

УДК 662.63

ГОРЕНИЕ ЛЕТУЧИХ ТОПЛИВНОЙ ЩЕПЫ

В. И. НАЙДЕНОВ, Ю. В. ОТРАШЕВСКИЙ

ЦНИИМЭ

В настоящее время низкокачественные древесные отходы оцениваются как один из возможных дополнительных источников энергии [15]. Использование отходов позволит лесной промышленности удовлетворить значительную часть своих потребностей в топливе.

Тепловая мощность паровых и водогрейных котлоагрегатов существенно зависит от фракционного состава топливной щепы, так как по своему физическому смыслу представляет собой величину, пропорциональную скорости выгорания топлива в заданном объеме или на заданной площади колосникового полотна.

Интенсификация тепломассообменных процессов, характеризующих горение в топочном объеме, возможна лишь при детальном изучении воспламенения летучих и выгорания коксового остатка древесного топлива. Эти процессы для достаточно крупных древесных частиц лимитируются физическими факторами (конвективной диффузией кислорода и продуктов сгорания), а для очень мелких частиц — кинетическими факторами (температурой и энергией активации суммарных химических реакций).

Как известно [4, 6, 12], древесина имеет высокий (наибольший из всех твердых органических топлив) процент выхода летучих, величина которого слабо зависит от породы, места произрастания, географических условий и т. д. Физико-химический процесс выхода и сгорания летучих определяет реакционную способность древесины.

Цель настоящего исследования — изучить выделение из древесной биомассы летучих и определить время их видимого горения, а также влияние на эти процессы геометрических размеров щепы.

Горение летучих рассматривается как диффузионное пламя [11]. Летучие, выделяясь из щепы, образуют вокруг нее бесконечно тонкую пленку с концентрацией C_l^0 , равной плотности летучих при данной температуре, из которой они распространяются в окружающую среду путем молекулярной диффузии и конвекции и сгорают на границе области, реагируя с кислородом, поступающим из окружающего пространства (рис. 1).

Уравнения конвективной диффузии примем в приближении диффузионного пограничного слоя [7, 9], т. е. будем считать, что длина щепы вдоль волокон будет значительно больше толщины. Топливная щепка, получаемая в современных рубительных машинах, обычно удовлетворяет этому требованию.

При постоянной эффективной скорости воздушного потока уравнения массообмена с крайевыми условиями, соответствующими заданию концентраций летучих и кислорода у поверхности щепы и на бесконечности, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} D_l \frac{\partial^2 C_l}{\partial y^2} &= v \frac{\partial C_l}{\partial x}; & C_l(0) &= C_l^0; & C_l(y^*, x) &= 0; \\ D_k \frac{\partial^2 C_k}{\partial y^2} &= v \frac{\partial C_k}{\partial x}; & C_k(\infty) &= C_k^0; & C_k(y^*, x) &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

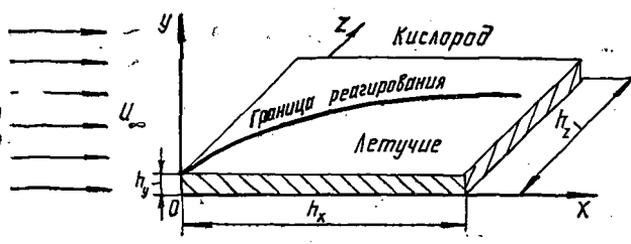


Рис. 1. Расчетная схема реагирования

где D_l, D_k — соответственно коэффициенты молекулярной диффузии летучих и кислорода;
 C_l, C_k — концентрация летучих и кислорода;
 v — скорость потока;
 $y^*(x)$ — граница реагирования летучих и кислорода.

Вводим автомодельную переменную $\eta = y/\delta(x)$ ($\delta(x) = 2\sqrt{D_k x/v}$ — толщина диффузионного пограничного слоя). При помощи традиционной для таких задач замены переменных [7, 9] система уравнений в частных производных сводится к обыкновенным дифференциальным уравнениям:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 C_l}{d\eta^2} &= -2\eta \frac{dC_l}{d\eta}; & C_l(0) &= C_l^0; & C_l(\eta^*) &= 0; \\ \frac{d^2 C_k}{d\eta^2} &= -\frac{2\eta}{Le} \frac{dC_k}{d\eta}; & C_k(\infty) &= C_k^0; & C_k(\eta^*) &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь η^* — автомодельная переменная на границе диффузионного пограничного слоя;
 $Le = D_k/D_l$ — число Льюиса, характеризующее отношение толщин пограничного слоя для концентрации кислорода и летучих.

Границу реагирования $y^* = \eta^* \delta(x)$ находят из условия равенства диффузионных потоков летучих и кислорода:

$$M D_l \frac{dC_l}{d\eta}(\eta^*) = -D_k \frac{dC_k}{d\eta}(\eta^*), \quad (3)$$

где M — стехиометрический коэффициент.

Уравнения (2) имеют точное решение:

$$\begin{aligned} C_l &= C_l^0 \left(1 - \frac{\text{erf } \eta}{\text{erf } \eta^*} \right); \\ C_k &= C_k^0 \left[1 - \frac{\text{erfc}(\eta/\sqrt{Le})}{\text{erfc}(\eta^*/\sqrt{Le})} \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь

$$\text{erf } \eta = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-t^2} dt; \quad \text{erfc } c = 1 - \text{erf } \eta \text{ — функции ошибок [10].}$$

Используя точные решения (4), для определения границы реагирования получаем трансцендентное уравнение вида

$$\frac{\sqrt{Le} e^{\eta^{*2} \left(\frac{1-Le}{Le} \right)} \text{erf } \eta^*}{\text{erfc}(\eta^*/\sqrt{Le})} = \frac{M C_l^0}{C_k^0}. \quad (5)$$

Учитывая формулы (3) — (5), рассчитываем поток летучих с поверхности пластинки:

$$\dot{q}_n = -h_z \int_0^{h_x} D_n \frac{dC_n}{dy} (0) dx;$$

$$q_n = h_z D_n C_n^0 \frac{2}{\sqrt{\pi} \operatorname{erf} \eta^*} \sqrt{\frac{v h_x}{D_n}},$$

где h_x , h_y , h_z — параметры пластины.

Полный поток за время горения τ_n представим выражением

$$Q_n^1 = q_n \tau_n,$$

а количество летучих в пластинке

$$Q_n^2 = h_x h_y h_z \rho_T \frac{V_0^c}{100} \Psi a.$$

Здесь ρ_T — плотность сухой древесины;

V_0^c — выход летучих;

Ψ — степень выгорания летучих за время видимого горения;

a — содержание горючей части летучих.

Приравнявая $Q_n^1 = Q_n^2$, вычисляем τ_n с учетом горения пластинки с обеих сторон:

$$\tau_n = \frac{\rho_T \frac{V_0^c}{100} \Psi a \frac{\sqrt{\pi}}{2} \operatorname{erf} \eta^* h_x h_y}{2 D_n C_n^0 \sqrt{v h_x / D_n}}. \quad (6)$$

Формулу (6) можно упростить в случае, когда $Le = 1$ и $D_n = D_k$ (такое предположение обычно хорошо соответствует действительности). Тогда уравнение для определения границы реагирования (5) принимает вид

$$\operatorname{erf} \eta^* = \frac{M C_n^0}{M C_n^0 + C_k^0}.$$

С увеличением стехиометрического коэффициента и концентрации летучих у поверхности щепы область реагирования достаточно быстро расширяется. Время горения в этом случае

$$\tau_n = \frac{\sqrt{\pi}}{4} \rho_T \frac{V_0^c}{100} \Psi a \frac{h_x h_y}{\left(D_n C_n^0 + \frac{D_k C_k^0}{M} \right) \sqrt{\frac{v h_x}{D_n}}}. \quad (7)$$

Как следует из формулы (7) время горения зависит от геометрических размеров топливной щепы. Оно прямо пропорционально толщине щепы h_x и связано с ее длиной по закону $\tau_n \sim \sqrt{h_x}$. Так как в выражение (7) входит плотность и концентрация летучих, то, соответственно, время горения зависит от породы древесины.

Аналогично может быть построена аналитическая формула для тел цилиндрической формы (сучья, элементы кроны и т. д.):

$$\tau_n = \frac{\sqrt{\pi}}{4} \rho_T \frac{V_0^c}{100} \Psi a \frac{h_x R}{\left(D_n C_n^0 + \frac{D_k C_k^0}{M} \right) \sqrt{\frac{v h_x}{D_n}}}.$$

Здесь h_x и R — длина и радиус цилиндра соответственно.

Таким образом, при горении летучих образуется вокруг древесной частицы неравномерная оболочка, геометрические размеры которой оце-

нивают по количеству выделившихся летучих. Время исчезновения этой оболочки рассматривают как функцию от скорости подачи воздуха и коэффициента диффузии кислорода через продукты горения.

Используя данные по выходу и составу неконденсированных газов [1, 5] в зависимости от конечной температуры пиролиза древесины, можно оценить время горения летучих сосновой щепы при температуре 700 °С и атмосферном давлении.

1. Принимаем следующие мольные концентрации газов пиролиза [5]: CO_2 — 38,56 %; CO — 25,19 %; CH_4 — 24,94 %; C_2H_4 — 8,50 %; H_2 — 2,81 %.

2. Определяем плотность газов пиролиза при заданных условиях по справочнику [8]: $\rho_{\text{CO}_2} = 0,555$ кг/м³; $\rho_{\text{CO}} = 0,351$ кг/м³; $\rho_{\text{CH}_4} = 0,201$ кг/м³; $\rho_{\text{C}_2\text{H}_4} = 0,351$ кг/м³; $\rho_{\text{H}_2} = 0,0252$ кг/м³.

3. Вычисляем массовую концентрацию летучих у поверхности щепы по следующей формуле:

$$C_{\text{л}}^0 = \rho_{\text{CO}} \text{CO} + \rho_{\text{CH}_4} \text{CH}_4 + \rho_{\text{C}_2\text{H}_4} \text{C}_2\text{H}_4 + \rho_{\text{H}_2} \text{H}_2 = 16,9 \cdot 10^{-5} \text{ г/см}^3.$$

Здесь CO , CH_4 , C_2H_4 , H_2 — мольные концентрации газов пиролиза в долях единицы.

4. Концентрацию кислорода находим аналогично:

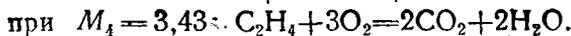
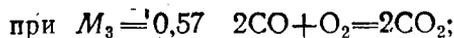
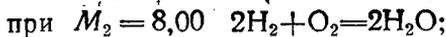
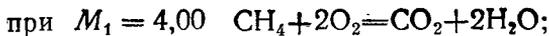
$$C_{\text{к}}^0 = \rho_{\text{O}_2} \text{O}_2 = 8,4 \cdot 10^{-5} \text{ г/см}^3,$$

где ρ_{O_2} — плотность кислорода; O_2 — мольная концентрация кислорода в долях единицы.

5. Определяем коэффициент диффузии кислорода, подставляя температуру в градусах Кельвина:

$$D_{\text{к}} = 0,16 (T/273)^2 = 2,032 \text{ см}^2/\text{с}.$$

6. Принимаем, что горение летучих происходит по реакциям окисления с соответствующими стехиометрическими коэффициентами:



Тогда получаем эффективный стехиометрический коэффициент:

$$M_{\text{л}} = \sum_{i=1}^4 M_i \nu_i = 2,125 (\nu_i — \text{весовая доля компонента}).$$

7. Находим долю горючей части летучих:

$$\alpha = \frac{\rho_{\text{CO}} \text{CO} + \rho_{\text{CH}_4} \text{CH}_4 + \rho_{\text{C}_2\text{H}_4} \text{C}_2\text{H}_4 + \rho_{\text{H}_2} \text{H}_2}{\rho_{\text{CO}_2} \text{CO}_2 + \rho_{\text{CO}} \text{CO} + \rho_{\text{CH}_4} \text{CH}_4 + \rho_{\text{C}_2\text{H}_4} \text{C}_2\text{H}_4 + \rho_{\text{H}_2} \text{H}_2} = 0,441.$$

8. Коэффициент молекулярной диффузии летучих вычисляем по формулам теории переноса в многокомпонентных системах [13]: $D_{\text{л}} = 2,107 \text{ см}^2/\text{с}$.

Так как $Le \approx 1$, то расчет времени выгорания в секундах можно производить по упрощенной формуле (7), учитывая, что для сосновых частиц $\rho_{\text{т}} = 470$ кг/м³, $V_0 = 85$ %, $\psi = 0,85$:

$$\tau_{\text{л}} = 151 h_x h_y \sqrt{v h_x / D_{\text{л}}},$$

где $v h_x / D_{\text{л}}$ — диффузионное число Пекле (геометрические размеры, см).

Следует отметить, что проблеме пиролиза и термогравиметрического анализа посвящен целый ряд работ зарубежных [14, 16—18] и отечественных [1—3, 6] авторов. Результаты этих исследований в большей или меньшей степени подтверждают правильность определения физико-химической сущности процессов, происходящих с древесной частицей. Однако в этих работах не дана ясная картина влияния размеров щепы на время горения древесных частиц, а именно этот вопрос является самым важным при конструировании рабочих органов рубительных машин для производства топливной щепы.

Для проверки теоретических выводов о влиянии геометрических размеров щепы на динамику процессов сушки, термоллиза и горения коксового остатка в ЦНИИМЭ создан экспериментальный стенд (рис. 2).

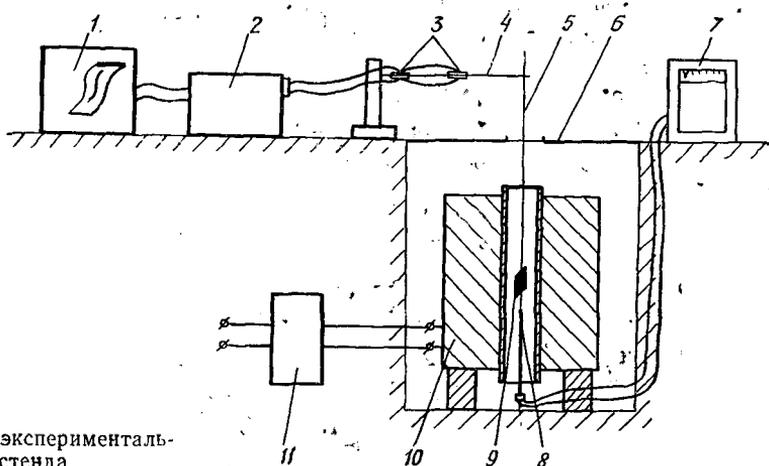


Рис. 2. Схема экспериментального стенда

Исследуемый образец 9 на термостойкой нити σ подвешивают в трубчатой муфельной электропечи 10, температура в которой регулируется автотрансформатором 11, измеряется термопарой ТПП 8 и фиксируется автоматическим самопишущим потенциометром 7 типа КСП 2 с диапазоном рабочих температур от 0 до 1200 °С. Термостойкая нить связана со свободным концом жестко закрепленной упругой пластины 4. От теплового воздействия пластина защищена экраном 6. При уменьшении веса образца происходит деформация пластины, приводящая к изменению сопротивления тензодатчиков 3. Сигнал от разбаланса моста поступает в тензоусилитель 2 «Топаз-1А», а затем на самопишущий осциллограф 1 марки Н-117. На фотобумаге фиксируются термограммы — кривые уменьшения веса образца во времени $G = f(\tau)$. Вид тер-

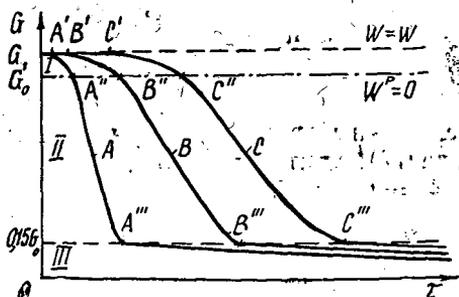
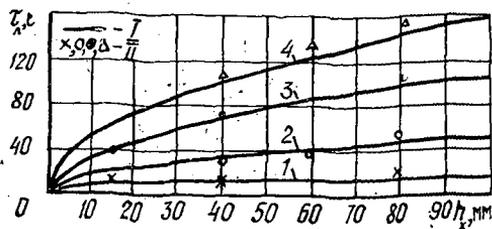


Рис. 3. Термограммы элементов щепы: I — сушка; II — выход летучих; III — горение коксового остатка

мограмм для трех типов частиц (одного веса и влажности, но разных геометрических пропорций) приведен на рис. 3.

Угол наклона кривых характеризует интенсивность процессов сушки, термоллиза, горения летучих и углерода. В опытах исследовали древесные частицы длиной от 5 до 100 мм из ствола и сучьев ели, сосны, березы, осины при влажности $W^p = 0 \dots 60\%$ и температуре среды $T = 500 \dots 800^\circ\text{C}$.

Рис. 4. Зависимость времени выхода летучих $\tau_{\text{л}}$ от размеров сосновой щепы h_x при различных значениях h_y ($t = 700^\circ\text{C}$): 1—2; 2—5; 3—10; 4—15 мм; I—расчетные зависимости; II—экспериментальные точки



Графики, представленные на рис. 4, иллюстрируют удовлетворительное согласование теоретических и экспериментальных результатов.

Таким образом, рассмотренные в статье методики расчета процесса горения летучих веществ подтверждаются теоретическими данными и экспериментальными исследованиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Багрова Р. Х. Исследование выходов продуктов пиролиза березы, сосны, ели в зависимости от конечных температур пиролиза: Дис. ... канд. техн. наук.— Свердловск, 1953.— 170 с. [2]. Букин В. Д. Исследование и совершенствование котельно-топочного оборудования для комплексного энергохимического использования древесных отходов: Дис. ... канд. техн. наук.— Л., 1979.— 163 с. [3]. Вознесенский Н. П., Чернышев А. Б. О структуре пограничного слоя при горении твердого топлива // Докл. АН СССР.— 1951.— Т. 77, № 3.— С. 433—434. [4]. Головкин С. И., Колерин И. Ф., Найденов В. И. Энергетическое использование древесных отходов.— М.: Лесн. пром-сть, 1987.— 224 с. [5]. Козлов В. Н., Нимвицкий А. А. Технология пирогенетической переработки древесины.— М.; Л.: Гослесбумиздат, 1954.— 618 с. [6]. Корчунов Ю. Н. Кинетика суммарного процесса термического разложения древесины, целлюлозы и лигнина // Гидролиз и лесохим. пром-сть.— 1969.— № 7.— С. 10—12. [7]. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена.— М.: Атомиздат, 1979.— 415 с. [8]. Кутателадзе С. С. Справочник по теплопередаче.— М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959.— 402 с. [9]. Левич В. Г. Физико-химическая гидромеханика.— М.: Физматгиз, 1959.— 659 с. [10]. Никифоров А. Ф., Уваров В. Б. Основы теории специальных функций.— М.: Наука, 1974.— 302 с. [11]. Новые методы сжигания топлива и вопросы теории горения. / Под ред. Б. В. Канторовича.— М.: Наука, 1972.— 236 с. [12]. Померанцев В. В. Основы практической теории горения.— Л.: Энергия, 1973.— 264 с. [13]. Рид Р., Праусниц Д. Ж. Свойства газов и жидкостей: Справоч. пособие / Пер с англ. под ред. Б. И. Соколова.— Л.: Химия, 1982.— 592 с. [14]. Christoph N. Untersuchungen über die thermische Stabilität nativer hochpolymerer Werkstoffe: Dis.— Hamburg: Universität, 1966.— S. 231. [15]. Energie aus Biomasse.— Münster-Hiltzup: Landwirtschaftvert, 1985.— 217 S. [16]. Kollman F. Vergleichende Prüfungen des Brandgeschehens bei Holz und Holzwerkstoffen // Svensk Papperstidning.— 1960.— 63, N 7.— S. 208/17. [17]. Magnus G. Kritische Beurteilung der Verfahren zur Untersuchung der Selbstentzündungsneigung // AGF-Forschungsbericht.— Univ. Karlsruhe, 1966.— N 8.— S. 9—17. [18]. Patzak W. Zur Theorie des Brandgeschehens von Holz // VDI-Forschungsheft.— Düsseldorf, 1972.— 552.— S. 52.

ИСТОРИЯ НАУКИ

УДК 630*81

**ВЫДАЮЩИЙСЯ ДРЕВЕСИНОВЕД
ЛЕОНИД МИХАЙЛОВИЧ ПЕРЕЛЫГИН
(к 100-летию со дня рождения)**

Профессор Л. М. Перелыгин родился 8 ноября 1891 г. в г. Липецке. В 1906—1911 гг. он учился в Саратовском механико- и химико-техническом училище. Продолжил свое образование М. Л. Перелыгин в Лесном институте С.-Петербурга, по окончании которого в 1915 г. получил звание ученого лесоведа первого разряда.

Уже в стенах института проявилось стремление Леонида Михайловича к научной деятельности. Он вел внепрограммную работу под руководством проф. В. Н. Крестинского в лаборатории органической химии. Результаты работы легли в основу его первой и весьма обстоятельной статьи «Мочальное производство», опубликованной в «Лесном журнале» № 3 за 1918 г.

Трудовую деятельность М. Л. Перелыгин начал в 1918 г. в качестве таксатора. Свое стремление к педагогической работе он смог осуществить только в 1922 г., когда был избран ассистентом кафедры технических свойств древесины Московского лесотехнического института.

В 1931 г. Леонид Михайлович был назначен доцентом, а потом утвержден заведующим кафедрой древесиноведения МЛТИ и проработал в этой должности до 1935 г. После закрытия института он преподавал в других вузах (МИСИ, МЭМИИТ, МАТИ) и вернулся после реорганизаций в МЛТИ в 1945 г.

Педагогическую деятельность Л. М. Перелыгин совмещал с научно-исследовательской работой в Институте древесины, впоследствии ЦНИИМОД (1930 г.), ЦНИЛХИ, ВНИЭКИН, ВНИИЛХ, ЦНИИМЭ, лаборатории авиационного завода. Он изучал физико-механические свойства древесины различных пород; решал проблему замены дефицитных пород менее ценными; впервые разработал стандарт (ОСТ ВКС 7653) на методы испытаний древесины. Пять лет упорного труда завершились написанием монографии и докторской диссертации, защищенной в 1938 г. В том же году ему было присвоено звание профессора. В результате этой работы был создан расширенный ОСТ НКЛ 250. Стандартизация методов испытаний сыграла огромную роль в накоплении объективных и вполне сравнимых данных о физико-механических свойствах древесины. Методы испытаний, разработанные Л. М. Перелыгиным, легли в основу международных стандартов.

Большой цикл работ был выполнен им по исследованию влияния пороков и других факторов на свойства древесины. До сих пор широко используются его результаты воздействия скорости нагружения на прочность древесины. Л. М. Перелыгиным изучены причины анизотропии усушки, заложены основы технической анатомии древесины; успешно развиты в трудах В. Е. Вихрова, В. Е. Москалевой и др.

Проф. Перелыгин опубликовал более 160 работ. Среди них капитальный труд (совместно с А. Х. Певцовым) «Механические свойства и испытания древесины» (1934 г.); учебное пособие для вузов «Древесиноведение» (1949 г.); монографии «Влияние пороков на технические свойства древесины» (1949 г.) и «Строение древесины» (1954 г.); учебники для техникумов «Древесиноведение и лесное товароведение» (1954 г.) и вузов «Древесиноведение» (1957 г.) и др.

Последние 14 лет своей жизни Леонид Михайлович работал в МЛТИ. Скончался он в апреле 1959 г.

Отдавая долг памяти своему учителю, хочется отметить его преданность науке, выдающиеся способности экспериментатора, глубину и строгость научного мышления, великолепный литературный стиль и, наконец, удивительное трудолюбие. Велико и непреходящее научное наследие проф. Л. М. Перелыгина. До сих пор студенты пользуются собранными им коллекциями древесных пород и пороков древесины. Четырнадцать (1960, 1964, 1969 и 1971 гг.) вышли посмертные издания его учебников.

Имя Леонида Михайловича Перелыгина — общепризнанного авторитета в области механических испытаний древесины, глубокого знатока ее строения и свойств, выдающегося педагога, вошло в историю отечественной науки.

Б. Н. Уголев

Московский лесотехнический институт