

## НЕОДНОМЕРНЫЙ ФРОНТ ГОРЕНИЯ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ НИТРОКЛЕТЧАТКИ И НИТРОГЛИЦЕРИНА

В. Н. Маршаков, А. Г. Истратов, В. М. Пучков

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 119991 Москва, marsh@center.chph.ras.ru

Проведено исследование параметров поперечных волн, распространяющихся по поверхности образцов из прессованного коллоксилина и нитроглицериновых порохов А, Н. С использованием микровидеосъемки и термопарных измерений показано, что очаги горения, покрывающие поверхность, представляют собой совокупность поперечных волн. Фронт поперечной волны при атмосферном давлении имеет вид ступеньки высотой  $0,5 \div 1,1$  мм и уменьшается с ростом давления или начальной температуры образца. Скорость фронта переменна в горизонтальном и вертикальном направлениях. Средняя скорость поперечной волны в  $3 \div 8$  раз превышает нормальную скорость горения образца в целом (с широким разбросом локальных значений) и возрастает с ростом давления. После прохождения фронта возможно прекращение горения до прихода очередной поперечной волны. Причина возникновения поперечных волн, как и в СВС-процессах, — пространственная неустойчивость волны горения.

Ключевые слова: горение, нитроглицериновый порох, нитроклетчатка, поперечные волны, неустойчивость, скорость горения, давление, температура.

### ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] представлена и проанализирована концепция очагово-пульсирующего горения нитроглицериновых порохов, которая трактует неоднородную структуру волны горения как спонтанную совокупность отдельных очагов на поверхности горения. Под очагом понимался выгорающий с некоторой периодичностью участок поверхности горения, размеры которого более чем на порядок превышали толщину прогретого слоя. Эта концепция оказалась достаточно плодотворной для объяснения различных явлений, наблюдаемых при горении порохов в нестационарных условиях — при спаде давления, при различных переходных процессах [2]. Но вопрос о природе очагов оставался открытым.

В работе [3] экспериментальными исследованиями с применением различных методов (изучение погашенной поверхности, измерения светимости и электропроводности волны горения, микротермопарные измерения) в условиях, когда горение в целом установившееся, проявления неустойчивости (очагово-пульсирующее горение) обнаружены для всех исследованных веществ (нитроглицериновых порохов, пироксилина, октогена, гексогена, пер-

хлората аммония) во всем диапазоне условий сжигания (давление  $p = 1 \div 80$  атм). Концепция очагово-пульсирующего горения порохов и взрывчатых веществ трансформируется в механизм горения, который трактует структуру установившейся волны горения как стохастическую совокупность поперечных волн. Для исследованных веществ картина явления в основных чертах едина и соответствует теоретической схеме поперечных волн, аналогичных спиновым волнам в СВС-системах, благодаря которым обеспечивается сгорание вещества при неустойчивости волны горения.

Неустойчивость волны горения в конденсированных веществах была предсказана теоретически и обнаружена экспериментально в виде, например, спинового горения в СВС-системах. Для этих систем найдены границы неустойчивости, внутри которых нелинейные процессы проявляются как поперечные волны. В работе [3] у исследованных газифицирующихся конденсированных веществ во всем диапазоне параметров сжигания обнаружены признаки неустойчивости в виде поперечных волн. Физический смысл неустойчивости в волне горения конденсированных веществ заключается в избытке энтальпии в прогретом, но не прореагировавшем слое. Поперечные волны распространяются по поверхности топлива вдоль прогретых слоев как по каналам и выжи-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 00-03-32149-а).

гают один за другим прогретые слои, которые возникают между этими волнами за счет тепла от продуктов горения. Размер прогреваемых промежутков обратно пропорционален средней скорости горения вещества и в 2 ÷ 3 раза меньше критического диаметра горения.

Развитие концепции о горении конденсированных топлив с участием поперечных волн требует накопления экспериментальных данных о свойствах поперечных волн и их реальном поведении.

### МЕТОДИКА

Динамику неоднородных структур волны горения исследовали при горении образцов из нитроклетчатки и нитроглицеринового пороха с использованием видеокамеры со специальной насадкой для микросъемки процесса. Образцы нитроклетчатки прессовали из коллоксилина (содержание азота 12,1 %) в виде цилиндров диаметром 10 мм или параллелепипедов шириной 10 мм, высотой 10 мм, толщиной 4 ÷ 10 мм при плотности 1,4 ÷ 1,5 г/см<sup>3</sup>. В качестве образцов нитроглицеринового пороха использовали порох Н и модельный порох А с повышенным содержанием нитроглицерина [4], так как при его горении образуется меньше углеродистых частиц, мешающих видеосъемке. Образцы нитроклетчатки сжигали в установке с подогревом образца до 100 °С в среде азота при атмосферном давлении (при начальной температуре  $T_0 < 60$  °С образцы после поджига гаснут). Образцы пороха сжигали как в установке при атмосферном давлении, так и в бомбе постоянного давления при давлении азота до 3 МПа. Видеосъемку проводили тремя способами: 1) оптическая ось камеры устанавливалась под углом 15 ÷ 30° к поверхности горения, 2) ось камеры практически перпендикулярна вертикальной оси образца (фронтальная съемка), 3) съемка с нижнего торца образца «на просвет» с помощью светопровода. Кроме того, методика дает возможность совместить в одном кадре фронтальный вид и вид с нижнего торца, что обеспечивает надежную расшифровку картины процесса. Покадровый просмотр видеофильма позволяет наблюдать объект через каждые 40 мс (частота съемки 25 кадр/с) и делать пространственные измерения с разрешением не хуже 50 ÷ 60 мкм. И наконец, видеосъемка сочеталась с регистрацией температуры в волне горения с помощью вольфрам-рениевых микротермопар. Показания термопар

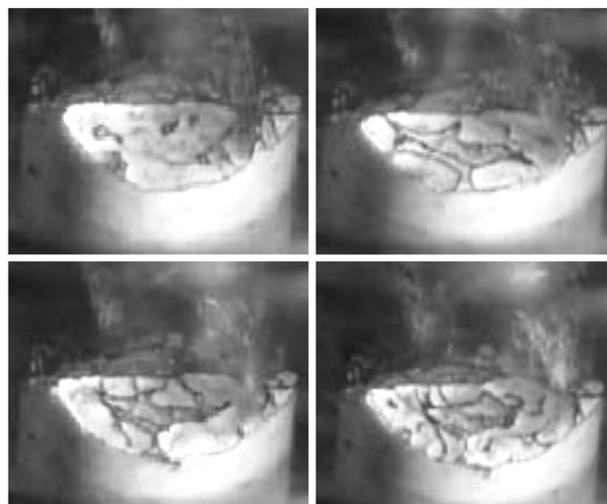


Рис. 1. Последовательные кадры (интервал между кадрами 40 мс) видеофильма горения образца коллоксилина диаметром 10 мм при атмосферном давлении, начальная температура образца 70 °С

через усилители и два канала АЦП записывались на персональный компьютер с обработкой по специальной программе.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Микровидеосъемка позволила наблюдать поведение поперечных волн на поверхности горения как нитроглицериновых образцов, так и образцов из нитроклетчатки. Поперечная волна имеет вид ступеньки с пологим скатом и, двигаясь по веществу, «съедает» его. На кромке ступеньки непрерывно образуются углеродистые частицы, которые спекаются в коксовые нити и достаточно четко очерчивают фронт волны. По мере продвижения фронта на нем образуются все новые нити, а оставшиеся «задираются» в газовую фазу, раскаляются и, в конце концов, сгорают. Эта картина хорошо видна при низких скоростях горения (рис. 1). Чем выше скорость, тем тоньше и короче коксовые нити, меньше «время их жизни», меньше высота ступеньки и менее наглядной становится картина при разрешающей способности используемой видеотехники. Фронт поперечной волны, распространяющейся по поверхности образца, сильно искривлен и часто выглядит как замкнутая линия, которая очерчивает «очаг», сжимающийся или растекающийся по поверхности образца с различными скоростями в разных направлениях. Внутри или

вслед за первой волной может возникнуть вторая волна, другой конфигурации, и начать распространяться вслед за первой. Как показывает анализ видеofilьмов, скорость поперечной волны имеет горизонтальную ( $v_r$ ) и вертикальную ( $u_n$ ) составляющие. Измерялись «мгновенные» значения  $v_r$  на передней кромке фронта волны по нескольким кадрам видеосъемки, на которых можно было надежно зафиксировать его минимальное смещение, и рассчитывались средние значения  $v_r$  за все время наблюдения волны. Там же измерялись «мгновенные» значения составляющей  $u_n$  вдоль некоторой образующей образца и средняя нормальная скорость горения образца в целом ( $U_n$ ). Величина  $U_n$  является обычной интегральной характеристикой горения, и именно ее принято измерять в традиционных экспериментах и использовать в прикладных целях. Отметим, что, так как поперечная волна имеет вид пологой ступеньки, составляющие скорости  $v_r$  и  $u_n$  можно было бы измерить и в любой точке профиля ступеньки, но из-за большого разброса значений  $v_r$  и  $u_n$  на передней кромке фронта эти данные становятся неинформативными.

Покадровый анализ фильмов при фронтальной съемке позволил измерить убыль высоты образца и рассчитать скорости горения, нормальные «мгновенные» скорости  $u_n$  и их средние значения  $\langle u_n \rangle$  по разным образующим. На рис. 2 для примера приведены данные, характеризующие скорость горения образцов из коллоксилина при начальных температурах образцов  $T_0 = 60, 80$  и  $90$  °С. Анализ результатов, полученных в этой серии опытов, показал наличие локальных «остановок» процесса горения, различие значений «мгновенной» скорости горения по одной образующей и различие средних значений на разных образующих. Отметим также, что «остановки» при  $T_0 = 60$  °С ( $\langle u_n \rangle = 1,4$  и  $0,8$  мм/с, см. рис. 2,а) составляют почти половину времени наблюдения и более продолжительны каждая, чем при  $T_0 = 90$  °С ( $\langle u_n \rangle = U_n \approx 2,7$  мм/с, рис. 2,в), где они кратковременны и в целом занимают не более  $2 \div 3$  % времени наблюдения. Разброс значений «мгновенной» скорости довольно велик:  $0 \leq u_n \leq 5$  мм/с при  $U_n = 1,4$  мм/с и  $0 \leq u_n \leq 8$  мм/с при  $U_n = 2,7$  мм/с, но в последнем случае максимальные значения  $u_n$  (втрое превышающие  $U_n$ ) встречаются редко. Высота ступеньки (фронта горения), как показывают измерения, составляет для нитроклетчатки  $\approx 0,5$  мм при

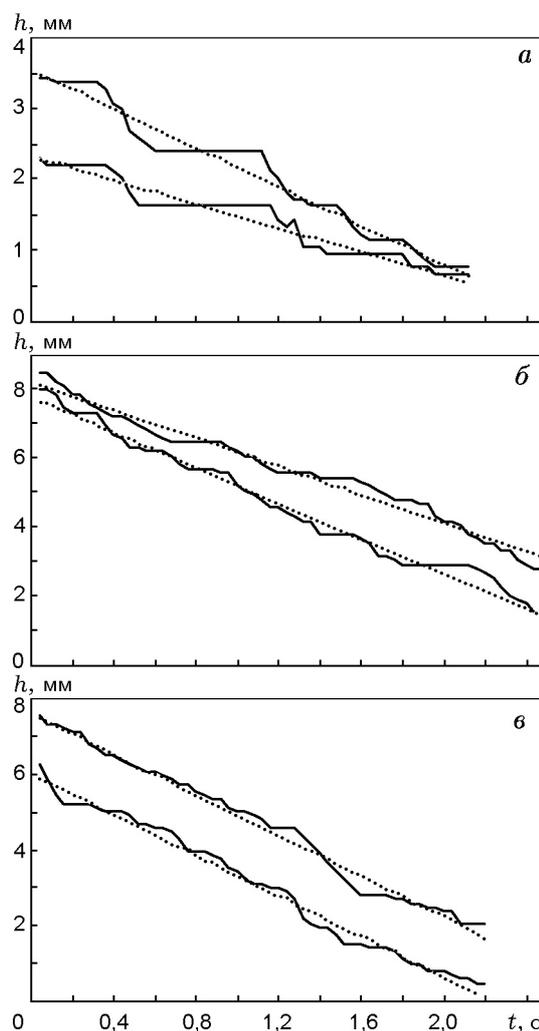


Рис. 2. Покадровый анализ убыли высоты по двум образующим при горении цилиндрического образца коллоксилина:

пунктирные линии —  $\langle u_n \rangle$ ; а —  $T_0 \approx 60$  °С,  $\langle u_n \rangle = 1,4$  и  $0,8$  мм/с; б —  $T_0 \approx 80$  °С,  $\langle u_n \rangle = 2,04$  и  $2,56$  мм/с; в —  $T_0 \approx 90$  °С,  $\langle u_n \rangle = U_n = 2,68$  мм/с

атмосферном давлении и  $T_0 = 60 \div 65$  °С. Измерение горизонтальной составляющей  $v_r$  проводилось как на образцах в виде параллелепипеда, так и на цилиндрических образцах с использованием фронтальной видеосъемки. В последнем случае при расчете  $v_r$ , естественно, учитывалось, что на самом деле в плоскости кадра фронт перемещается по цилиндрической боковой поверхности. Измеренные значения  $v_r$  лежат в диапазоне  $2,5 \div 8$  мм/с при разных значениях  $T_0$ , но эти измерения при фронтальной видеосъемке весьма трудны и непредставительны. Отметим, что в данных эксперимен-

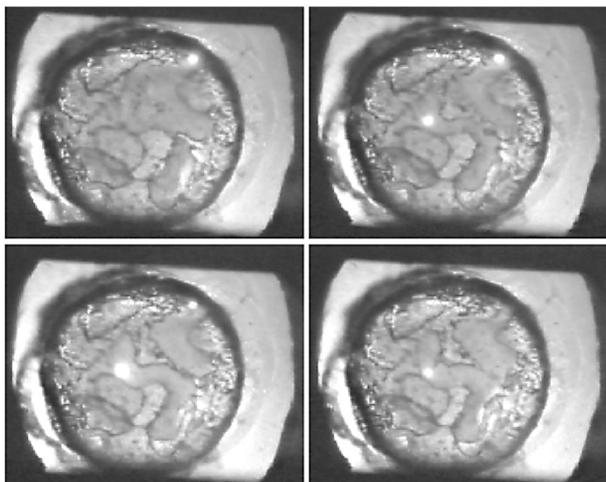


Рис. 3. Кадры видеопленки горения образца пороха А диаметром 12 мм при атмосферном давлении:

вид с нижнего торца, «на просвет»; интервал между кадрами 80 мс

тах, если считать  $U_n \approx 1$  мм/с, средняя толщина прогретого слоя составила  $\alpha/U_n \approx 0,1$  мм, где  $\alpha = 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с — коэффициент температуропроводности.

Несмотря на наличие поперечных волн, нормальная средняя скорость горения образцов при атмосферном давлении в зависимости от начальной температуры описывается экспоненциальным законом  $U_n = 0,06 \exp[0,02(T_0 - 20)]$  при  $60 \leq T_0 \leq 100$  °С, а зависимость ее от давления при  $T_0 = 20$  °С — степенным законом  $U_n = 0,285 p^{0,675}$  в диапазоне  $0,5 \leq p \leq 5,0$  МПа (в обоих случаях  $[U_n] =$  см/с).

Измерение параметров поперечных волн во фронте горения с помощью фронтальной видеосъемки и съемки с нижнего торца проводили на образцах нитроглицеринового пороха А диаметром 12 мм. Видеосъемку проводили при атмосферном давлении и в бомбе постоянного давления в среде азота. Порох А был выбран благодаря двум обстоятельствам. Во-первых, образующийся при его горении коксовый каркас из углеродистых чешуек, с одной стороны, достаточно редок в сравнении с порохом Н, чтобы не «затенять» поверхность горения для съемки, с другой — вполне достаточен для обрисовки фронта горения. Во-вторых, порох А относительно прозрачен для съемки с торца; поверхность горения видна примерно через полтора миллиметровый слой пороха.

На рис. 3 приведены последовательные

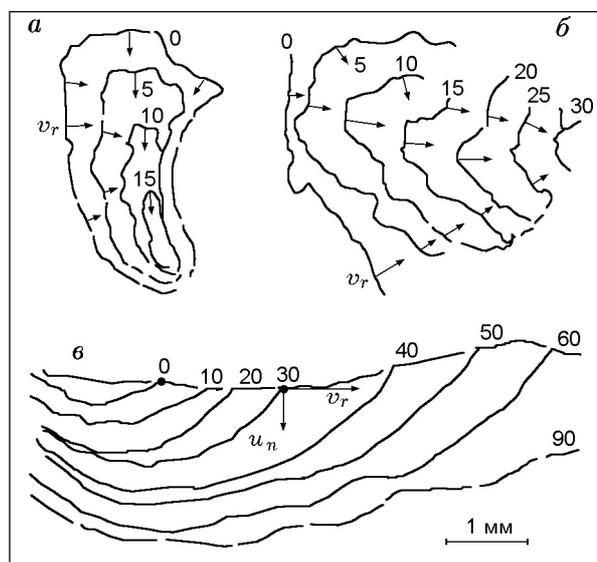


Рис. 4. Фрагменты перемещения фронта поперечной волны, сделанные с кадров видеопленки:

цифры у кривых — номера кадров (интервал между кадрами 40 мс), стрелки указывают направление перемещения фронта; а, б — видеосъемка с нижнего торца образца, «на просвет», в — фронтальная видеосъемка боковой поверхности образца

кадры фильма поверхности горения, снятого «на просвет» с нижнего торца образца. На поверхности видны пятна, очерченные коксовыми волокнами, — очаги, образованные совокупностью поперечных волн. Светлые небольшие пятна — кратковременные вспышки углеродистых частиц над поверхностью горения. На рис. 4 показаны перемещения фронта поперечной волны, сделанные с кадров фильма при съемке с торца и при фронтальной съемке. Анализ и обработка фильмов горения пороха А при атмосферном давлении и  $T_0 = 20$  °С дали следующие результаты.

1. На горячей поверхности образуются и исчезают очаги горения, которые формируются поперечными волнами, возникающими внешне спонтанно и спорадически.

2. Поперечная волна распространяется по поверхности со скоростью  $v_r = 0,9 \div 4,7$  мм/с (среднее значение  $\approx 2,7$  мм/с), а также вглубь со скоростью  $u_n = 0,7 \div 4$  мм/с (среднее значение  $\approx 1,1$  мм/с) при нормальной средней скорости горения образца в целом  $U_n \approx 0,7$  мм/с. Необходимо отметить, что после прохождения фронта по поверхности, горение в глубь образца не прекращается вплоть до затухания волн, хотя и со скоростью в несколько раз мень-

шей, чем скорость распространения по поверхности. Измерения проведены более чем для десяти волн при горении одного образца и более чем в двадцати опытах.

3. Поперечная волна имеет вид пологой ступеньки амплитудой  $0,7 \div 1,1$  мм и наблюдается («живет») в течение  $0,2 \div 2$  с.

4. Поскольку скорость поперечной волны  $v_r$  удобнее всего измерять при съемке с нижнего торца «на просвет», когда образец помещен на прозрачную подложку, а поверхность горения с момента возможной регистрации находится вблизи нее ( $\approx 1,5 \div 2$  мм), были проведены опыты с разными подложками. Показано, что смена подложки (стекло толщиной 1,2 и 0,12 мм, оргстекло толщиной 0,8 мм, скотч-лента), т. е. материал подложки, не оказывает влияния на скорость распространения волны в пределах разброса ее значений.

5. Исследование влияния площади поверхности образца на скорость поперечной волны  $v_r$  (с теми же параметрами волны, что и выше) показало следующее. Для образцов диаметром  $d = 12$  мм и при увеличении поверхности горения более чем в 2,5 раза ( $d \cong 20$  мм) скорости поперечной волны регистрировались практически в том же диапазоне —  $2 \div 4,1$  мм/с; при  $d = 10$  мм диапазон наблюдаемых скоростей уменьшился до  $1 \div 1,8$  мм/с (среднее значение  $v_r$  примерно 1,5 мм/с), а при  $d = 8$  мм горение после поджига прерывалось.

6. Видеосъемка поперечных волн в бомбе постоянного давления при давлениях от атмосферного до 3,0 МПа показала следующее. Коксовый каркас на поверхности горения с ростом давления становился более редким и углеродистые нити только фрагментарно обрисовывали фронт. Тем не менее по перемещению этих фрагментов на 2–4 последовательных кадрах удается оценить скорости поперечных волн. Так, при  $p = 0,1 \div 0,2$  МПа средняя скорость поперечных волн  $v_r$  составляла  $\approx 3,5$  мм/с, при  $p = 0,6$  МПа — 6,5, при  $p = 1,2$  МПа — 8, при  $p = 2,1$  МПа — 9 мм/с. Эти данные и средняя скорость поперечной волны при атмосферном давлении описываются степенным законом вида  $v_r = 0,75p^{0,24}$ , где  $[v_r] = \text{см/с}$ , а  $[p] = \text{МПа}$ . Отметим, что при каждом из этих давлений наблюдаемый разброс значений скоростей довольно велик и составлял  $\pm 40 \div 70$  %. Вместе с тем средняя нормальная скорость горения зависит от давления по обычному степенному закону вида  $U_n = 0,426p^{0,63}$ , где  $[U_n] = \text{см/с}$ ,

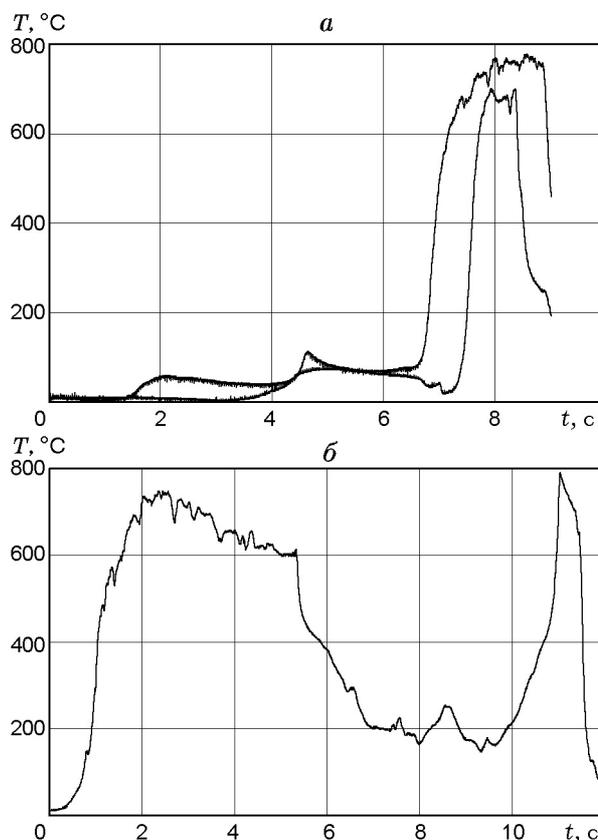


Рис. 5. Примеры изменения температуры при прохождении волны горения по образцу нитроглицеринового пороха А при атмосферном давлении в среде азота:

на верхнем графике представлены записи показаний двух термопар, расположенных на расстоянии 4 мм в одном поперечном сечении образца

$[p] = \text{МПа}$ , как и в [4].

7. Аналогичные закономерности наблюдались и для пороха Н. Так, при атмосферном давлении средняя скорость поперечной волны  $v_r$  составила 3 мм/с при разбросе значений от 2 до 5 мм/с, причем наблюдения весьма затруднены из-за наличия довольно плотного углеродистого каркаса.

Температурные распределения в волне горения пороха А регистрировались с помощью двух П-образных термопар, спаи («корольки») которых располагались в одном поперечном сечении образца на расстоянии  $4 \div 5$  мм друг от друга. Несмотря на синхронность видеосъемки и регистрации температуры, зафиксировать расположение термопары относительно поперечной волны в момент регистрации ею температуры во фронте не удалось.

На рис. 5 приведен пример записей тем-

пературы при такой постановке опыта. Анализ температурных записей показал следующее. Перед приходом поперечной волны иногда удается наблюдать фазу прогрева пороха в течение нескольких секунд до температуры  $\approx 70^\circ\text{C}$ . После этого регистрируется профиль температур с максимальной температурой продуктов сгорания  $800 \div 900^\circ\text{C}$ . Затем, зафиксировав в газовой фазе в течение  $2 \div 3$  с медленно падающую температуру (до  $\approx 600^\circ\text{C}$ ), термопара показывает резкий спад температуры до  $170 \div 200^\circ\text{C}$  и после этого новый резкий рост. В записях температуры в одном опыте наблюдались задержки от 0 до  $\approx 2$  с. Это означает, что фронт может подходить к спаям под разными углами и тогда скорость  $v_r$  достигает значений 3 мм/с. Расчет скоростей горения по распределениям температур в прогретом слое, например, для записей, представленных на рис. 5, дает значения 0,83, 1,1 и 0,76 мм/с на участках прогретого слоя с изменением температур от  $50 \div 90$  до  $130 \div 210^\circ\text{C}$  (где наблюдается михельсоновское распределение температур), что соответствует измерениям скоростей по кадрам видеосъемки.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ видеофильмов горения нитроглицериновых порохов в диапазоне давлений от атмосферного до 3 МПа при  $T_0 = 18 \div 22^\circ\text{C}$  и коллоксилина при атмосферном давлении и  $T_0 = 60 \div 100^\circ\text{C}$  показал, что горение образцов осуществляется за счет совокупности поперечных волн, формирующих горящие «пятна» или очаги, размеры которых соизмеримы с радиусом образца, а их перемещение по поверхности хаотично. Это явление связано, прежде всего, с уровнем средней нормальной скорости горения  $U_n$ , и в этом смысле существует эквивалентность между давлением и начальной температурой. Анализ показал, что при разных значениях  $U_n$  наблюдается два типа процесса. При  $U_n < 1,1$  мм/с горение происходит за счет поперечных волн, причем после прохождения фронта волны горение прекращается до прихода туда нового фронта. На негорящих участках поверхности осуществляется прогрев топлива как инертного вещества и создаются условия для возникновения новой поперечной волны. Отметим, что при  $0,5 < U_n < 0,8$  мм/с (сразу после воспламенения) образец после непродолжительного горения гас. При  $U_n > 1,5$  мм/с

горение также осуществляется за счет поперечных волн, образующих совокупности очагов, которые как распространяются по поверхности образца, так и горят вглубь (см. рис. 4, в). В общем, скорость поперечных волн оказалась в  $3 \div 8$  раз больше нормальной средней скорости горения образца.

Профиль поперечной волны не является установившимся. Наличие вертикальной и горизонтальной составляющих скорости горения можно трактовать по-разному: либо это нестационарный процесс формирования поперечной волны, либо следствие различных скоростей горения по фронту поперечной волны — от наибольших значений вблизи хорошо прогретых приповерхностных слоев до наименьших в слабо прогретых глубоких слоях, где горение в поперечной волне прекращается.

Ступенчатый вид вертикального смещения горячей поверхности может свидетельствовать как о горении образца в результате прохождения поперечных волн, так и о «галопирующем» режиме горения очага в данном месте.

Скорости горения, полученные по профилям температуры, можно сопоставлять со скоростями горения, разными по фронту поперечной волны (см. [3]). При этом более вероятно прохождение термопарой сравнительно низкоскоростных участков фронта по относительно глубоким слабопрогретым слоям топлива. Кроме того, термопарные исследования показали, что наблюдается неполнота сгорания в поперечной волне при низких давлениях: температура продуктов горения не превышает  $1000^\circ\text{C}$ .

Исследование параметров поперечных волн проведено при сравнительно низких нормальных скоростях горения  $U_n$  (давление до 3 МПа или начальные температуры образцов до  $100^\circ\text{C}$  при атмосферном давлении). Провести исследование при больших значениях  $U_n$  не удалось, в основном из-за недостаточной частоты съемки видеокамеры (25 кадр/с). Тем не менее можно полагать, что поперечные волны, обусловленные неустойчивостью режима горения, могут иметь место и при больших значениях  $U_n$ , поскольку аналогичная неоднородность волны горения, выражающаяся в пульсациях светимости пламени и электропроводности поверхности горения, в разбросе значений «мгновенной» скорости горения, наблюдалась у нитроглицериновых порохов и при давлениях до 8 МПа [1, 3].

### ВЫВОДЫ

Горение нитроглицериновых порохов при вариации давления от атмосферного до 3 МПа и нитроклетчатки (коллоксилина) при вариации начальной температуры образца от 60 до 100 °С и атмосферном давлении осуществляется за счет поперечных волн, вызванных неустойчивостью волны горения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Маршаков В. Н.** Параметры очагово-пульсирующего режима горения нитроглицеринового пороха // Хим. физика. 1987. Т. 6, № 4. С. 530–537.
2. **Маршаков В. Н.** Анализ повторного воспламенения пороха после спада давления с позиций очагово-пульсирующего механизма горения // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 1. С. 12–18.
3. **Ананьев А. В., Истратов А. Г., Кирсанова З. В. и др.** Неустойчивость при установившемся горении порохов и взрывчатых веществ // Хим. физика. 2001. Т. 20, № 12. С. 47–52.
4. **Вишневский И. Я., Денисюк А. П., Фогельзанг А. Е.** Критические условия горения баллиститных порохов // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 1. С. 12–18.

*Поступила в редакцию 16/XII 2002 г.*

---