

**Головко В.В.**

Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова

E-mail: chem\_phys@ukr.net

### **Противоточное тление горючих растительных материалов**

*Исследован стационарный режим распространения волны тления по пористым образцам дисперсных растительных горючих материалов (РГМ). Показано, что при противоточном тлении, в условиях фильтрационного подвода окислителя, зависимости скорости тления и температуры в зоне тления от скорости входящего в реактор потока воздуха имеют максимум при  $V_n \sim 20$  см/с. Подобие зависимостей свидетельствует о преимущественном влиянии на процесс тления кинетики химических реакций окисления горючего. Полагая, что масштаб гетерогенности вещества мал и глубина превращения полная, решена задача о нахождении скорости распространения волны тления.*

**Введение.** Закономерности распространения волны тления при вынужденной фильтрации окислителя по дисперсному веществу изучены в меньшей степени, чем волновое горение гомогенных систем. Это связано, прежде всего, со стадийностью тления и сложностью учета всех физико-химических процессов, протекающих в волне тления. Теоретические модели вынужденного тления различаются как типом и количеством химических реакций, так и условиями тепло-массообмена между частицами горючего и фильтрующимся через образец окисляющим газом [1-3]. Как правило, это численные модели, что затрудняет количественное сопоставление результатов экспериментов с теоретическими выводами.

Целью настоящей работы было изучение закономерностей противоточного тления дисперсного растительного горючего и разработка аналитической модели процесса.

**Экспериментальные исследования.** Экспериментальные исследования проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1.

Регулируемый поток воздуха подавался по магистрали на вход камеры, где устанавливался цилиндрический кварцевый реактор диаметром 25 мм. Модельное горючее – табак, древесные опилки – уплотнялись в реакторе до пористости  $\Pi = 0,7$ . Длина образцов составляла 40-50 мм. Поджиг осуществлялся в верхней части образца внешним пламенем. Тогда зона тления распространялась сверху вниз, а поток воздуха снизу вверх. Такой режим тления называют противоточным. В качестве скорости потока воздуха  $V_n$  брали среднюю скорость по площади поперечного сечения на входе реактора. Для регистрации температуры образца при распространении волны тления через отверстие в корпусе реактора в образец вводилась термопара, включенная в цепь самописца или ПК. Характерная термограмма приведена на рис. 2.

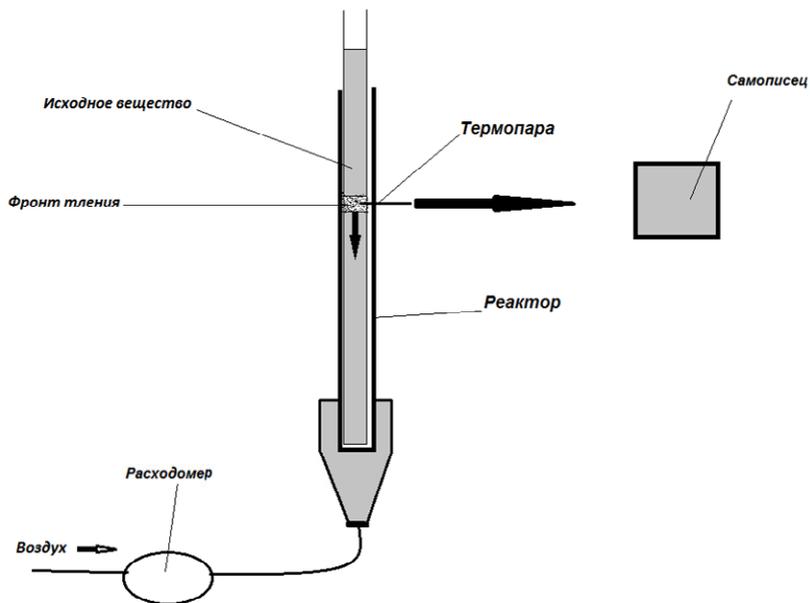


Рис. 1. Схема установки.

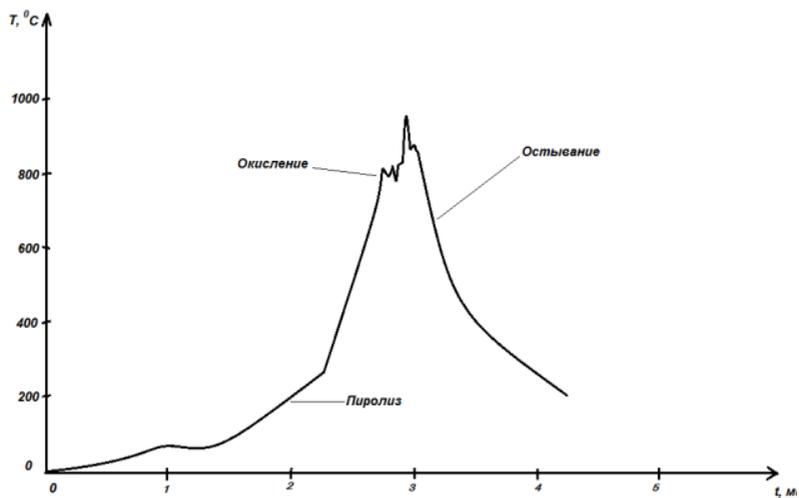
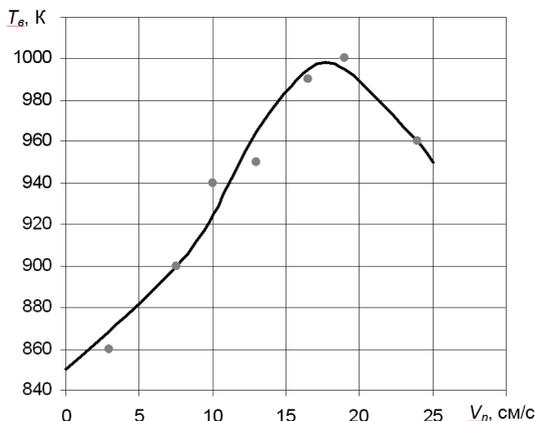


Рис. 2. Термограмма процесса распространения тления.

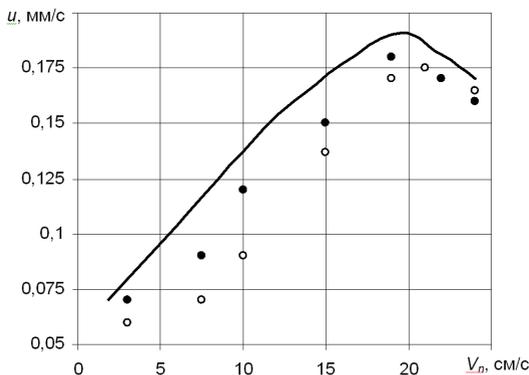


**Рис. 3.** Зависимость температуры зоны тления табака от скорости потока воздуха.  
Кривая 1 – аппроксимирующая зависимость.

Как показали результаты термографирования процесса тления, а также экспериментальные данные, приведенные в работах [1, 4], тление является стадийным процессом. В структуре волны тления можно выделить три зоны химических превращений: зона эндотермического или слабо экзотермического пиролиза клетчатки, зона экзотермической реакции окисления продуктов пиролиза и гетерогенного окисления углистого остатка (кокса). Каждая стадия процесса тления протекает в своём температурном интервале и в своей пространственной области. Влияние отдельных стадий (зон) друг на друга сводится к изменению потоков реагентов и конверсии тепла.

Обратимся к результатам экспериментов. На рис. 3 приведена зависимость температуры фронта тления табака от скорости внешнего потока на входе в реактор.

Видно, что с увеличением скорости потока воздуха температура в зоне тления плавно увеличивается и достигает максимума при скорости потока  $\sim 20$  см/с. Дальнейшее увеличение скорости потока приводит к снижению температуры зоны тления. Такой ход зависимости температуры тления от скорости потока окисляющего газа  $V_n$  можно объяснить следующим образом. При противоточном тлении в прогретом слое волны тления имеются оба необходимых для реакции окисления реагента, поэтому следует ожидать, что процесс тления лимитирует кинетика химических реакций окисления горячего. В гетерогенной реакции окисления частиц горячего скорость химической реакции пропорциональна концентрации кислорода. Поэтому при увеличении скорости подвода воздуха увеличивается скорость химической реакции, а значит и скорость тепловыделений в зоне тления. Соответственно растёт и температура тления, что, в свою очередь, увеличивает скорость распространения волны тления. Поскольку



**Рис. 4.** Зависимость скорости распространения фронта тления от скорости потока воздуха. ● – табак; ○ – древесные опилки; – расчёт.

продукты реакции (пепел) являются хорошим теплоизолятором [1], то отвод тепла, фильтрующимся через зону реакции газом в диапазоне скоростей внешнего потока до 20 см/с, незначителен. Однако, при дальнейшем увеличении скорости потока воздуха начинают сказываться затраты тепла на нагрев избыточного количества холодного воздуха и теплопотери, связанные с отводом тепла из зоны тления в атмосферу фильтрующимся газом. В результате температура зоны тления уменьшается, и процесс тления затухает.

Таким образом, один и тот же внешний фактор (поток воздуха, фильтрующийся через образец) при низких скоростях потока – увеличивает скорость тепловыделений в зоне тления за счёт интенсификации химической реакции окисления горючего, а при высоких – повышает скорость теплопотерь в результате вынужденной конвекции. Понятно, что для стационарного распространения волны тления необходимо, чтобы скорость теплопотерь не превышала скорости тепловыделений.

Для практических приложений [5] представляет интерес зависимость скорости тления  $u$  от скорости внешнего потока воздуха  $V_n$ , фильтрующегося через образец РГМ. Соответствующие экспериментальные данные при распространении тления по образцам табака и древесных опилок приведены на рис. 4.

Скорость распространения волны тления, также, как и температура в зоне тления, увеличивается с ростом скорости потока, затем при значениях  $V_n \sim 20$  см/с проходит через максимум и начинает снижаться при  $V_n > 20$  см/с. Аналогичный, с экстремумом, характер зависимости наблюдался в работе [6] при тлении сосновых опилок. Подобие зависимостей  $T = f(V_n)$  и  $u = f(V_n)$ , а также хорошее качественное согласование данных по скоростям тления табака и древесных опилок (рис. 4) позволяет утверждать, что скорость распространения волны тления в противоточном режиме определяется кинетикой химической реакции окисления углистого остатка, обеспечивающей основное тепловыделение в зоне тления.

Для расчета скорости распространения волны тления в условиях вынужденной фильтрации окисляющего газа ограничимся только гетерогенной реакцией окисления углистого остатка. Будем считать, что реализуется режим полного превращения исходного вещества, а гидродинамическая обстановка полностью определяется заданием расхода газа в верхнем (до фронта) сечении. Тогда скорость распространения фронта тления можно определить интегрированием уравнений теплового баланса и кинетики выгорания горючего методом Я.Б. Зельдовича – Д.А. Франк-Каменецкого.

В системе координат, связанной с фронтом тления, уравнения, описывающие стационарное распространение волны тления, в одномерном приближении имеют вид:

$$\alpha \cdot \frac{d^2 T}{dx^2} - u \cdot \frac{dT}{dx} + \frac{Q}{\rho c} \cdot W(T, a) = 0; \quad (1)$$

$$-u \frac{da}{dx} + \frac{1}{\rho} \cdot W(T, a) = 0; \quad (2)$$

$$W(T, a) = k_0 \cdot (1 - a) \cdot \rho \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad (3)$$

Граничные условия:

$$x \rightarrow -\infty; T = T_0; \quad a = 0.$$

$$x \rightarrow +\infty; T = T_g; \quad a = 1; \quad \frac{dT}{dx} = 0, \quad T_g = T_0 + \frac{Q}{c}.$$

Здесь:  $x$  – пространственная координата;  $T$  – температура;  $a$  – относительная концентрация продукта;  $\alpha$  – коэффициент теплопроводности;  $c$  – теплоёмкость;  $\rho$  – плотность;  $E$ ,  $k_0$ ,  $Q$  – энергия активации, предэкспоненциальный множитель, тепловой эффект реакции окисления.

Исключив из уравнений (1), (2) скорость химической реакции  $W(T, a)$  и учитывая граничные условия при  $x \rightarrow -\infty$ , получим первый интеграл этих уравнений

$$\alpha \cdot \frac{dT}{dx} - u \cdot (T - T_0) + \frac{uQ}{c} \cdot a = 0. \quad (4)$$

Из-за сильной зависимости скорости химической реакции от температуры максимальное тепловыделение будет наблюдаться в узком интервале температур вблизи  $T_g$ . Поэтому для зоны тления в уравнении (4) положим  $T = T_g$ . В результате получим соотношение, определяющее в этой зоне связь между температурой и концентрацией

$$\alpha \cdot \frac{dT}{dx} = u \cdot \frac{Q}{c} \cdot (1 - a).$$

На передней границе зоны тления, когда  $a = 0$ , получим условие на значение градиента температуры в момент начала химической реакции

$$\frac{dT}{dx} = \frac{uQ}{c\alpha}. \quad (5)$$

Для зоны химической реакции (зона тления), также, как и в теории распространения пламени по газовой системе, вторым слагаемым в уравнении (1) можно пренебречь. Тогда уравнение (1) будет иметь вид:

$$-\alpha \cdot \frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{Q}{\rho c} \cdot W(T).$$

Учитывая, что тепло, генерируемое реакцией окисления углистого остатка, отводится в область низких температур, найдем

$$\frac{dT}{dx} = \frac{k_0}{u} \cdot \frac{RT_g^2}{E} \cdot e^{-E/RT_g}. \quad (6)$$

Сравнивая (5) и (6), получим выражение для линейной скорости распространения волны тления

$$u^2 = \frac{\lambda \cdot k_0 \cdot RT_g^2}{Q \cdot \rho \cdot E} \cdot e^{-E/RT_g}. \quad (7)$$

Также, как и в работе [7], при фильтрационном подводе окисляющего газа в противоточном режиме тления, температура в зоне тления будет определяться выражением

$$T_g = T_0 + \frac{Q}{c} = T_0 + \frac{Q}{c_0 + \frac{c_z F}{\rho u}}, \quad (8)$$

где  $c_0$ ,  $c_z$ ,  $F$  – теплоёмкость вещества, теплоёмкость окисляющего газа, плотность потока газа.

Из соотношений (7) и (8) следует, что температура в зоне тления и скорость распространения волны тления достигнув максимума, при дальнейшем увеличении скорости потока воздуха начинают уменьшаться. Положение максимума температуры определяется условием  $\frac{F \cdot a_{O_2}}{\rho u} = 1$  и, как показывает оцен-

ка, соответствует скорости потока  $\sim 20$  см/с.

На рис. 4 приведена расчетная зависимость  $u(V_n)$ , полученная по выражению (7) с использованием опытных значений температур зоны тления при различных скоростях потока воздуха (рис. 3) и кинетических констант работы [8]. Как видно, наблюдается хорошее качественное согласование расчёта и эксперимента, что свидетельствует о допустимости приближений, принятых при расчёте скорости распространения волны тления.

Таким образом, при противоточном тлении дисперсных РГМ скорость распространения волны тления определяется кинетикой гетерогенной реакции окисления углистого остатка. Наличие экстремума на зависимостях  $u(V_n)$  и  $T(V_n)$  обусловлено конкуренцией процессов тепловыделения в зоне тления и теплопотерь за счёт вынужденной конвекции.

### Литература:

1. *Summerfield M., Ohlemiller T., Sundusky H.* Thermophysical Mathematical Model of Steady – Draw Smoking and Predictions of Overall Cigarette Behavior // *Combustion and Flame.* – 1978. – № 33. – P. 263-279.
2. *Buckmaster J., Lozinsky D.* Theoretical Model of Smoldering Combustion // *Combustion and Flame.* – 1996. – № 104. – P. 300-310.
3. *Shult D., Matkowsky B. et all.* Forward Smolder Combustion // *Combustion and Flame.* – 1996. – №104. – P. 1-26.
4. *Головко В.В. и др.* Волна тления в органическом горючем // *Физика аеродисперсних систем.* – 2008. – Вып. 45. – С. 45-53.
5. *Салганский Е. А., Кислов В. М. и др.* Разделение зон превращения твердых топлив при фильтрационном горении // *Сб. Химическая и радиационная физика.* Под ред. *Ассовского И.Г., Берлина А.А., Манелиса Г.Б., Мержянова А.Г.* – 2011. – т. 4. – М.: ТОРУС ПРЕСС. – С. 310-313.
6. *Бахман Н.Н., Кузнецов Г.П., Пучков В.М.* Влияния направления и скорости потока воздуха на характеристики волн тления в пористых слоях горючего // *Физика горения и взрыва.* – 2002. – т. 39, № 5. – С. 33-40.
7. *Алдушин А.Н., Сеплярский Б.С.* Распространение волны экзотермической реакции в пористой среде при продуве газа // *Доклады Академии Наук СССР.* – 1978. – т. 241. – С. 72-75.
8. *Головко В.В. и др.* Распространение волны тления по натуральным горючим // *Дисперсные системы. XIX научная конференция стран СНГ, 2000 г., Одесса, Украина / Тез. докл.* – Одесса: Астропринт, 2000. – С. 48.

### Головко В.В.

### Протиточне тління горючих рослинних матеріалів

#### АНОТАЦІЯ

Досліджено стаціонарний режим поширення хвилі тління по пористим зразкам дисперсних рослинних горючих матеріалів (РГМ). Показано, що при протиточному тлінні, в умовах фільтраційного підведення окислювача, залежності швидкості тління і температури в зоні тління від швидкості вхідного в реактор потоку повітря мають максимум при  $V_n \sim 20$  см/с. Подібність залежностей свідчить про переважний вплив на процес тління кінетики хімічних реакцій окислення пального. Вважаючи, що масштаб гетерогенності речовини малий і глибина перетворення повна, вирішена задача про знаходження швидкості поширення хвилі тління.

#### Golovko V.V.

### Counterflow smoldering of combustible biomaterials

#### SUMMARY

Smoldering wave propagation stationary regime via porous samples of dispersed biomaterials was investigated. It was shown, that at counterflow smoldering, under filtration oxidant supplement conditions, smoldering velocity and smoldering zone temperature dependences via incoming into reactor air flow speed have a maximum at  $V_n \sim 20$  cm/s. Similarity of these dependences shows the fuel oxidation chemical reactions kinetics primary influence on smoldering process. Assuming that the heterogeneous substance scale is small and the conversion depth is complete, the problem of smoldering wave propagation velocity definition was solved.