

*Л.И. Рябчук\**, *Т.Ф. Смагленко\**, *М.Н. Чесноков\**, *С.Г. Орловская\**,  
*И.С. Андрианова.\*\**

*\*Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова*

*\*\*Одесский экологический университет.*

### **Динамика воспламенения твердого топлива (торфа) при импульсном лазерном облучении.**

Рассмотрено воспламенение и горение натурального топлива – торфа. Получены скорости тепловыделения за счет химических реакций в конденсированной и газовой фазах, а также тепловые потери за счет теплопроводности в конденсированной фазе и теплоотдачи в окружающую среду. Вычисление проведено для четырех пространственно-временных форм лазерного импульса: прямоугольного, двух треугольных (с быстрым нарастанием интенсивности в импульсе – 1 мс и медленным – 4 мс) и гауссовым. Проведено сравнение полученных результатов.

В настоящей работе сделана попытка, методом численного моделирования, выяснить влияние энергетических и пространственно – временных параметров внешнего теплового источника (лазера  $\text{CO}_2$ ) на воспламенение и горение образцов торфа. Компьютерная модель, описывающая процессы деструкции топлива и протекания химических реакций как в конденсированной, так и в газовой фазах, достаточно подробно описана в работах [1 - 4].

В качестве варьируемых параметров были выбраны мощность лазерного излучения  $I$  ( $I$  меняется в интервале от  $10^3$  до  $10^4$  Вт/см<sup>2</sup>) и форма импульса – прямоугольная (рис. 1а), разносторонние треугольники (рис. 1б, в) и гауссовская кривая. Длительность импульса  $\tau = 5$  мс.

Лазерный луч, падая на поверхность мишени по нормали навстречу оси  $Z$ , образует световое пятно радиусом  $R = 0,5$  см. Оси  $X$  и  $Y$  лежат на нижней не облучаемой поверхности (рис. 2), толщина мишени  $H = 0,5$  см.

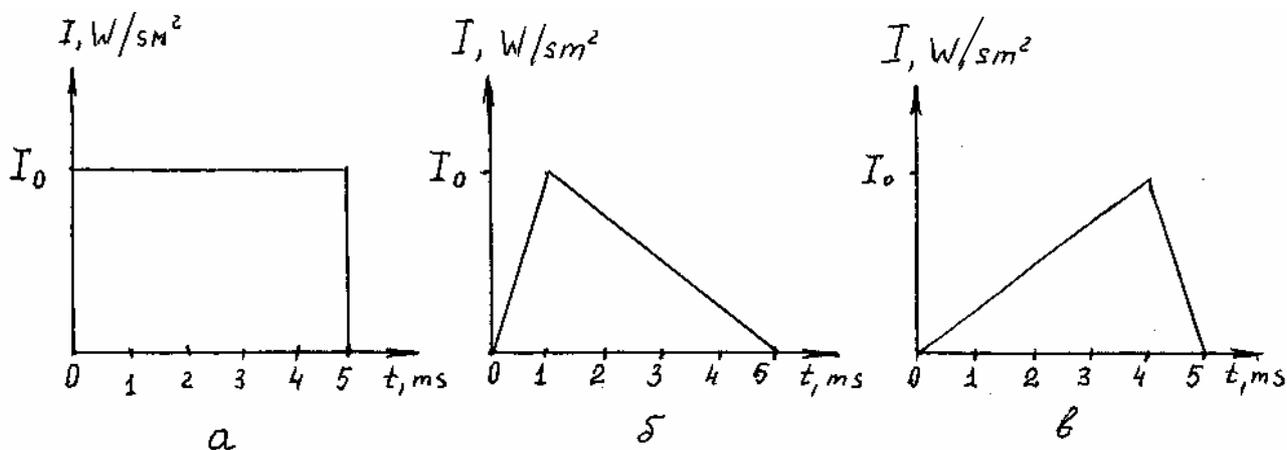


Рис. 1. Распределение энергии в импульсе.

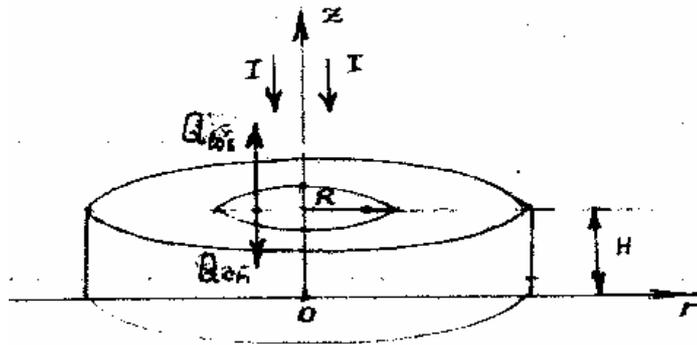


Рис. 2. Схема облучения образца лучом CO<sub>2</sub> – лазера.

При интенсивности лазерного импульса  $I = 10^3 \text{ Вт/см}^2$  образец не разрушается и не воспламеняется. Воспламенение происходит при мощностях  $1,5 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$  и выше. В интервале интенсивностей  $I = (1,5 \div 3,0) \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$  температура поверхности образца в области лазерного пятна быстро растет от  $T_0 = 293 \text{ К}$  до  $T_{\tau,s} = 460 \text{ К}$ . При этом активизируются химические реакции на поверхности и должна наблюдаться деструкция конденсированной фазы. При одинаковых по энерговкладу,  $I = (1,75 - 3,0) \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$ , но различных по временной форме импульсах облучения поверхность образца воспламеняется через 12 мс, если импульс прямоугольный, через 11 мс для трехугольного импульса (рис. 1б) и через 11,5 мс для трехугольного импульса (рис. 1в). Затем воспламеняются летучие, т.е. газообразные продукты распада, и твердые мелкодисперсные частицы торфа (газовзвесь), если концентрация летучих достигает критического значения.

Первоначально все процессы идут за счет нагрева лазерным излучением, так как за время импульса химическое тепловыделение конденсированной фазы невелико. Например, при интенсивности лазерного излучения  $I = 2 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$  отношение  $I/Q_{sch} = 10^5$ . После окончания импульса температура горения растет за счет химических реакций газозвеси. Изменение температуры горения со

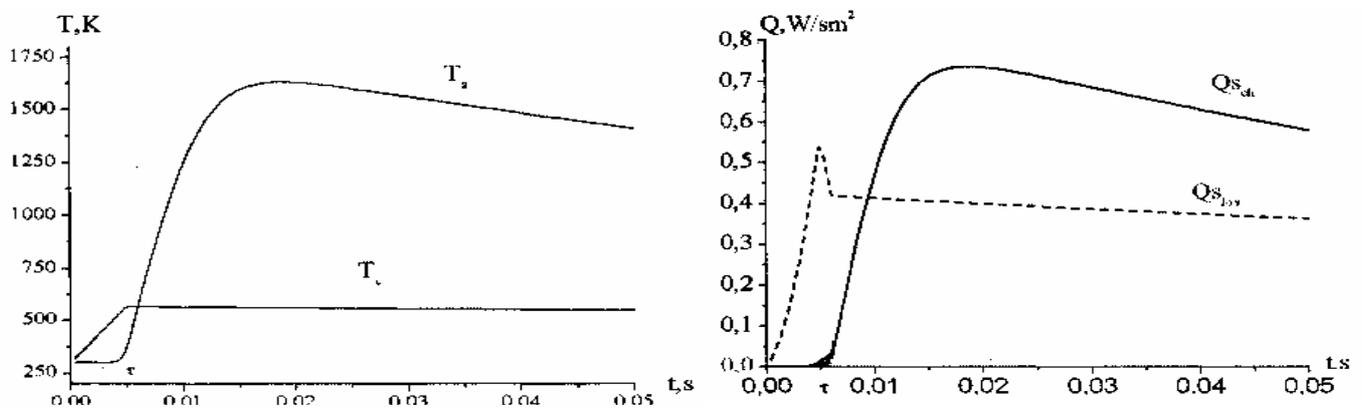


Рис.3. а) Изменение температуры образца  $T$  и температуры окружающей среды  $T_g$  с течением времени. б) количество выделяющегося тепла за счёт химической реакции на поверхности твёрдого топлива  $Q_{s,ch}$  и потери тепла в окружающую среду  $Q_{s,los}$ .

временем (прямоугольный импульс облучения) приведено на рис. 3а, а количество выделяющегося при горении тепла  $Q_{s,ch}$  за счет химических реакций в конденсированной фазе и суммарные тепловые потери на прогрев топлива и теплоотдачу в окружающую среду  $Q_{s,los}$  - на рис. 3б.

Приведены расчеты времени задержки воспламенения ( $t_{ig}$  индукции) в зависимости от интенсивности лазерного излучения. Результаты расчета приведены на рис. 4 б.

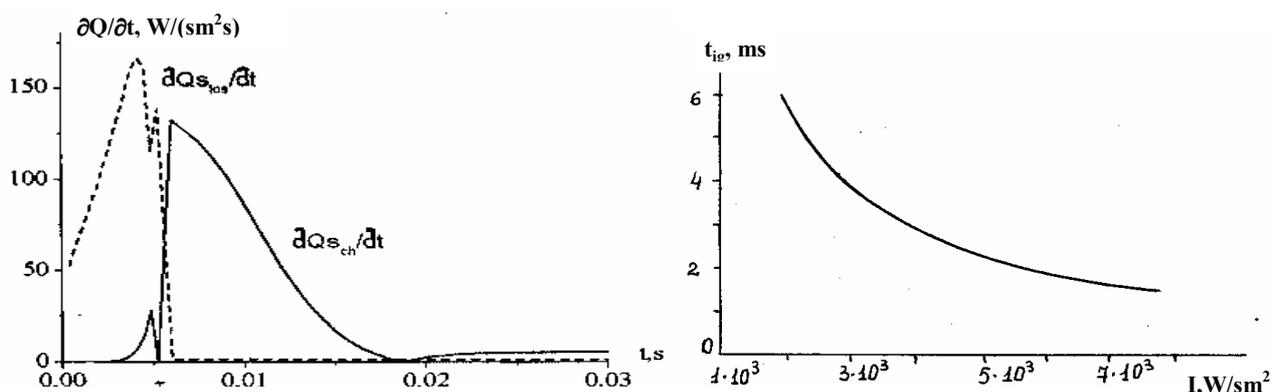


Рис.4. а) Временные зависимости скоростей изменения  $Q_{s,ch}$  и  $Q_{s,los}$  при интенсивности лазерного излучения  $I = 2 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>.

б) время задержки воспламенения конденсированной фазы как функция интенсивности лазерного излучения. Длительность импульса  $\tau = 5$  мс, форма импульса - треугольник.

При интенсивности облучения от  $1,5 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup> до  $3,5 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup> сначала воспламеняется поверхность образца, затем через некоторое время – газовзвесь (рис.4а), где 1-ый максимум на кривых – воспламенения конденсированной фазы; второй – воспламенение и горение газовзвеси.

При импульсах мощности  $I = 3,5 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup> и выше сначала воспламеняется газовзвесь. В этом случае горение взвеси в объеме подавляет горение на поверхности, т.е.  $\left(\frac{\partial Q_{g,ch}}{\partial t}\right) > \left(\frac{\partial Q_{s,ch}}{\partial t}\right)$ .

На 6 мс начинается интенсивное горение газовой взвеси и тепловыделение достигает максимальной величины (рис. 5). Примерно в это же время концентрация горючих газов также имеет максимальную величину (рис. 6).

По мере выгорания летучих температура факела снижается и сравнивается с температурой поверхности. Скорость изменения температуры зависит от формы и интенсивности лазерного импульса.

В зависимости от интенсивности импульса затухание факела наблюдается в интервале от 10 мс до 50 мс. Так, при интенсивности импульса, имеющего временную треугольную форму,  $I = 3,5 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup> первое затухание начинается на 40,5 мс, минимум значения  $\left(\frac{\partial Q_{s,ch}}{\partial t}\right)$  на 44,0 мс. Повторная интенсификация горения наблюдается на 50 мс. Кроме того, при определенных условиях на-

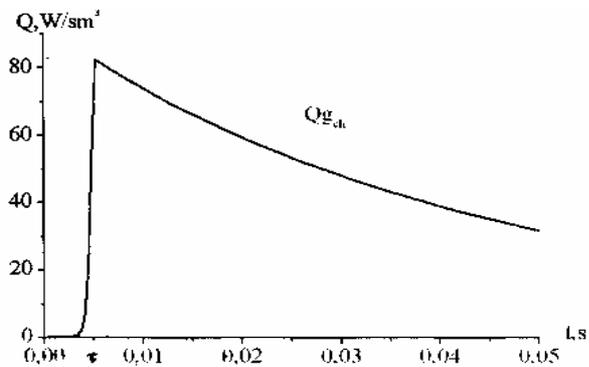


Рис. 5 Тепловыделение при горении «летучих»

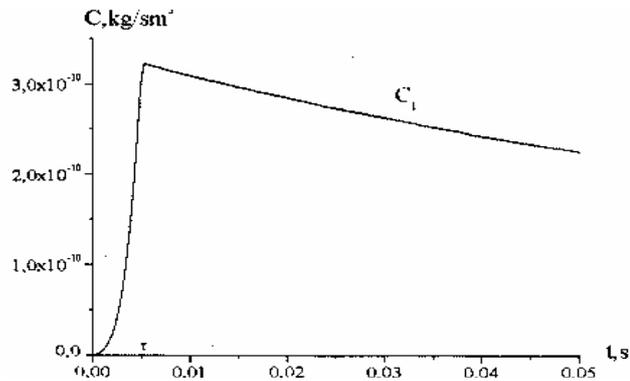


Рис.6 Изменение концентрации «летучих» во время импульса и после.

блюдается горение как конденсированной, так и газовой фаз одновременно. В наших расчетах это наблюдается в интервале  $37 \div 40$  мс и  $50 \div 55$  мс в полном расчетном временном интервале от конца импульса 5 мс и до заданного конечного времени 100 мс, т.е. в интервале  $5 \div 100$  мс.

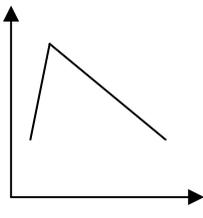
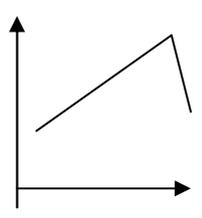
Пригасание горения топлива наблюдалось и другими авторами. Экспериментально было получено в работе [5], при компьютерном моделировании – в работах [6,7].

Если не подпитывать поверхностное горение последующими лазерными импульсами, то пульсационное горение без особой скорости (т.е. «вялое» горение) может продолжаться до полного выгорания, т.е. тление торфа с возможными вспышками смеси «летучих» и дисперсных частиц торфа. Это подтверждается анализом скоростей тепловыделения за счет химической реакции и скоростей потерь тепловой энергии на прогрев топлива и теплоотдачи в окружающую среду.

С целью выяснения влияния временной формы лазерного импульса на теплофизические и физикохимические процессы воспламенения и горения торфа нами проведено сопоставление некоторых расчетных величин для треугольной формы импульса при мощности в импульсе  $I = 3,5 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>, длительность импульса  $\tau = 5$  мс. Результаты сопоставления приведены в таблице.

Из таблицы видно, что форма импульса сказывается на горении твердой фазы только во время действия непосредственно самого импульса, т.е. в промежутке  $0 \div 5$  мс. При быстром нарастании максимума (рис. 1б) скорость выделения тепла за счет химической реакции в конденсированной фазе в максимуме и в конце импульса меньше, чем при более медленном нарастании импульса (рис. 1в). (см. 3-й и 4-й номера таблицы). В дальнейшем, уже на 11 мс, пространственно-временная форма лазерного импульса не сказывается. Процесс горения практически определяется горением газовой фазы. Горящая газовая смесь уже не «помнит» формы первичного импульса. Однако время воспламенения газовой фазы и интенсивность ее горения зависит от формы импульса. Это позволяет влиять на механизм горения и переход горения из поверхностного в объемное и наоборот.

При интенсивности излучения  $10^3 \div 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> и рассматриваемых интервалах времени  $t \leq 200$  мс процессы горения поверхности и газовой фазы в пределах пятна облучения поддерживают друг друга благодаря обратной связи.

№ п/ п	Временная форма импульса  Физическая величина и ее численное значение		
			
1	$T_{s,\tau}$ – температура поверхности образца к концу импульса $\tau$ , К	533,5	534,0
2	$C_1$ – концентрация «летучих» к концу импульса	$2,1 \cdot 10^{-10}$ кг/см <sup>3</sup>	$2,2 \cdot 10^{-10}$ кг/см <sup>3</sup>
3	$\left(\frac{\partial Q_{s,ch}}{\partial t}\right)_{I=I_0}$ при $I = I_0$ лазерного импульса	3,3 Вт/см <sup>2</sup>	6,9 Вт/см <sup>2</sup>
4	$\left(\frac{\partial Q_{s,ch}}{\partial t}\right)_{\tau}$ в конце импульса	1,6 Вт/см <sup>2</sup> с.	6,0 Вт/см <sup>2</sup> с.
5	$\left(\frac{\partial Q_{s,ch}}{\partial t}\right)_{\tau=11,2ms}$ на 11, 2 мс.	18,0 Вт/см <sup>2</sup> с.	18,2 Вт/см <sup>2</sup> с.
6	$\left(\frac{\partial Q_{s,ch}}{\partial t}\right)_{\tau=40ms}$ на 40 мс	0,82 Вт/см <sup>2</sup> с.	0,72 Вт/см <sup>2</sup> с.
7	$\left(\frac{\partial Q_{s,ch}}{\partial t}\right)_{\tau=44ms}$ на 44 мс	0,03 Вт/см <sup>2</sup> с.	0,06 Вт/см <sup>2</sup> с.
8	$\left(\frac{\partial Q_{s,ch}}{\partial t}\right)_{\tau=50,2ms}$ на 50,2 мс	0,86 Вт/см <sup>2</sup> с.	0,93 Вт/см <sup>2</sup> с.

При достаточно мощных импульсах (свыше  $10^4$  Вт/см<sup>2</sup>) воспламенение и горение торфа начинается с газозвеси торфа, в то время как в конденсированной фазе должны наблюдаться отдельные вспышки, не приводящие к стационарному горению облучаемой поверхности.

Проведен также компьютерный эксперимент по воздействию лазерного импульса, временная форма которого имеет вид кривой Гаусса

$$I(t) = I_{\max} \left(\frac{\ln 2}{t}\right)^{1/2} \exp \left\{ - \left[ \frac{r(\ln 2)^{1/2} (t - t_{\max})}{t_p} \right]^2 \right\},$$

где  $t_p$  - время достижения половинной мощности,  $t_{max}$  - время достижения максимальной мощности.

Полученные результаты распределения температуры и тепловых потоков для гауссовой формы импульса примерно такие же, как и при треугольной форме импульса, особенно при временах более 5 мс. Отличие не более чем на 1-3%, в связи с чем мы их не приводим.

### Литература.

1. Рябчук Л.И., Чесноков М.Н. Воспламенение и потухание таблетки торфа при лазерном возбуждении химических реакций на поверхности. // Физика аэродисперсных систем. – 2001. – Вып. 38 – С.118-127.
2. L.I.Ryabchuk, M.N.Chesnokov. Ignition of organic fuel by pulse laser radiation. Abstracts of XI International Conference “Laser-matter interaction”. Petersburg, Pushkin, June 28 – July 1, 2003.
3. Рябчук Л.И., Чесноков М.Н. Воспламенение и горение твердого органического топлива под действием импульсного  $CO_2$  лазера. // Матеріали конференції “Біофізичні стандарти та інформаційні технології в медицині” – Одеса: Листопад, 2004. – С.78-81.
4. Рябчук Л.И., Чесноков М.Н., Смагленко Т.Ф., Трофименко М.Ю.// Динамика воспламенения и перехода в горение твёрдого топлива (торф) при импульсном лазерном облучении. // Дисперсные системы. XXII, научная конференция стран СНГ, 18-22 сентября 2006 г., тезисы доклада. – Одеса, 2006. – С.289.
5. И.Г.Ассовский, З.Г.Закиров, О.И.Лейпунский. Эффекты нестационарного горения при зажигании топлива. //Химическая физика. – 1985.– Т.4, №10. – С.1417-1422.
6. И.Г.Дик, Е.А.Саженова, А.М.Селиховкин. Роль газовой фазы на переход в горение конденсированного вещества при зажигании радиационным потоком. //Физика горения и взрыва. – 1991. – Т.27, №4, – С.7-12.
7. В.Ф.Михеев, Ю.В.Левашов //Физика горения и взрыва. –1973. – Т.9, №4. – С.506.

*Л.І. Рябчук, Т.Ф. Смагленко, М.М. Чесноков, С.Г.Орловська,  
І.С.Андріанова*

**Динаміка запалювання твердого палива (торфу) при імпульсному лазерному випромінюванні.**

### АНОТАЦІЯ

Розглянуто запалювання та горіння природнього палива – торфу. Отримано швидкості тепловиділення за рахунок хімічних реакцій в конденсованій та газовій фазах, а також теплові втрати за рахунок теплопровідності у конденсованій фазі та тепловіддачі в навколишнє середовище. Обчислювання проведено

для чотирьох просторово-часових форм лазерного імпульса: прямокутного, двох трикутних (із швидким нарощуванням інтенсивності в імпульсі – 1мс та повільним – 4 мс) та гаусовського. Проведено порівняння одержаних результатів.

*L.I. Ryabchuk, T.F. Smaglenko, M.N. Chesnokov, S.G. Orlovskaja,  
I.S. Andrianova*

**Ignition and burning dynamic of the solid fuel (peat) under laser radiation impulse .**

**SUMMARY**

Ignition and combustion of peat tables was investigated on the basis of the model described earlier [1 – 4]. Rate of heat production due to chemical reactions and heat losses by conductivity and radiation were calculated. The calculations were fulfilled for different spatial-temporal impulse shapes: rectangular one, two triangular-shaped impulses and Gaussian one. The results obtained were presented in table.