, эвакуацию, спасение людей и материальных ценностей. С целью правильной оценки огнестойкости, эффективного повышения огнестойкости, изменения горючести материалов необходимо было изучить процессы горения древесины. Существующие теоретические разработки в большинстве случаев базируются на представлениях об узких зонах химических превращений. Невозможность детального описания всех химических реакций, протекающих в волне горения древесины, приводит к необходимости моделирования процессов горения древесины при пожаре и условного выделения нескольких эффективных стадий. Выделение и моделирование эффективных стадий при горении позволяет оценить происходящие изменения в материале конструкций и их огнестойкости, что позволяет ее повысить.

При температуре несколько выше  $100^{\circ}\text{C}$  в древесине протекает гидролиз полисахаридов, причем разложение идет с поглощением тепла и с температуры свыше  $150^{\circ}\text{C}$  процесс разложения ускоряется. При температуре от  $175-285$  до  $350^{\circ}\text{C}$  выделяется большое количество  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  и жидкого дистиллята, содержащего уксусную кислоту, ее гомологи и метанол. При температуре свыше

280<sup>0</sup>С образуются водород и углеводороды. При температуре 350-500<sup>0</sup>С разложение лигнина и экстрактивных веществ сопровождается образованием незначительного количества жидких продуктов, таких как тяжелая смола, CO<sub>2</sub>, CO и углеводородов. Максимальная концентрация углеводородов достигается при 380-500<sup>0</sup>С.

Схема процесса горения деревянных материалов под воздействием суммарного лучисто-конвективного теплового потока -  $q_l + q_k$  показана на рис. 1.

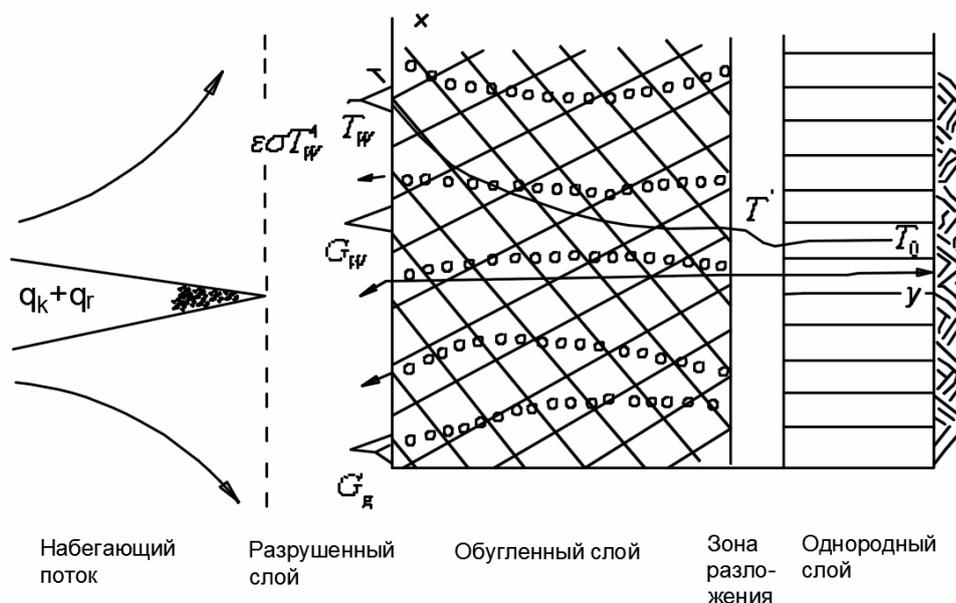


Рисунок 1 – Схема процесса горения древесных материалов

На рис. 1 через  $T_w$ ,  $T_0$  и  $T'$  обозначена температура на поверхности, подверженной огневому воздействию, начальная температура и температура в зоне разложения, соответственно;  $G_w$  и  $G_g$  - расход через поверхность подверженную огневому воздействию, твердых частиц и выделяющихся газов.

Выделенным стадиям приписывается суммарный тепловой эффект, а скорость генерации тепла, связанная со скоростью химической реакции, описывается некоторой формальной кинетикой.

При горении древесины могут реализовываться широкие зоны, для которых теоретический анализ стадийности в достаточном объеме не проводился. В то же время с практической точки зрения оценки огнестойкости конструкций, необходимо выделять ведущие стадии горения, поскольку это дает ключ к пониманию и управлению всем процессом горения.

Для определения условий существования стационарной волны горения сформулируем следующую задачу.

Уравнение теплопроводности в бесконечном пространстве однородной среды для одномерного распространения стационарной волны горения имеет вид:

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda(x, T) \frac{dT}{dx} \right) - m(x, T) c \frac{dT}{dx} + q_v(T) = 0, \quad -\infty < x < +\infty, \quad (1)$$

где  $\lambda(x, T)$  - теплопроводность древесины, которая изменяется при прохождении фронта горения за счет образования обугленного слоя, имеющего более низкие значения теплопроводности по сравнению с обычной древесиной,  $x$  - координата,  $m(x, T)$  - массовая скорость горения, изменяющаяся при горении за счет образования обугленного слоя и уменьшения доступа кислорода к поверхности раздела,  $q_v(T)$  - функция экзотермического источника теплоты, которая определяется ниже по формуле (6). Уравнение (1) записано в подвижной системе координат, связанной с фронтом пламени. Естественные граничные условия состоят в том, что:

$$\text{при } x \rightarrow -\infty, T \rightarrow T_0, \quad (2)$$

$$\text{при } x \rightarrow +\infty, T \rightarrow T_m = T_0 + Q/c, \quad (3)$$

т.е. при  $x \rightarrow -\infty$  - реакция еще не началась, а при  $x \rightarrow +\infty$  - завершилась. Из уравнения (1) при этом следует, что функция источника должна удовлетворять условиям:

$$\begin{cases} q_v(T_0) = 0 \\ q_v(T_m) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Анализ показывает [6, 7], что для обеспечения единственности решения задачи на функцию источника следует наложить еще одно ограничение

$$\frac{dq_v(T_0)}{dx} \leq 0. \quad (5)$$

Практически это осуществляют приравнявая нулю функцию  $q_v(T)$  в некотором интервале температур, близких к  $T_0$  [8-11]:

$$q_v(T) = \begin{cases} 0 & \text{при } T_0 \leq T \leq T_1 \\ q_v(T) = \rho Q f(\eta) k_0 \exp\left(-\frac{E}{R T}\right) & \text{при } T_1 < T < T_m, \end{cases} \quad (6)$$

где  $f(\eta)$  - функция, учитывающая зависимость скорости реакции от концентрации выгорающих компонентов древесины;  $\eta$  - глубина реакции;  $k_0$  - предэкспонента в законе Аррениуса для скорости реакции.

Результаты численных расчетов зависимости величины массовой скорости горения  $m$  от  $T_1$  ( $T_1 \in (T_0, T_m)$ ) показали [12], что если выполняется неравенство между параметрами  $\gamma$  и  $\beta$ :

$$\gamma - \beta = x = \frac{cRT_0T_m}{QE} < 0,1. \quad (7)$$

то скорость волны горения не зависит от значения  $T_1$  и при  $\chi > 0,1$  стационарная волна горения существовать не может.

Параметр  $\chi$  характеризует отношение скоростей реакции при температурах  $T_m$  и  $T_0$ :

$$\frac{q_v(T_m)}{q_v(T_0)} = \exp\left(\frac{1}{\chi}\right)$$

и из неравенства (7) вытекает, что для осуществления стационарной волны горения энергия активации источника должна быть намного больше энергии теплового движения молекул при начальной температуре ( $E \gg RT_0$ ) и тепловой эффект реакции должен быть не меньше тепловой части энтальпии исходной системы при начальной температуре ( $Q > cT_0$ ).

Как показали исследования [13] выплнить оценку ограждающих способностей не несущих деревянных конструкций по параметру прогрева на необогреваемой стороне практически невозможно. Единственной оценкой ограждающей способности огнестойкости конструкции может быть скорость горения древесины.

Формула для массовой скорости горения аналогична выражению для скорости распространения волны горения по газу:

$$m^2 = 2n!(cRT_m / QE)^{n+1} (\lambda\rho / c)\kappa_0 \exp(-E / RT_m) \quad (8)$$

где  $n$  — порядок реакции;  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$  — теплопроводность, теплоемкость и плотность газа;  $\kappa_0$ ,  $E$  — предэкспонент и энергия активации;  $Q$  — тепловой эффект газофазной реакции;  $T_m = T_0' + Q/c$  — максимальная температура горения;  $T_0' = T_0 + Q_1/c_1$  — эквивалентная начальная температура;  $T_0$  — начальная температура;  $Q_1$  — тепловой эффект газификации к-фазы.

Зависимость скорости горения от давления  $p$  и начальной температуры  $T_0$  характеризуется коэффициентами

$$\nu = d \ln m / d \ln p = \frac{n}{2}$$

$$\beta = d \ln m / d T_0 = E / RT_m^2$$

Трехстадийная модель горения (одна химическая стадия протекает в к-фазе и две - в газовой) предложена В. Н. Вилюновым [14]. Изложенный в работе подход легко распространяется на произвольное количество последовательных стадий,

поэтому без потери общности рассмотрим более простой случай протекания реакций в две стадии: первая стадия в к-фазе ( $x < 0$ ), вторая - в газовой ( $x > 0$ ).

Стационарный процесс распространения волны горения описывается системой уравнений сохранения массы и энергии.

$-\infty < x < 0$  (первая стадия, индекс 1):

$$\lambda_1 d^2 T / dx^2 - c_1 m dT / dx = Q_1 m da_1 / dx = -\Phi_1(a_1, T) Q_1; \quad (9)$$

$$x = -\infty, \quad T = T_0, \quad a_1 = 1, \quad x = 0, \quad T = T_s, \quad a_1 = 0; \quad (10)$$

$0 < x < \infty$  (вторая стадия, индекс 2):

$$\lambda_2 d^2 T / dx^2 - c_2 m dT / dx = Q_2 (m da_2 / dx - \rho D d^2 a_2 / dx^2) = -\Phi_2(a_2, T) Q_2; \quad (11)$$

где  $T_0$  — начальная температура;  $T_{s1} = T_0 + Q_1/c_1$  — температура поверхности к-фазы, соответствующая протеканию только первой реакции;  $Q$  — тепловой эффект реакции в соответствующей фазе;  $c$ ,  $\lambda$  — теплоемкость и теплопроводность;  $a$  — концентрация;  $\rho$  — плотность;  $D$  — коэффициент диффузии газовой фазы.

Для к-фазы принято  $\rho = \text{const}$ ,  $D_1 = 0$ . Для газовой фазы реакции  $Q_2 > 0$ . Ограничения на знак теплового эффекта реакции в к-фазе нет. Предполагается также, что скорость реакции в к-фазе  $\Phi_1$  от давления не зависит. Температура поверхности  $T_s$  в граничном условии при  $x = 0$  подлежит определению. Граничное условие для теплового потока при  $x = 0$  записано на основе следующих выкладок. Интегрируя уравнения для  $a_1$  и  $a_2$  от  $x = -\infty$  до  $x = \infty$ , получим соотношение:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Phi_1(a_1, T) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_2(a_2, T) dx = m.$$

Интегрируя далее, первое из уравнений (11), получим

$$\lambda_2 \left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = q_1 = Q_2 \int_0^{\infty} \Phi_2(a_2, T) dx - c_2 m (T_2 - T_s).$$

С учетом предыдущего соотношения и выражения для  $T_{s1}$

$$q = m(c_2 T_s - c_1 T_{s1}) \cong m c \{ T_s - T_{s1} \} \text{ при } c_1 \cong c_2 = c.$$

Граничное условие для  $da_2/dx$  записано в приближении подобия полей температур и концентраций.

Приближенные выражения для скоростей химических реакций в к- и газовой фазах имеют вид

$$m_1^2 = 2\rho_1\chi_1(2T_s - T_{s1} - T_0)^{-1} \cdot (RT_0^2 / E_1)k_{01} \exp(-E_1 / RT_s), \quad (12)$$

$$m^2 = (2n! \cdot z\lambda_2 / c)(RT_2^2 / E^{n+1}(T_2 - T_{s1})^{-1}(T_2 - T_s)^{-n} \exp(-E_2 / RT_2)., \quad (13)$$

где  $z = k_{02}\mu(p / RT_2)^n$ ,  $\mu$  — молярная масса;  $p$  — давление;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $n$  — порядок реакции;  $E, k_0$  — энергия активации и предэкспонента в законе Аррениуса для скорости реакции;  $\chi_1 = \lambda_1 / c\rho_1$ .

В выражениях для  $m_1$  и  $m_2$  неизвестной величиной является  $T_s$ , но поскольку при стационарном горении  $m_1 = m_2 = m$ , соотношения (12) и (13) можно рассматривать как систему для двух неизвестных —  $m$  и  $T_s$ . Так, например, при горении в режиме отрыва скорость горения определяется реакциями в к-фазе (ведущей зоне или стадии) и рассчитывается по [6-9] при  $T_s = T_{s1}$  ( $Q_1 > 0$ ).

Анализ численного решения задачи о стадийном распространении пламени по однородной среде показал [8], что смена режимов горения происходит в достаточно узком диапазоне изменения параметров. На этом основании сделан вывод, что для таких условий всегда удастся установить ведущую стадию.

При выделении ведущих стадий в волне горения древесины полезно иметь в виду качественные соображения о связи степени влияния той или иной пространственной зоны с ее удаленностью от поверхности к-фазы. Под зоной влияния будем понимать пространственную область, в которой процессы за ее пределами не сказываются на величине скорости горения. Из уравнения теплопроводности, записанного для теплового потока в газовой фазе при естественном граничном условии на бесконечности ( $x = \infty$ ,  $q = 0$ ), получаем выражение для потока тепла в к-фазу:

$$q_s = \int_0^{\infty} \Phi(x) \exp(-c\rho_1 x / \lambda) dx. \quad (14)$$

В соответствии с (14) «эффективность» теплового вклада от зон тепловыделения в газе тем ниже, чем дальше эта зона отстоит от поверхности горения.

При этом, не всегда последовательно проводился количественный анализ закономерностей горения, исследовались лишь качественные характеристики процесса: зависимость скорости горения от  $p$ ,  $T_0$ . В результате возникают ситуации, когда для древесины разные авторы трактуют механизм горения с диаметрально противоположных позиций.

**Выводы.** В теоретическом плане выделение ведущих стадий при моделировании горения древесины представляется значительно менее разработанным, чем в случае горения газовых систем. Особенно сложно это сделать при описании горения древесины, на поверхности которой происходит взаимодействие потоков массы (и тепла) при выгорании отдельных компонентов, причем величина поверхности фронта на единицу сечения образца также может меняться во времени. Поэтому понятием ведущей стадии при горении древесины следует пользоваться в основном при качественном анализе процесса, а количественные модели горения древесины необходимо строить по возможности с учетом всех существенных факторов, характеризующих явление.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Охрана труда в строительстве : учебник / Беликов А. С., Сафонов В. В., Нажа П. Н. [и др.] ; под общ. ред. А. С. Беликова. – Киев: Основа, 2014. – 592 с.
2. Бабкин, В. С. Явление концентрации энергии в волнах горения / В.С. Бабкин, И. Вежба., Г.А. Карим // Физика горения и взрыва. - 2002. - т. 38. - № 1. - С. 3-11.
3. David Lempert, Sergei Glazov, Georgy Manelis. Mass Transfer in Filtration Combustion Processes // In book „Mass Transfer in Multiphase Systems and its Applications”. InTech, 2011, ISBN 978-953-307-215-9, p. 483-498.
4. Young, G. C. Municipal Solid Waste to Energy Conversion Processes: Economic, Technical and Renewable Comparisons. - Hoboken (New Jersey, USA): John Wiley & Sons Inc., 2010.-384 p.
5. Футько, С. И. Кинетический анализ химической структуры волн фильтрационного горения газов ультрабедных составов / С.И. Футько // Физика горения и взрыва. 2003. - т. 39. - № 3. - С. 23-32.
6. Li C. Carbon oxidation kinetics from evolved carbon oxide analysis during temperature programmed oxidation / C. Li, T.C. Drown // Carbon. - 2001. - Vol. 39. - p. 725-732.
7. Coats, C. M. Nonpremixed combustion in turbulent mixing layers. Pt 1: Flame characteristics / C.M. Coats, A.P. Richardson // Combust. Flame. - 2000. - Vol. 122. - p. 253-270.
8. Oran, E. S. Numerical simulation of reacting flow. Second Edition / E.S. Oran, J.P. Boris. - Cambridge University Press, 2001. – 529 p.
9. Гусаченко, Л. К. Анализ нестационарных моделей горения твердых топлив (обзор) / Л.К. Гусаченко, В.Е. Зарко // Физика горения и взрыва. -2008. --Т. 44. - № 1. - С. 35-48.
10. Самарский, А. А. Аддитивные схемы для задач математической физики. / А.А. Самарский, В.Н. Вабищевич. - Москва: Наука, 2001. – 320 с.
11. Липанов А. М. О расчёте температурного поля в заряде смесового твёрдого топлива с учётом гетерогенности его теплофизических свойств / А.М. Липанов, А.А. Болкисев // Химическая физика и мезоскопия. - 2012. - Т. 14. - № 3. - С. 364-370.
12. Влияние стадии пиролиза на фильтрационное горение твердых топлив. / В.М. Кислов, Е.А. Салганский, С.В. Глазов [и др.] // Горение и плазмохимия. - 2007. - т. 5. - № 3. - с. 209-214.
13. Повышение огнестойкости деревянных строительных конструкций за счет снижения горючести древесины / А. С. Беликов, В. А. Шаломов, Е. Н. Корж, С. Ю. Рагимов // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепр, 2017. – Вып. 98 Энергетика, экология, компьютерные технологии в строительстве. – С. 38-45.
14. Балабанов, П. В. Методы и средства исследования характеристик тепло- и массо- переноса регенеративных продуктов и поглотителей для систем жизнеобеспечения. Ч. 1: Методы и средства определения теплофизических характеристик. / П.В. Балабанов. - Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО ТГТУ, 2012. – 96 с

#### REFERENCES

1. Belikov A. S., Safonov V. V., Nazha P. N., Chalyiy V. G., Shlyikov N. Yu., Shalomov V. A. and Ragimov S. Yu. (2014), *Ohrana truda v stroitelstve* [A labour protection in building], Osнова, Kiev, UA.
2. Babkin V. S., Vezhba I. and Karim G. A. (2002), «The phenomenon of concentration of energy is in the waves of burning», *Physics of burning and explosion*, Vol. 38, no. 1, PP. 3– 11.

3. David Lempert, Sergei Glazov and Georgy Manelis (2011) «Mass Transfer in Filtration Combustion Processes», in *Mass Transfer in Multiphase Systems and its Applications*, . InTech, PP. 483–498.
4. Young G. C. (2010), *Municipal Solid Waste to Energy Conversion Processes: Economic, Technical and Renewable Comparisons*, John Wiley & Sons Inc., Hoboken (New Jersey, USA).
5. Futko S. I. (2003), «Kinetic analysis of chemical structure of waves of the lauter burning of gases of compositions», *Physics of burning and explosion*, Vol. 39, no. 3, PP. 23-32.
6. Li C. and Brown T. C. (2001), «Carbon oxidation kinetics from evolved carbon oxide analysis during temperature programmed oxidation», *Carbon*, Vol. 39, PP. 725-732.
7. Coats C. M. and Richardson A. P. (2000), «Nonpremixed combustion in turbulent mixing layers. Pt 1: Flame characteristics», *Combust. Flame*, Vol. 122, PP. 253–270.
8. Oran E. S. and Boris J. P. (2001), *Numerical simulation of reacting flow. Second Edition*, University Press, Cambridg, USA.
9. Gusachenko L. K. and Zarko V. E. (2008), *Analiz nestacionarnykh modelej gorenija tverdyh topliv (obzor)* [Analysis of non-stationary models of burning of hard fuels (review)], *Physics of burning and explosion*, Vol. 44, no. 1, PP. 35– 48.
10. Samarskij A. A. and Vabishhevich P. N. (2001), *Additivnye shemy dlja zadach matematicheskoy fiziki* [Additive charts for the tasks of mathematical physics], Nauka, Moskow, RU.
11. Lipanov A. M. and Bolkisev A. A. (2012), «About the calculation of the temperature field in the charge of blenderized hard fuel taking into account heterogeneity of his thermophysical properties», *Chemical physics*, Vol. 14, no.3, PP. 364– 370.
12. Kislov V. M., Salganskij E. A., Glazov C. B., Zholudev A. F. and Manelis G. B. (2007), «Influence of the stage of pyrolysis on the lauter burning of hard fuels», *Burning and plasma of chemistry*, Vol. 5, no. 3, PP. 209– 214.
13. Belikov A. S., Shalomov V. A., Korzh E. M. and Ragimov S. Yu. (2017), «Increase of fire resistance of wooden building structures due to reduction of flammability of wood», *Construction, materials science, mechanical engineering*, PDABA. Dnipro, UA, no. 98, PP. 38-45.
14. Balabanov P. V. (2012), *Metody i sredstva issledovaniya harakteristik teplo- i masso- perenosa regenerativnykh produktov i poglotitelej dlja sistem zhizneobespechenija* [Methods and facilities of research of descriptions warm - and the masses - transfer of regenerative products and absorbers for the systems of life-support], FGBOU VPO TGTU, Tambov, RU.

---

### Об авторах

**Беликов Анатолий Серафимович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры» (ГВУЗ «ПГАСА»), Днепр, Украина, [bgd@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bgd@mail.pgasa.dp.ua).

**Шаломов Владимир Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры» (ГВУЗ «ПГАСА»), Днепр, Украина, [shalomov1709@gmail.com](mailto:shalomov1709@gmail.com)

**Шаранова Юлия Григорьевна**, магистр, старший преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры» (ГВУЗ «ПГАСА»), Днепр, Украина, [bgd@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bgd@mail.pgasa.dp.ua)

**Рагимов Сергей Юсупович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры организации и технического обеспечения аварийно-спасательных работ, Национальный университет гражданской защиты Украины (НУГЗ Украины), Харьков, Украина, [sergragimov@mail.ru](mailto:sergragimov@mail.ru).

### About the authors

**Belikov Anatoliy Serafimovich**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of the Department Safety of Vital Activity in the State Higher Education Institution «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture» (SHEI «PSACEA»), Dnopr, Ukraine, [bgd@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bgd@mail.pgasa.dp.ua).

**Shalomov Vladimir Anatolijovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Associate Professor of the Department Safety of Vital Activity in the State Higher Education Institution «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture» (Shei «PSACEA»), Dnopr, Ukraine, [shalomov1709@gmail.com](mailto:shalomov1709@gmail.com)

**Sharanova Julija Grigor'evna**, Master of Science, Senior Teacher of the Department Safety of Vital Activity in the State Higher Education Institution «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture» (SHEI «PSACEA»), Dnepr, Ukraine, [bgd@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bgd@mail.pgasa.dp.ua)

**Ragimov Sergej Jusupovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of organization and technical providing wrecking in the National University of Civil Protection of Ukraine, Kharkov, Ukraine, [sergragimov@mail.ru](mailto:sergragimov@mail.ru).

**Анотація.** Дослідження показали, що дерев'яні кріплення в гірничих виробках при виникненні в них пожежі зазнають значних змін. При високотемпературному нагріванні в режимі стандартної пожежі, коли  $t_{c1(\tau)} = t_0 + 345 \lg(8\tau + 1) > 0$  при  $\tau > 0$  уже на стадії прогріву і висушуванні деревини відбувається утворення двох зон по перетину конструкції з різноманітним протіканням процесів тепло- масообміну, межа фазових переходів між цими зонами рухлива, і визначається відповідними умовами розвитку процесу. Сформульовано крайову задачу переносу тепла і вологи в часткових похідних, з відомим початковим розподілом температури і вологи, при заданих граничних теплових умовах стандартної пожежі, що дозволяє розрахувати поля температури і вологи до моменту спалаху деревини. Для практичної оцінки вогнестійкості і керування процесом горіння при моделюванні були виділені ефективні стадії і визначені умови існування хвилі горіння. У залежності від зовнішніх умов, провідна стадія, що визначає швидкість горіння і поширення хвилі горіння, може бути провідною або підлеглою. Аналіз трьох режимів стадійного процесу горіння (керування, відриву і злиття) показав, що швидкість газифікації в режимі керування веде до інтенсивного утворення обвугленого прошарку (конденсованої к - фази), який має низькі значення теплопровідності.

**Ключові слова:** горіння, температура, тепловий потік, теплопровідність, хімічні перетворення, деревина, пожежа

**Annotation.** Studies have shown that wooden support in the mine workings undergoes significant changes when fire occurs in it. At high-temperature heating in the mode of standard fire, when  $t_{c1(\tau)} = t_0 + 345 \lg(8\tau + 1) > 0$  at  $\tau > 0$ , at the stage of the wood heating and drying, two zones are formed at the intersection of the structure, where heat-mass transfer processes run differently; boundary of phase transitions between these zones is mobile, and is determined by corresponding conditions of the process development. For the heat and moisture transfer, a boundary-value problem is formulated in partial derivatives, with known initial distribution of temperature and moisture, with the given extreme thermal conditions of a standard fire, hence, allowing to calculate fields of temperature and moisture up to the moment of the wood combustion. For practical assessment of fire resistance and control of combustion process, during the simulation, effective stages and conditions for the existence of a combustion wave were identified. Depending on the external conditions, leading stage, which determines the combustion rate and propagation of the combustion wave, may be conductive or subordinate. Analysis of three modes of the phasic combustion process (management, separation and merger) shows that rate of gasification in the control mode leads to intensive formation of the charred layer (condensed k-phase) with low thermal conductivity.

**Keywords.** burning, temperature, thermal stream, heat conductivity, chemical transformations, wood, fire

*Стаття поступила в редакцію 2.09. 2017*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Т.В. Бунько*