

Головко В.В., Вовчук Я.И., Идисис Е.А.

*Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова
Институт горения и нетрадиционных технологий*

Волна тления в органическом горючем

Экспериментально исследованы структура и скорости поточного и противоточного тления в образцах табака различной плотности. Выделены четыре характерных области в волне тления. Выявлено качественное различие характера зависимостей скорости и ширины зоны тления от скорости потока окислителя - монотонно растущая для поточного и экстремальная, с максимумом, для противоточного тления. Показано, что при поточном тлении скорость волны лимитируется подводом окислителя, а при противоточном - кинетикой реакций.

Распространение тления по органическим веществам представляет собой сложный физико-химический процесс, который является результатом одновременного протекания газификации горючего и последующего его окисления (т.е. химические процессы), транспорта тепла, а также окислителя и продуктов реакции через пористое вещество - исходное горючее или его продукты окисления (физические процессы). Число параметров, влияющих на скорость и режимы распространения волны тления, существенно больше, чем при горении гомогенных или гетерогенных систем, что усложняет понимание роли физических и химических факторов на отдельные стадии тления. Поэтому экспериментальное изучение структуры волны тления и скорости ее распространения дает возможность получить новые знания о процессе, на основе которых можно ставить и решать задачи по управлению тлением.

Необходимо отметить, что такие данные представляют самостоятельный интерес, так как, тление достаточно часто бывает причиной пожаров, поскольку для его инициирования необходим гораздо более слабый источник, чем для инициирования горения, оно может длительное время протекать скрытно и часто переходит в горение.

Основными параметрами, которые определяют характеристики тления, являются скорость внешнего потока окисляющего газа, содержание окислителя, дисперсность и пористость горючего, а также его физические свойства, плотность образца, его геометрические размеры.

Целью настоящей работы было изучение влияния скорости внешнего потока и плотности образцов на структуру и скорость поточного и противоточного тления. В качестве объекта исследований использовались цилиндрические образцы табака, бронированные папиросной бумагой, длиной 40 мм, диаметром 8 мм. (Такая система по классификации, предложенная в работе [1], называется "закрытой"). Для определения влияния плотности упаковки вещества использовались образцы разной плотности $\rho_z = 0.275 \text{ г/см}^3$ и $\rho_z = 0.92 \text{ г/см}^3$.

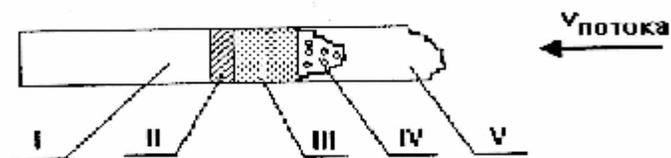


Рис. 1 Схема поточного распространения волны тления.

- I – исходное горючее;
- II – зона газификации горючего;
- III – зона окисления топлива;
- IV – зона окисления углистого остатка;

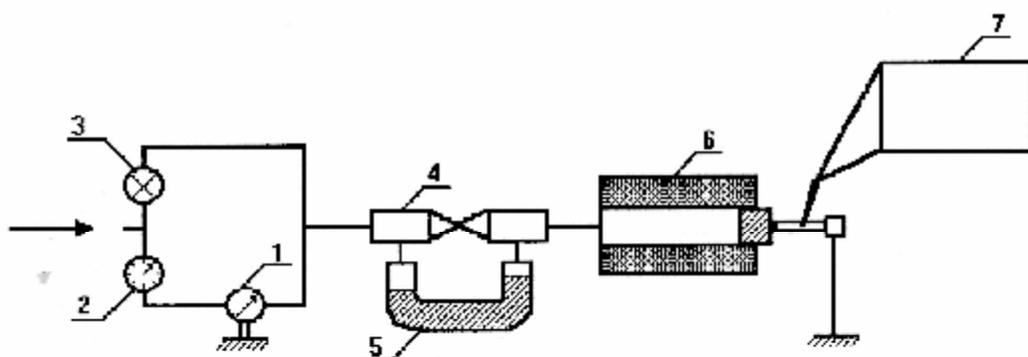


Рис. 2 Блок-схема экспериментальной установки:

- 1 – компрессор, 2 – газовый счётчик, 3 – игольчатый кран, 4 – диафрагма, 5 – дифференциальный манометр, 6 – электронагревательная печь, 7 – двухкоординатный самописец.

В экспериментах исследовалось поточное и противоточное тление. Поточным называется такой вариант тления, когда поток окисляющего газа (в наших опытах - воздуха), сонаправлен движению волны тления, то есть подводится к зоне реагирования через продукты реакции, а противоточным - когда направление подачи газообразного окислителя противоположно направлению распространения волны, т.е. окислитель попадает в зону тления через пористое исходное горючее [2]. Схематически поточное тление изображено на рис. 1.

Исследования проводились на установке, блок-схема которой приведена на рис. 2.

Поток воздуха из компрессора 1 подавался по магистрали в газовый счётчик 2 и через кран 3 поступал в канал электронагревательной печи 6. В канал печи вводилась заглушка с отверстием диаметром 8 мм. Линейная скорость потока определялась по расходу воздуха, определяемого газовым счётчиком 2 и манометром 5, и изменялась в опытах в диапазоне $v_{п} = 0 - 10$ см/с.

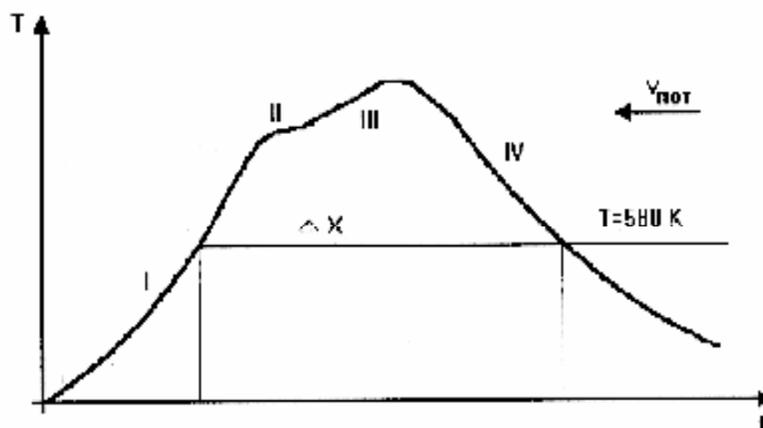


Рис 3 Характерная термограмма изменения температуры в фиксированной точке образца при распространении волны тления.

Образец цилиндрической формы крепился в специальном держателе и устанавливался одним из торцов вплотную к соплу заглушки, чтобы исключить обдувание образца по боковой поверхности. В образец через боковую поверхность вводилась хромель-алюмелевая термопара с диаметром спая порядка 50 мкм, которая помещалась на оси цилиндрического образца. Сигнал с термопары подавался на двухкоординатный самописец 7. При зажигании образца от дежурного пламени возникал фронт тления, который на начальном участке образца имел сложную геометрическую форму. По мере его продвижения по образцу форма фронта стабилизировалась в плоскость. Скорость распространения волны тления u определялась на участке образца, где фронт имел плоскую форму и тление распространялось стационарно. Время прохождения волны тления между двумя метками определялось секундомером. Ширина зоны тления определялась с помощью термограмм.

Согласно [2] в структуре волны тления можно выделить три зоны химических реакций: зона эндотермического пиролиза топлива, зона экзотермического реагирования продуктов пиролиза и гетерогенного окисления твердого горючего и зона экзотермического доокисления углистого остатка. Устойчивое распространение волны тления возможно, если потока тепла из областей, где протекают экзотермические реакции, будет достаточно для реакции пиролиза. В случае поточного тления часть этого тепла возвращается потоком окислителя, который прогревается, проходя через продукты. Кроме того, часть тепла передается из более разогретых областей в зону пиролиза кондукцией. При противоточном тлении передача тепла из зон тепловыделения осуществляется только теплопроводностью. Естественно, что при поточном тлении происходит более полное сгорание топлива, чем при противоточном.

На рис. 3 приведена характерная термограмма процесса распространения волны тления по образцу, которая наблюдалась в наших опытах.

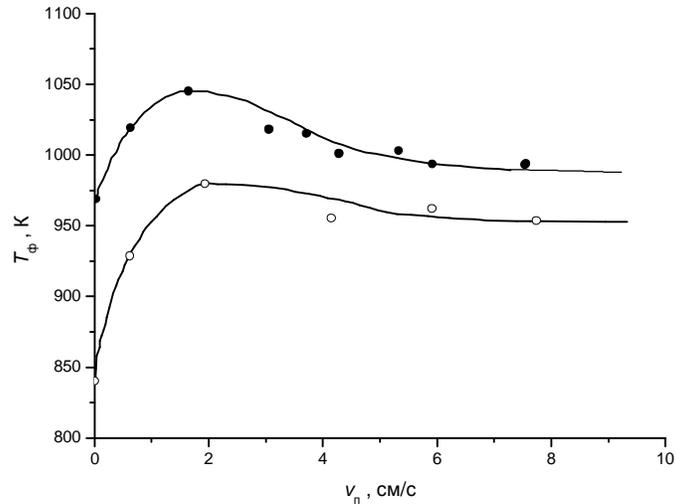


Рис. 4 Зависимость температуры фронта тления от скорости спутного потока.

● – $\rho_z = 0.295$ г/см³; ○ – $\rho_z = 0.92$ г/см³.

Как видим, полученные термограммы позволяют достаточно четко выделить четыре характерных области в волне тления. Область I соответствует прогреву исходного топлива до температуры зажигания $T_3 = 580$ К, которая определялась независимыми опытами в термошкафу при обдуве образцов нагретым потоком воздуха. Излом, который наблюдался на границе между областями I и II на термограмме, отождествлялся нами как начало зоны эндотермической реакции газификации топлива. Область III – область максимальных температур – соответствует протеканию экзотермических реакций окисления топлива. Наконец, область IV – это область нагретых продуктов сгорания, в которой протекает экзотермическая реакция доокисления углистого остатка.

Ниже представлены экспериментальные данные по зависимостям максимальной температуры в зоне тления, которую в дальнейшем будем называть температурой фронта тления T_ϕ , ширины зоны тления Δx (см. рис. 2) и скорости распространения волны тления u от скорости потока окисляющего газа v_n и плотности образца ρ_z для поточного и противоточного тления.

Поточное распространение волны тления. На рис. 4 приведена зависимость температуры фронта тления от скорости потока сонаправленного с волной тления. Такой поток мы в дальнейшем будем, следуя [1], будем называть спутным. Как видим, при увеличении скорости потока температура T_ϕ возрастает, достигая максимального значения $T_\phi = 1040$ К при $v_n \approx 2$ см/с. Дальнейшее увеличение скорости потока приводит к плавному снижению температуры фронта тления. Поэтому можно выделить две области по значениям скорости потока v_n , в которых наблюдается возрастание (область I) и уменьшение (область II) температуры фронта тления T_ϕ . Рост температуры T_ϕ в области I обусловлен интенсификацией теплообмена между твердыми продуктами реагиру-

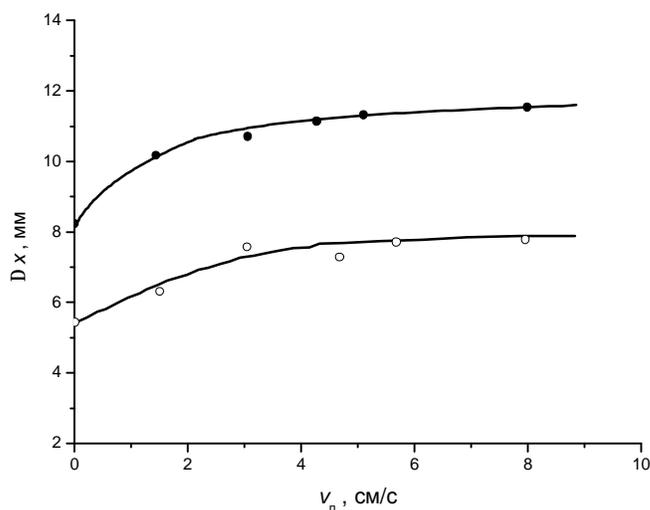


Рис. 5 Зависимость ширины зоны тления от скорости спутного потока.

● – $\rho_z = 0.295$ г/см³; ○ – $\rho_z = 0.92$ г/см³.

вания (углистый остаток) и фильтрующимся через них воздухом по мере увеличения скорости потока до значения v_n^* , отвечающего максимуму T_ϕ . При этом часть тепла, выделившаяся в результате химического реагирования углистого остатка, возвращается вместе с прогретым воздухом в зону основной экзотермической реакции окисления горючего, повышая тем самым температуру во фронте. В этой области, очевидно, скорость тления лимитируется, по-видимому, кинетикой химических реакций. Дальнейшее увеличение скорости потока воздуха приводит к относительно небольшому уменьшению температуры фронта тления. Это может быть следствием "захолаживания" фронта фильтрующимся через образец воздухом.

С ростом скорости спутного потока ширина зоны тления Δx увеличивается относительно слабо (рис. 5) для обоих значений плотности образца, и достигает практически постоянной величины. Тогда как величины линейной скорости тления u (рис. 4, 6) наблюдаемые в опытах наиболее заметно возрастают для плотности упаковки табака равной $\rho_z = 0.295$ г/см³. Причем, как видно из сопоставления данных, приведенных на рис. 4 и 6, рост скорости тления наблюдается и в области значений скорости обдувающего потока, где температура во фронте понижается. Это свидетельствует о том, что скорость тления в области II перестаёт быть кинетически управляемой и очевидно определяется газодинамическими факторами. Поскольку скорость тепловыделения в зоне тления определяется скоростью химических реакций окисления, которые в свою очередь пропорциональны концентрации окислителя, увеличение скорости тления можно объяснить следующим образом. По мере фильтрации воздуха через нагретые продукты реакции происходит не только нагрев воздуха, но и выгорание кислорода за счёт реакции окисления углистого остатка. В этом случае скорость тления определяется не кинетикой химической реакции окисления топлива, а скоростью подвода окислителя, т.е. скоростью внешнего потока воздуха. Поэтому,

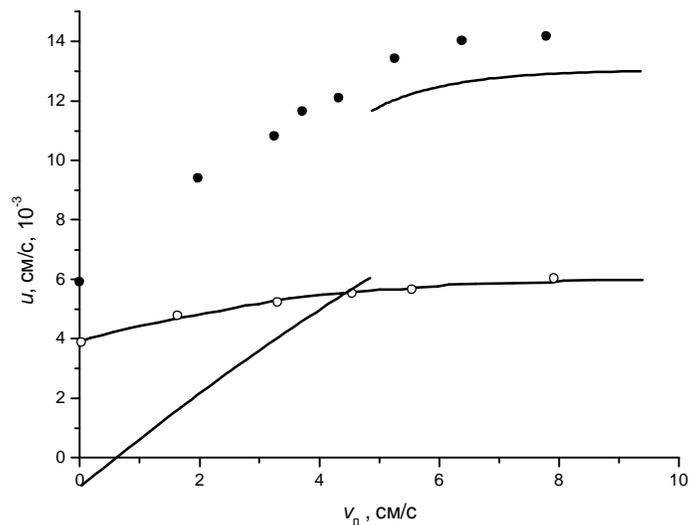


Рис. 6 Зависимость скорости тления от скорости спутного потока. ● – $\rho_z = 0.295$ г/см 3 ; ○ – $\rho_z = 0.92$ г/см 3 .

несмотря на уменьшение температуры фронта тления с увеличением скорости внешнего потока воздуха, скорость тления возрастает.

Линейная скорость тления для плотных образцов ($\rho_z = 0.92$ г/см 3) почти в 3 раза ниже скорости тления нормальных ($\rho_z = 0.295$ г/см 3). Увеличение плотности образца приводит к увеличению гидродинамического сопротивления и, следовательно, уменьшению скорости фильтрации. Вместе с тем, уменьшение диаметра пор увеличивает объёмный коэффициент теплопереноса [2], т.е. улучшает теплообмен твёрдой фазы с фильтрующимся газом. В таких условиях реакция доокисления углистого остатка может существенно понизить концентрацию кислорода в фильтрующемся газе, что понижает скорость основной экзотермической реакции окисления топлива. В области более полного потребления окислителя низкая скорость фильтрации газа обуславливает и слабую зависимость скорости тления от скорости внешнего потока, поскольку в данной области скорость тления лимитируется скоростью подвода окислителя в зону тления. Обратим внимание на то, что ширина зоны реакций в плотных образцах ниже, чем у нормальных. Это также объясняется низкой скоростью фильтрации газа и локализацией зоны высокой температуры в узкой зоне образца. Увеличение плотности образца приводит к увеличению его теплопроводности, что при кондуктивном механизме распространения волны тления должно было бы увеличить скорость тления, однако, этот фактор не оказывает влияния на скорость тления, что подтверждает гипотезу о том, что проточное тление лимитируется скоростью подвода окислителя.

Противоточное распространение волны тления. Когда кислород подводится к зоне реакции от внешней поверхности слоя топлива через исходное органическое топливо, он перемещается против направления распространения волны тления. Такой случай характеризуется тем, что в прогретом слое волны тления имеются оба необходимых для реакции реагента. Для устойчивого тления необходимо, чтобы скорость теплопотерь не превышала скорость теп-

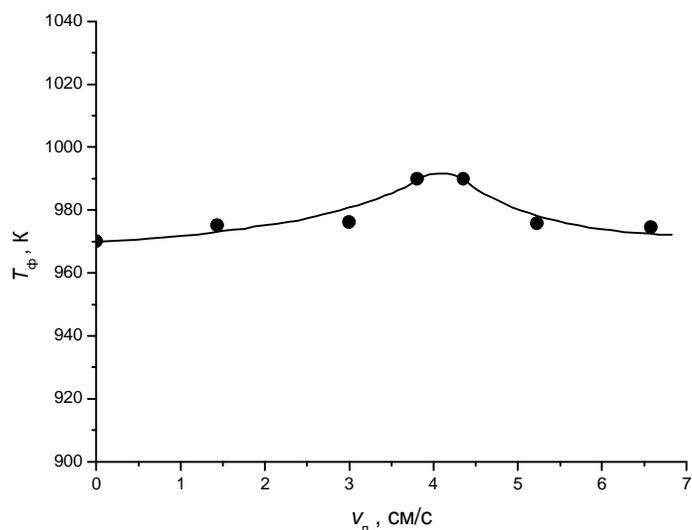


Рис. 7 Зависимость температуры фронта тления от скорости противотока. ● — $\rho_z = 0.295 \text{ г/см}^3$.

ловыделения. Поэтому тот же самый фактор (вынужденный поток воздуха), который повышает скорость поставки кислорода в зону реакции, а значит и скорость тепловыделения, также увеличивает и скорость теплопотерь. При противоточном тлении тепло безвозвратно теряется в окружающую среду, тогда как в случае поточного тления часть тепла, выделившегося в результате экзотермической реакции окисления, внешним потоком воздуха через нагретые продукты реакции возвращается в зону химической реакции.

На рис. 7 приведена зависимость температуры фронта тления от скорости внешнего противотока. Как видно из рис. 7, с увеличением скорости обдувающего образец потока температура фронта тления увеличивается и достигает максимального значения при скорости потока $v_n \approx 4 \text{ см/с}$. Дальнейшее увеличение скорости потока приводит к уменьшению температуры фронта. (Отметим, что при противоточном тлении уровень температур фронта тления ниже, чем наблюдалось в условиях поточного тления). Подобный ход зависимости температуры фронта тления от скорости внешнего потока можно объяснить следующим образом. При повышении скорости потока вплоть до $v_n \approx 4 \text{ см/с}$ увеличивается скорость подвода окислителя, а поскольку скорость химической реакции пропорциональна концентрации кислорода, то увеличивается скорость химической реакции. Растёт скорость тепловыделений, а значит и температура фронта тления. Продукты реакции являются хорошим теплоизолятором [3] и отвод тепла фильтрующимся через зону реакции газом в данном диапазоне скоростей внешнего потока незначителен. Однако, при дальнейшем повышении скорости обдувающего потока начинают сказываться теплопотери, связанные с отводом тепла фильтрующимся газом в результате теплообмена между частицами продукта и газа. Соответственно, температура фронта тления уменьшается. При малом газодинамическом сопротивлении, т.е. при свободном доступе окислителя к горючему, когда скорость тления лимитируется кинетикой химических

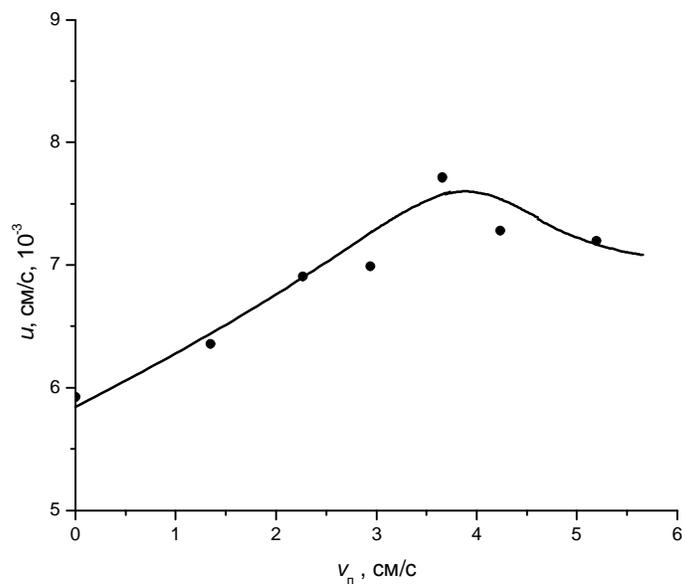


Рис. 8 Зависимость скорости тления от скорости противотока. ● – $\rho_z = 0.295 \text{ г/см}^3$.

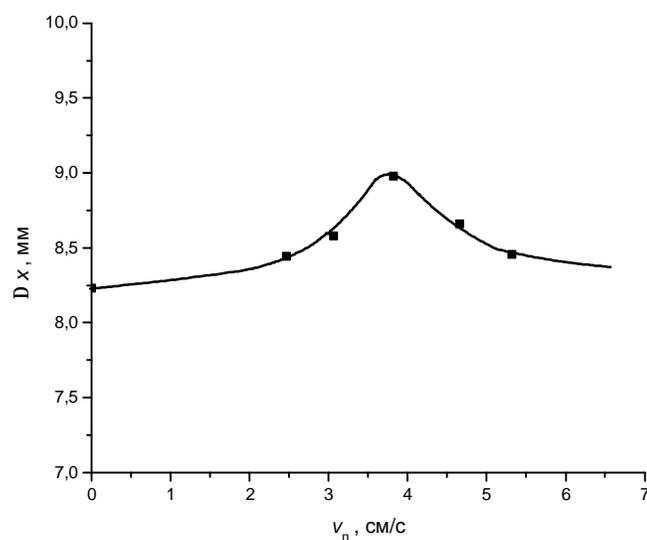


Рис 9 Зависимость ширины зоны тления от скорости противотока. ● – $\rho_z = 0.295 \text{ г/см}^3$.

реакций, как было показано в работе [4], квадрат величины скорости тления экспоненциально зависит от температуры фронта. В таком случае следует ожидать, что зависимость скорости тления от скорости внешнего потока должна иметь экстремум. Действительно, как видно из рис. 8, именно такой характер зависимости скорости тления наблюдается в опытах. Поэтому, хотя максимум температуры фронта выражен достаточно слабо, экстремальные зависимости скорости волны и ширины зоны тления от скорости внешнего потока (рис. 9)

проявляються помітно сильніше. Це також свідчить про визначальну роль кінетики хімічних реакцій в процесі розповсюдження хвилі тління в умовах протипотоку окислюючого газу розповсюдження хвилі тління в наших дослідах при протипотоку. Аналогічний, з екстремумом, характер залежності спостерігався і в [5] для протипоточного тління деревних опилок.

Таким чином, при проточному тлінні тютюну можна виділити дві предельні області процесу - кінетичну, коли швидкість хвилі тління обмежується кінетикою хімічних реакцій і фільтраційну, коли визначальною є швидкість підводу окислюючого газу. При протипоточному тлінні в досліджуваному діапазоні швидкостей зовнішнього потоку швидкість і структура хвилі тління визначаються кінетикою хімічних реакцій.

Література:

1. Бахман Н.Н. Закономерности распространения волны тления. Закономерности распространения волны тления // Физика горения и взрыва. – 1993. – Т.29, №1 – С.16-25.
2. Leach S.V., Rein G., Torero J.L. et al. Kinetic and Fuel Property Effects on Forward Smoldering Combustion. // Combustion and flame. – 1999. – №120. – P.346-358.
3. Ohlemiller T.J. Smoldering Combustion. // Combustion and flame. – 1990. – №2. P.171-179.
4. Головкич В.В., Конейка К.М., Золотко А.Н. Распространение волны тления по натуральным горючим. // Труды XIX конференции стран СНГ "Дисперсные системы". – Одесса. – 2000. – С.48.
5. Бахман Н.Н., Кузнецов Г.П., Пучков В.М. Влияние направления и скорости потока воздуха на характеристики волн тления в пористых слоях горючего. // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 39, №5. – С.33-40.

Головкич В.В., Вовчук Я.І, Ідичук Е.О.

Хвиля тління в органічному паливі

АНОТАЦІЯ

Експериментально досліджені структура і швидкість потокового і протипотокового тління в зразках тютюну різної густини. Виділені чотири характерні області в хвилі тління. Виявлено якісна відмінність характеру залежностей швидкості та ширини зони тління від швидкості потоку окислювача - монотонно зростаюча для потокового та екстремальна, з максимумом, для протипотокового тління. Показано, що при потоковому тлінні швидкість хвилі лімітується підводом окислювача, тоді як при протипотоковому - кінетикою реакції.

Golovko V.V., Vovchuk J.I., Isidis E.A.

Smoldering of organic fuel

SUMMARY

A structure and speeds of coflowed and counterflow smoldering of tobacco of different density were experimentally investigated. Four characteristic areas in the wave of smoldering were marked out. Quality distinction of character of dependences of speed and width of smoldering zone from speed of stream of oxidant is exposed - steadily growing for coflowed smoldering and extreme, with a maximum, for a counterflow smoldering. It was shown that at a coflowed smoldering speed of wave is limited with oxidant admission, and at counterflow - with kinetics of reactions.