

## ГОРЕНИЕ СЛОЕВЫХ ТОПЛИВ (ОБЗОР).

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Р. П. Фитцджеральд, М. К. Брюстер

Иллинойский университет, 61801 Урбана-Шампейн, США, brewster@uiuc.edu

Дан обзор экспериментальных исследований горения слоевых топлив, состоящих из твердого окислителя (в основном, перхлората аммония) и углеводородного горючего. Приведено подробное описание слоевых систем, являющихся упрощенной моделью гетерогенных топлив, а также обоснование интереса к изучению таких систем. Проанализирована эволюция знаний о горении слоевых систем. Рассмотрены экспериментальные методы, используемые для количественного и качественного изучения конденсированной фазы, структуры поверхности, структуры пламени в газовой фазе, скорости горения, концентраций продуктов горения и распределений температуры. В результате этих исследований получено большое количество экспериментальных данных, которые могут быть использованы для обоснования и проверки численных и аналитических моделей.

Ключевые слова: слоевые топлива, горение.

#### ВВЕДЕНИЕ

На протяжении почти полувека проблема развития научных основ горения гетерогенных твердых топлив занимала умы исследователей, ищущих новые пути повышения эффективности использования твердых топлив в ракетной технике. Однако эта задача оказалась трудно-выполнимой по целому ряду причин. Частицы окислителя, хаотично распределенные в углеводородном связующем, малы (в терминах традиционной оптической диагностики) и к тому же отличаются размером и формой. Еще недостаточно полно изучено поведение индивидуальных компонентов топлива (окислителя и горючего) при их разложении и горении. Взаимодействие компонентов топлива представляет собой сложный процесс, включающий сотни, если не тысячи реакций. Даже если бы было известно все об этих компонентах и их взаимодействии, все равно численное моделирование тысяч реакций в многофазном потоке — задача практически неразрешимая. Наконец, высокие давления и температура, агрессивная среда и ограничения по разрешающей способности, присущие даже самым лучшим приборам, сильно затрудняют прямое изучение процессов горения. Тем не менее, несмотря на эти трудности, используя средства экспериментального и теоретического анализа, удалось многое узнать, особенно с помощью упрощения общей

задачи.

Слоевое топливо, состоящее из чередующихся слоев горючего и окислителя (рис. 1, б), является двумерной упрощенной моделью трехмерного смесового топлива, позволяющей изолировать различные физические и химические явления, сопровождающие горение. Такая конфигурация (наиболее простая из возможных) упрощает их изучение, а также осмысление и проверку полученных данных. В двумерном случае значительно уменьшается или даже исчезает совсем внутренне присущая смесовым топливам нестационарность горения, связанная со случайным распределением частиц по размеру и форме. При этом сохраняются многие важные элементы, включая тип и свойства компонентов топлива, размер частиц окислителя, давление, стехиометрическое соотношение компонентов топлива, многомерный тепло- и массоперенос, неплоскую поверхность горения, а также структуру пламени предварительно перемешанной смеси и диффузионного пламени. Изучение слоевых топлив позволяет получить информацию о компонентах топлива, их взаимодействии и влиянии каждого параметра на структуру пламени и поверхности горения. Кроме того, слоевая система позволяет проводить большое количество экспериментальных исследований (например, определение профиля поверхности горения, структуры пламени, скорости горения и т. д.), которые могут быть использованы для проверки вычислительных моделей. Вообще говоря, проведение обширного сравнения

R. P. Fitzgerald, M. Q. Brewster  
Department of Mechanical and Industrial Engineering,  
University of Illinois Urbana, Champaign, 61801, USA.

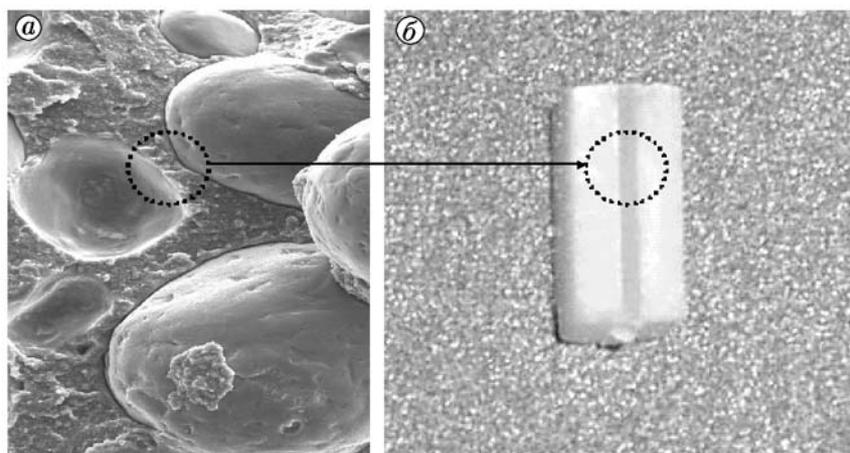


Рис. 1. Моделирование гетерогенного топлива (а) с помощью слоевого топлива (б)

результатов модели с соответствующими экспериментальными данными просто необходимо, если делаются какие-то выводы о надежности модели и ее предсказательной способности. Получение тщательно проверенных данных в простых случаях и осторожное обобщение этих результатов на более сложные случаи прокладывают путь к разработке более сложных моделей и, в конце концов, к решению общей задачи.

На рис. 1 показано, что слои окислителя моделируют крупные кристаллические частицы окислителя, присутствующие в гетерогенном твердом топливе. Толщина этих слоев приблизительно соответствует размеру частиц окислителя, тогда как толщина слоев горючего примерно соответствует расстоянию между частицами окислителя. Соотношение между толщиной слоев окислителя и горючего моделирует соотношение компонентов гетерогенного топлива. Слой горючего может также содержать мелкие частицы окислителя. Это моделирует ситуацию, когда окислитель состоит из двух и более фракций, и позволяет учесть наличие фракции мелких частиц окислителя, находящихся в горючем-связующем, окружающем крупные частицы.

Прогресс в понимании того, как горят слоевые топлива, был достигнут благодаря совместному применению эксперимента и теории. Без теоретического описания эксперименты были бы ограничены получением только качественных и единичных эмпирических данных и не давали бы ответов на вопрос, поче-

му топливо ведет себя именно таким образом. Без экспериментов, необходимых для проверки теоретического описания, результатам аналитических и численных вычислений просто не хватало бы необходимого базиса для того, чтобы продемонстрировать их достоверность. Исторически сложилось так, что прогресс в экспериментальных исследованиях привел к прогрессу на теоретическом фронте и наоборот, продемонстрировав тем самым полезность комбинированного подхода. В первой части работы, состоящей из двух частей, представлен обзор экспериментальных исследований, посвященных изучению горения слоевых топлив.

## ГОРЕНИЕ СЛОЕВЫХ ТОПЛИВ

При горении слоевой системы в стационарных условиях, начиная с плоского профиля поверхности, вслед за первоначальным переходным процессом зажигания следует стационарное горение, если слои однородны по составу и толщине. В случае смесевых топлив это не так. Из-за трехмерной структуры, различия частиц по размеру и форме и, как следствие, вариации локального соотношения компонентов процесс горения смесевых топлив на микроскопическом уровне всегда нестационарный (даже в том случае, когда на макроскопическом уровне стационарное горение уже установилось). Как и в случае смесевых топлив, профиль поверхности горения, образующийся при горении слоевых топлив, не является плоским (рис. 2). Высоты слоев горючего и окислителя имеют различия. Образующиеся при этом впа-

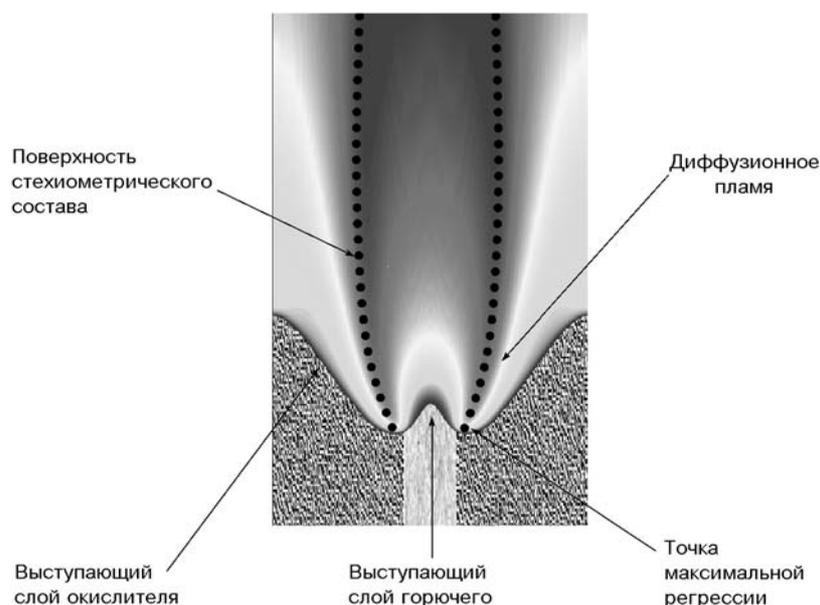


Рис. 2. Общие особенности горения слоевых систем

дины и выступы указывают на положение соответственно максимумов и минимумов теплоподвода к поверхности горения. В самой низкой точке впадины локальное значение нормальной составляющей скорости горения является относительным максимумом. Это обусловлено теплом, поступающим от горячего стехиометрического диффузионного пламени, существующего рядом с этой точкой. В самой высокой точке выступа, которая часто находится в центре слоя горючего, локальное значение нормальной составляющей скорости горения также максимально, но связано это с теплом, подводимым через конденсированную фазу к слою горючего, который служит стоком тепла. На участках поверхности, имеющих сильный наклон (не на выступах и впадинах), локальное значение составляющей скорости горения, направленной вдоль нормали к поверхности, является относительным минимумом. Это указывает на то, что локально на этих участках к поверхности подводится сравнительно небольшое количество тепла из газовой или конденсированной фазы.

Возникновение предварительно перемешанного пламени или пламени монотоплива у материалов, поддерживающих самостоятельное горение, является другим фактором, который значительно изменяет относительное выгорание одного слоя по сравнению с другим. Например, перхлорат аммония (ПХА) в каче-

стве окислителя поддерживает самостоятельное горение только при давлении выше 20 атм. Поэтому, если давление меньше нижнего предела горения по давлению, горение слоя окислителя обычно запаздывает по сравнению со слоем горючего, тогда как при давлении выше этого предела горение слоя окислителя опережает горение слоя горючего.

Суммарное соотношение компонентов топлива оказывает сильное влияние на конечную структуру пламени. Слоевые системы обычно содержат избыток окислителя, что приводит к образованию бедного горючим диффузионного пламени, окружающего слой горючего. Чем шире слой горючего, тем больше среднее расстояние для диффузии продуктов разложения горючего и окислителя друг к другу. В результате поверхности стехиометрического состава (см. рис. 2) соединяются на большем удалении по потоку (стехиометрический носик), увеличивая тем самым общую высоту диффузионного пламени. Смесевые топлива обычно содержат избыток горючего, отчасти благодаря добавкам алюминия, в этом случае диффузионные пламена, наоборот, окружают частицы окислителя (выступающие над поверхностью). Об этом различии смесевых и слоевых топлив очень важно помнить, особенно при сравнении их характеристик горения.

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ СЛОЕВЫХ ТОПЛИВ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Внешние слои окислителя изготавливаются либо прессованием мелких частиц окислителя, либо путем выращивания монокристаллов. Слои горючего (связующего) готовятся либо независимо (отверждением слоев полимера, из которых предварительно удален воздух), либо путем помещения неотвержденной смеси между слоями окислителя, разделенными с помощью специальных распорок одинаковой ширины. В последнем случае вся слоевая система целиком нагревается в процессе отверждения связующего. При этом концевые группы разных полимерных цепей «сшиваются» друг с другом для получения необходимых механических свойств. Сшивающий реагент или отвердитель часто оказывает существенное влияние на горение слоевого топлива.

Получившийся «сэндвич» затем обрезается или шлифуется для придания ему формы параллелепипеда, позволяющей наблюдать горение таких систем. Поджиг образцов топлива обычно осуществляется либо тепловым потоком от нагретой электрической спирали, либо потоком лазерного излучения, падающим на верхнюю поверхность сэндвича. Необходимое давление в бомбе или камере сгорания создается с помощью различных инертных газов. Для непрерывного удаления продуктов горения из камеры сгорания может использоваться поток инертного газа.

Для изучения горения гетерогенных слоевых топлив было разработано большое количество экспериментальных методов, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Ранние методы включали в себя микросъемку, что позволяло вести прямое наблюдение за поверхностью горения в режиме реального времени и измерять скорость горения. Широкое применение получило исследование затухающих поверхностей с помощью сканирующей электронной микроскопии. Высокое пространственное разрешение этого метода дает возможность изучить во всех деталях характерные особенности поверхности. Однако поверхности горящего и затухающего образцов топлив не идентичны (в процессе тушения поверхность топлива изменяется), что является недостатком данной методики по сравнению с методами, позволяющими наблюдать за поверхностью топлива непосредственно во время горения. Использование обычных (по линии

наблюдения) эмиссионных методов визуализации сопряжено с проблемами, вызванными поглощением и затемнением объекта исследования образующимися при горении газообразными продуктами и твердыми частицами. Для их преодоления были разработаны методы локальной визуализации, такие как плоскостная лазерно-индуцированная флюоресценция. Однако остаются другие ограничения, определяемые давлением и геометрией поверхности, которые существуют при проведении исследований с помощью этих методов. В целом, каждый метод позволяет получить свой, специфический тип информации, и, суммируя все это вместе, можно составить общую картину горения гетерогенных слоевых топлив.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первое экспериментальное исследование горения слоевых топлив, по-видимому, выполнено в работе [1], в которой при разных давлениях изучалось горение пластинок ПХА и различных горючих. Ряд исследованных в работе горючих включал в себя полиизобутен (ПИБ), полистирол (ПС), параформальдегид, полиэфирный каучук и некоторые другие полимеры. Не проводя изучения структуры пламени в газовой фазе или структуры поверхности горения, автор измерил скорости горения и соотнес их с давлением и термической стабильностью полимерных горючих. Было установлено, что при более высоких давлениях скорость горения, как правило, более чувствительна к типу горючего, чем при низких давлениях. Некоторые типы полимерного горючего (такие, как ПИБ) обеспечивали скорости горения, превышающие скорость самостоятельного горения ПХА (для давлений выше 20 атм), тогда как другие (такие, как полиэфирный каучук) ингибировали горение, вплоть до его прекращения. Было показано, что физическое состояние горючего во время горения оказывает влияние на скорость горения на границе раздела окислителя и горючего. Жидкие продукты разложения/плавления горючего «эффективно смачивают поверхность кристаллов ПХА» и тем самым ингибируют горение на границе раздела. Обнаружено, что добавление мелкодисперсного кварцевого порошка связывает жидкие продукты, оказывая, таким образом, сильное влияние на общую скорость горения. Несмотря на то, что в работе [1] получен довольно ограниченный набор первичных экспериментальных дан-

ных по горению слоевых топлив (в основном, по скорости горения), в ней была выдвинута верная гипотеза, что пламя, распространяющееся вдоль границы раздела со скоростью, превышающей «нормальную» скорость горения, в определенном диапазоне давлений может «вести процесс горения за счет увеличения площади поверхности горения».

С целью изучения структуры поверхности слоевых топлив при повышенных давлениях в работе [2] исследовались поверхности затушенных сэндвичей с помощью сканирующей электронной микроскопии. Поверхность горения топлив снималась также во время горения с помощью высокоскоростной камеры, однако в работе не представлено детального анализа того, как процесс тушения изменяет поверхность горения. Основным горючим в этой работе являлась полибутадиенакриловая кислота (РВАА), толщина слоев составляла  $30 \div 200$  мкм. Однако несколько экспериментов было проведено также с полибутадиеном, имеющим карбоксильные концевые группы (СТРВ), и с полиуретаном (ПУ). В качестве слоев окислителя использовались большие монокристаллы ПХА сверхвысокой чистоты толщиной  $1 \div 2$  мм. В итоге происходило горение смеси, обогащенной окислителем.

В работе [2] сделан ряд важных наблюдений, касающихся горения слоевых систем в диапазоне давлений  $7 \div 82$  атм. При давлениях ниже нижнего предела горения ПХА по давлению вдали от границы раздела слоев выгорание слоев окислителя — чистого ПХА — запаздывало по отношению к горючему и соответственно окислитель выступал над горючим. В то же время вблизи границы раздела, «там, где наличие диффузионного пламени, образующегося в результате взаимодействия продуктов разложения окислителя и горючего, способствовало горению ПХА», окислитель горел с той же скоростью, что и горючее. При более высоких давлениях вдали от границы раздела ПХА горел со своей собственной скоростью.

Было обнаружено [2], что точки относительного максимума скорости горения находятся на стороне слоя ПХА на конечном расстоянии от границы раздела. Но никакого вывода о причине такого расположения передней кромки пламени не было сделано. В то время еще не было ясного понимания роли локального соотношения компонентов и его связи со структурой диффузионного пламени, а также с по-

лучающимся в результате профилем поверхности. Авторы [2] также наблюдали, что вблизи границы раздела с горючим ПХА горел с меньшей (нормальной) скоростью, что приводило к образованию локальной области замедленного горения. На границе раздела слоев не было замечено разрыва профиля горячей поверхности. Наличие непрерывного гладкого профиля послужило для опровержения ранее существовавшей теории, согласно которой реакции между компонентами в конденсированной фазе определяют регрессию на границе раздела.

Делая поперечные разрезы затушенных образцов топлива, авторы работы [2] показали, что ПХА претерпевает фазовый переход из кубической в орторомбическую кристаллическую форму (при температуре 515 К). Были измерены расстояния от затушенной поверхности до линии фазового перехода и показано, что они коррелируют с данными предыдущей работы [3], согласно которым существует обратная зависимость между толщиной слоя, в котором происходит фазовый переход, и скоростью горения. Из анализа микрофотографий следует, что толщина слоя, в котором происходит фазовый переход, наименьшая в точке нахождения передней кромки пламени и достигает локального максимума там, где ПХА прилегает к горючему. Было показано, что чем выше локальная скорость горения, тем меньше время прогрева конденсированной фазы и соответственно меньше глубина проникновения орторомбической фазы. Утолщение слоя орторомбической фазы вблизи слоя горючего объяснено наличием в окрестности границы раздела слоев двумерного теплового потока от слоя ПХА к более холодному слою горючего.

Различия профилей поверхности и структур пламени в случае тонких и толстых слоев горючего были сформулированы только в общих чертах. По наблюдениям толстые слои горючего выступали над поверхностью ПХА, что приводило к «стабильной» структуре пламени, которая состояла скорее из «пальцевидных», чем непрерывных пламен. В случае тонких слоев горение было «нестабильным» с асимметричными профилями поверхности.

Несмотря на то, что в работе [2] получено очень мало количественных данных, тем не менее эта пионерская работа была полезной с точки зрения предоставления исключительно хорошо пространственно разрешенных данных по структуре профиля поверхности, а также об-

щих выводов о характере поверхности, которые заложили прочный базис для последующих исследований.

С целью изучения скорости горения и структуры поверхности топлив, чье горение контролируется диффузионными пламенами, в работе [4] исследовались слоевые системы на основе окислителей, не поддерживающих самостоятельного горения, таких как  $\text{KClO}_4$ ,  $\text{KClO}_3$ ,  $\text{BaO}_2$  и  $\text{KMnO}_4$ . В качестве горючих применялись полиметилметакрилат (ПММА), полиэтилен (ПЭ) и поливинилхлорид с толщиной слоев горючего 0.2 ÷ 3.0 мм. Использовалась цилиндрическая или прямоугольная геометрия центральных слоев окислителя, которые были как порошкообразными, так и спрессованными. Скорость распространения пламени вдоль границы раздела измерялась и изучалась как функция давления и толщины слоя. Авторы [4] обнаружили, что при очень большой толщине слоев скорость горения принимает асимптотическое ненулевое значение, что служит «веским доказательством того, что скорость распространения пламени определяется только теми процессами, которые протекают не очень далеко от носика пламени». В случае меньшей толщины слоя получены различные зависимости скорости горения для разных комбинаций окислителя и горючего. Скорость горения слоевой системы ПММА/ $\text{KClO}_4$  монотонно увеличивалась с уменьшением толщины слоя; однако стоит отметить, что самое меньшее значение толщины слоя, при котором проводились эксперименты, составляло 0.2 мм. При использовании ПММА или ПЭ в сочетании с  $\text{KClO}_4$  скорость распространения пламени снижалась с уменьшением толщины слоя. Авторы [4] правильно заметили, что при уменьшении толщины слоя проявляются два конкурирующих фактора: 1) уменьшение суммарного тепловыделения, связанное с тем, что соотношение компонентов смещается все далее в бедную горючим область, 2) уменьшение расстояния между носиками пламени, существующими над левой и правой границами раздела, приводящее к уменьшению теплоотвода в слой горючего. Эта работа также заслуживает внимания в связи с тем, что в ней получены зависимости скорости горения от давления для различных компонентов. Существование этой зависимости было объяснено влиянием кинетических факторов и опровергнуто, таким образом, ранее сформулированный неверный теоретический вывод [5],

в котором утверждалось, что горение слоевых систем не зависит от давления.

С целью количественного изучения геометрии получающихся в результате горения впадин на границах раздела в работе [4] также анализировались изображения поверхности затушенных образцов, полученные с помощью микроскопа. Угол горения определялся как угол между границей раздела слоев и линией, проведенной из точки на ее поверхности в любую точку впадины (см. рис. 2). Результаты показали, что глубина впадины эффективно увеличивалась с ростом толщины слоя и давления. Эти количественные результаты использовались в качестве дополнительного базиса для проверки вычислительной модели, предложенной в работе [4].

Важные результаты получены в работе [6], в которой исследовались структура поверхности и закономерности горения многослойных систем. Образцы готовились из следующих компонентов: окислители — перхлорат аммония и перхлорат калия; горючие — полиформальдегид, полистирол, нафталин, уротропин и ряд других. Слойевые системы состояли из большого количества слоев (15 ÷ 30), что способствовало созданию периодических граничных условий и, как следствие, лучшему диффузионному перемешиванию.

Впадины располагались вдоль плоскостей контакта компонентов, далеко вдаваясь в конденсированную фазу. Глубина впадин при давлении 20 ÷ 40 атм обычно составляла 0.3 ÷ 1.0 мм. Такой неплоский характер горения наблюдался во всем изученном интервале толщин слоя горючего (0.1 ÷ 2.0 мм) при давлениях выше 10 атм. Для всех комбинаций компонентов скорость горения увеличивалась при возрастании давления. Барический показатель для разных пар компонентов лежал в интервале 0.6 ÷ 0.9. Для всех составов барический показатель увеличивался с ростом давления. Исключение составлял лишь состав с нафталином, для которого барический показатель постепенно уменьшался с увеличением давления. Практически для всех исследованных типов горючего наблюдалась обратная зависимость скорости горения от толщины слоя горючего. Казалось бы, полученные данные указывают на то, что при малой толщине слоя горючего скорость горения достигает своего максимума; однако даже минимальное значение исследованной толщины слоя было слишком большим для

того, чтобы можно было наблюдать падение скорости горения, соответствующее дальнейшему уменьшению толщины.

Учитывая время, в которое была выполнена работа [6], особенно стоит отметить хорошее понимание авторами роли приповерхностных процессов и конкуренции кинетического и диффузионного механизмов. Они установили, что при низком давлении процесс смешения лимитирует скорость расхода вещества в пламени. Образование впадин приписывалось действию диффузионного пламени, которое, по мнению авторов, производится его сферической верхушкой, расположенной на конечном расстоянии от поверхности. Перед фронтом пламени (в зоне предварительного смешения) происходят прогрев и перемешивание газообразных продуктов пиролиза до их расходования в диффузионном пламени. В случае, когда слои горючего очень тонкие, диффузионные пламена могут интенсивно взаимодействовать друг с другом, способствуя тем самым достижению максимума скорости горения. Наблюдаемое уменьшение скорости горения при увеличении толщины слоя горючего авторы правильно объясняют уменьшением взаимодействия между «языками» пламени. В случае толстых слоев скорость горения слоевой системы близка к скорости распространения фронта пламени вдоль поверхности контакта слоев в предельном случае двух полубесконечных слоев горючего и окислителя. Эти данные послужили базисом для проверки модели сферического пламени в этом предельном случае.

Работа [7] подтвердила многие полученные в работе [2] результаты, включая положение переднего фронта пламени (на стороне окислителя), непрерывность профиля поверхности, а также отсутствие фактов, свидетельствующих о протекании химических реакций между компонентами топлива в конденсированной фазе на границе раздела слоев. Было показано, что при использовании в качестве связующих полисульфида, ПУ, СТРВ и РВАА результаты не изменяются или изменяются очень слабо при замене слоев окислителя, изготовленных из монокристаллов ПХА, слоями, спрессованными из порошкообразного ПХА. Для всех исследованных типов горючего и при всех давлениях расплав горючего покрывал поверхность слоя ПХА вплоть до расстояния 500 мкм от границы раздела слоев, что приводило к образованию зоны предварительно перемешанно-

го пламени над этой частью горючего. Было обнаружено, что скорость горения слоевой системы на основе полисульфида выше скорости горения чистого ПХА в диапазоне давлений  $21 \div 137$  атм. Другие типы горючего демонстрировали более неустойчивое поведение. Использование СТРВ и ПУ привело к слегка меньшим значениям скорости горения по сравнению со скоростью самостоятельного горения ПХА в диапазоне давлений  $42 \div 103$  атм. При высоких давлениях (выше 137 атм), при которых скорость горения чистого ПХА начинает аномально снижаться, использование любого из четырех типов горючего увеличивало скорость горения. Почти во всех экспериментах со слоевой системой на основе ПУ наблюдалось асимметричное горение, тогда как в случае других горючих при толщине слоев горючего больше 150 мкм горение было симметричным.

Осознавая недостатки метода, авторы [7] предложили использовать высокоскоростную съемку для изучения процесса горения слоевых систем с целью получения данных, которые невозможно получить из анализа затухших образцов топлива, а именно данных о структуре пламени и его положении в пространстве. По общему признанию, отсутствие таких наблюдений сильно затрудняет получение объективной информации о взаимодействии между пламенами и получающимся в результате профилем поверхности. Наблюдавшиеся в случае тонких слоев горючего дополнительные («зазубренные» или «остроконечные») аномалии на поверхности горючего приписывались действию процедуры тушения при получении образцов для анализа с помощью сканирующей электронной микроскопии. В заключение авторы делают вывод, что «любые аналитические модели горения, в которых не учитывается наличие расплава на поверхности топлива и/или предполагается, что ведущую роль играют реакции на границе раздела слоев, могут быть подвергнуты серьезной критике».

Работа [8] является продолжением работы [2], однако в ней сделан акцент на изучение структуры пламени и геометрии поверхности слоевых топлив. Исследовались слоевые системы на основе ПУ, НТРВ (полибутадиена с концевыми гидроксильными группами) и СТРВ. С помощью ксенонового источника мощностью 2500 Вт с модулятором были получены чередующиеся изображения освещенной поверхности горения и пламени в диапазоне давлений

21 ÷ 164 атм при вариации толщин слоя горючего в интервале 25 ÷ 250 мкм. Обобщенные результаты, свидетельствующие об отсутствии химических реакций в конденсированной фазе на границе раздела слоев, и найденные профили поверхности слоевых систем на основе ПХА согласуются с данными работы [2]. Было обнаружено, что чем больше толщина слоя горючего, тем сильнее при горении выступает средний слой горючего. В согласии с результатами [2] авторы также утверждали, что передний фронт пламени находится на стороне ПХА вследствие «горения ПХА». Позже, при изучении влияния суммарной кинетики реакции на структуру диффузионного пламени, было показано, что этот вывод ошибочен. Последующие исследования, обзор которых представлен ниже, указывают на то, что положение переднего фронта пламени определяется положением поверхности стехиометрического состава в газовой фазе.

Низкая температура плавления горючих, исследованных в работе [8], способствовала образованию расплава на поверхности горючего. Это было явно показано в случае связующих на основе НТРВ при использовании в качестве отвердителя димерилдидиизоцианата (DDI). Оказалось, что эта добавка может значительно влиять на конечную геометрию поверхности и общий характер горения слоевых топлив. При приближении фронта пламени горючее плавится и образующийся расплав растекается по поверхности окислителя, что замедляет горение последнего и оказывает влияние на «положение и стабильность отдельных факелов пламени». Особенно очевидно это проявлялось в случае более толстых слоев горючего. Авторы правильно призывают к тому, что для лучшего понимания горения таких слоевых топлив необходимо изучать условия фазового перехода и характеристики компонентов горючего.

В заключение в работе [8] приведен ряд интересных наблюдений, касающихся структуры пламени слоевых систем на основе НТРВ и СТРВ (в случае слоевых систем на основе ПУ видимого пламени не наблюдалось). При давлениях ниже 21 атм наблюдалось простое диффузионное пламя; однако при более высоких давлениях появлялось «турбулентное диффузионное» пламя, обусловленное пространственной неоднородностью и временной неустойчивостью. Эти многочисленные прямолинейные

невихревые структуры, которые хорошо видны при съемке сбоку, согласуются с наблюдениями, сделанными в работе [2].

С целью изучения слоевых систем, размеры которых близки к реальным топливам, в работе [9] исследовались слоевые системы с «тонкими» слоями горючего толщиной 15 ÷ 200 мкм. Чтобы определить пределы горения, изучалось горение клиновидных слоевых систем (с постепенно уменьшающейся толщиной слоев горючего) на основе НТРВ, СТРВ, РВАН (полибутилен акрилонитрил) и полисульфида. Кроме того, с помощью сканирующей электронной микроскопии авторы получили изображения поверхности образцов, погасших самостоятельно, для сравнения с поверхностью образцов, затухенных в результате быстрого сброса давления.

В работе [9] были установлены закономерности, похожие на те, что наблюдались в предыдущей работе, включая более сильное выступание слоя горючего при увеличении его толщины, уменьшение выступления слоя ПХА при увеличении давления, а также плавный переход от слоя горючего к слою окислителя и наличие на стороне ПХА областей запаздывания, переходящих в области с максимальной нормальной скоростью горения. Авторы попытались описать характер диффузионных пламен при их наблюдении вдоль линии, перпендикулярной направлению раздела слоев. Было обнаружено, что при горении слоевых систем с очень тонкими слоями горючего слои последнего временами оказывались ниже слоя ПХА. Боковые пламена имели нестационарный характер, т. е. очень небольшие пространственные детали структуры изменялись за время одного кадра, несмотря на то, что частота смены кадров превышала 2 000 Гц. В случае более толстых выступающих слоев горючего боковые пламена располагались не так часто и существовали дольше (почти три кадра).

Авторам [9] удалось немного продвинуться в понимании причины понижения скорости горения ПХА вблизи границы раздела слоев. При использовании слюды вместо горючего плавного перехода от слоя к слою и эффекта запаздывания ПХА вблизи границы раздела не наблюдалось, что указывает на то, что эти особенности могут быть обусловлены процессами, связанными с горючим. Авторы также постулировали, что наклонный (направленный вверх) профиль ПХА вблизи границы разде-

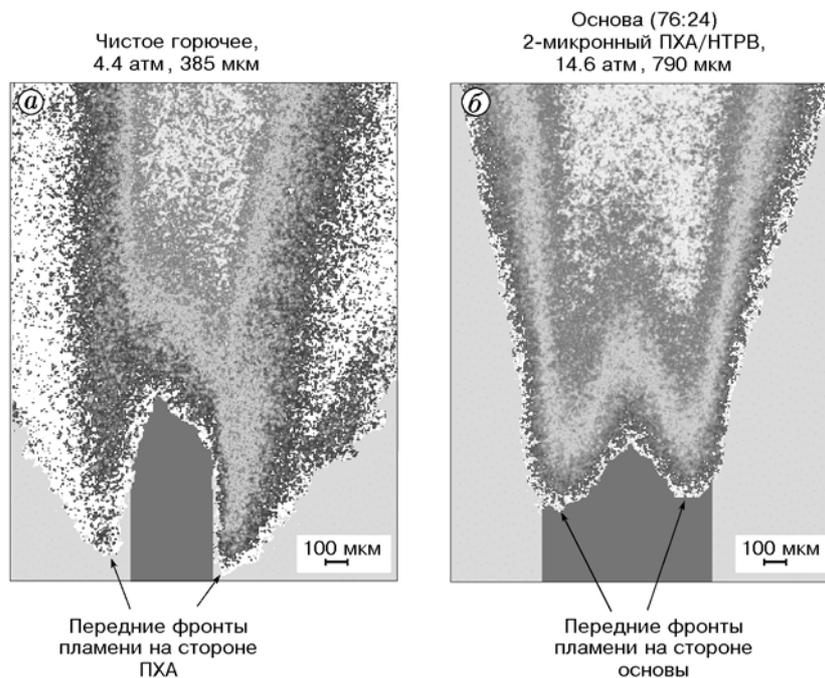


Рис. 3. Изображения, показывающие сдвиг положения передних фронтов пламени для слоев горючего с разной стехиометрией

ла может быть просто вызван локализацией переднего фронта пламени на стороне ПХА и соответствующим падением локального теплоподвода из диффузионного пламени при боковом удалении от точки максимальной регрессии. Кроме того, относительное уменьшение высоты слоя ПХА во всех точках (за исключением точек, прилегающих к слоям горючего) при высоком давлении убедительно доказывало, что действительно имеется эффект запаздывания горения вблизи слоя горючего.

Самостоятельное погасание клиновидных слоевых систем позволило лучше понять процесс быстрого принудительного тушения, а также роль химического кинетического и диффузионного механизмов при горении слоевых систем. Микроструктура поверхности самостоятельно погасших слоевых систем незначительно отличается от наблюдаемой в случае образцов, затушенных путем быстрого сброса давления, что некоторым образом обосновывает использование принудительно затушенных поверхностей для описания конденсированной фазы. При давлениях выше 6 атм толщина слоя горючего, при которой клиновидные слоевые системы гасли (рис. 3), составляла  $\approx 20$  мкм и практически не менялась при уве-

личении давления, что свидетельствует о том, что в этих условиях распространение пламени лимитируется диффузией. При данной толщине слоя пламя становится настолько бедным горючим, что горение больше не может поддерживаться, несмотря на большое количество столкновений. При давлении ниже 6 атм толщина слоя горючего, при котором происходило погасание, увеличивалась при уменьшении давления, потому что в этих условиях распространение пламени лимитируется химической кинетикой. При давлениях, близких к атмосферному, толщина слоя горючего, при котором происходило погасание, составляла почти 100 мкм. Цитируя гипотезу, выдвинутую в работе [10], о том, что диффузионному пламени предшествует зона предварительного смешения, расположенная выше по потоку, авторы [9] предположили, что при уменьшении давления эта зона растягивается, так что распространение пламени все сильнее лимитируется кинетикой.

В работе [11] было продолжено изучение горения слоевых систем с различными типами горючего. Кроме того, с целью дальнейшего изучения причин торможения горения ПХА вблизи границы раздела горючее/окислитель

были выполнены эксперименты, в которых вместо слоя горючего использовались слюдяная и золотая пластинки. Эксперименты проводились также со слоевыми топливами, в которых слой горючего содержал мелкодисперсный ПХА. Такие образцы моделируют реальные топлива, в которых порошок ПХА состоит из разных фракций. Для обоих типов слоевых систем (с постоянной и переменной толщиной слоев горючего) изучались скорость горения и структура поверхности принудительно затушенных образцов. Результаты показали, что эффект торможения горения ПХА вблизи границы раздела не связан с наличием потока расплавленного горючего, так как этот эффект наблюдается как для сильно утопленных слоев горючего, когда расплав горючего не затекает на слой ПХА, так и для выступающих слоев горючего, в случае когда горючее характеризуется низкой способностью к плавлению (например, РВАН). Эффект торможения горения ПХА проявлялся не только при горении практически всех слоевых систем, содержащих слой полимерного горючего, но и при горении слоевых систем, в которых слой горючего заменен теплопроводящими золотыми пластинками. При использовании слюды в качестве среднего слоя, а также при отсутствии центрального слоя вообще, т. е. когда два слоя ПХА, прилегающих друг к другу, горели одновременно, не наблюдалось ни плавного перехода от слоя к слою, ни эффекта запаздывания. Полученные данные указывают на то, что отвод тепла за счет теплопроводности к эндотермическому полимерному горючему играет важную роль в формировании эффекта торможения горения ПХА вблизи границы раздела, проясняя тем самым природу этого эффекта.

Аналогично [4] в работе [11] для различных давлений было показано, что существует оптимальная толщина, при которой скорость горения достигает максимума. Эта оптимальная толщина уменьшалась с увеличением давления. Обнаружено, что наибольшее увеличение скорости горения при оптимальной толщине наблюдается при средних давлениях (порядка 35 атм). Данное авторами объяснение существования этого максимума скорости горения согласуется с ранее существовавшими теориями относительно взаимодействия отдельных факелов пламени. При уменьшении толщины слоя горючего формируются неблагоприятные стехиометрические условия, которые при-

водят к уменьшению скорости горения до тех пор, пока не наступает самогашение. Уменьшение этой оптимальной толщины с увеличением давления связывалось с уменьшением ширины темной зоны пламени, приводящим к более интенсивному взаимодействию факелов (даже в случае более тонких слоев). В экспериментах при давлениях выше нижнего предела (по давлению) горения чистого ПХА было также показано, что чем меньше толщина слоя горючего, тем ближе скорость горения слоевой системы к скорости горения чистого ПХА. При давлениях выше 10 МПа обнаружено, что скорость горения слоевой системы не зависит от толщины слоя горючего и совпадает со скоростью горения чистого ПХА. Это связано с тем, что при этих условиях окислитель определяет (ведет и ограничивает) процесс горения слоевой системы.

Результаты работы [11], посвященной изучению слоевых систем, в которых слой горючего содержит кристаллы ПХА, продемонстрировали, что процессы, связанные со смешением реагентов в пламени, играют более важную роль, чем считалось ранее. В слой горючего было добавлено значительное количество окислителя (массовое соотношение между ПХА и горючим составляло 50:50 и 70:30), тем не менее эксперименты проводились при обычно используемых толщинах слоя горючего. Вследствие малой толщины слоя горючего, практически во всех экспериментах распространение пламени лимитировалось кинетикой. Авторы наблюдали увеличение скорости горения и «выравнивание» выступающих участков горючего и окислителя около границ раздела слоев. В этой работе, по-видимому, была недооценена роль суммарной стехиометрии в формировании структуры диффузионного пламени. В результате авторы сделали неправильный вывод, что передний фронт пламени никогда не находится над границей раздела слоев горючего и окислителя. Этот вывод противоречит полученным ранее в работах [1, 4] результатам, которые просто не принимались во внимание из-за недостаточного пространственного разрешения для корректного определения положения переднего фронта. В последующих исследованиях (которые будут обсуждаться ниже) было показано, что диффузионное пламя, которое определяет положение переднего фронта, следует за линиями стехиометрического состава, положение которых в пространстве зависит от типа горюче-

го и количества ПХА в слое горючего. В работе [11] просто не использовались слои горючего, достаточно толстые для того, чтобы мог реализоваться диффузионно лимитируемый случай для слоевых систем с наполненным ПХА горючим, поэтому смещение положения переднего фронта пламени в направлении слоя горючего не наблюдалось. Тем не менее, в статье [11] было сделано добротное обобщение наблюдений по зависимостям геометрии поверхности и скорости горения от толщины слоя горючего и давления, а также их причинной связи с взаимодействием переднего фронта пламени и предварительно перемешанного пламени для слоевых систем со слоями чистого горючего, тех явлений, которые были обнаружены общими усилиями многих исследователей.

Одна из первых попыток определения концентраций веществ и установления механизма реакций, протекающих в газовой фазе пламени слоевых топлив, была предпринята в работах [12, 13]. Методом масс-спектрометрического зондирования (зонд с диаметром отверстия 12 мкм) при очень низких давлениях (0.3 атм) были определены профили концентраций стабильных веществ для различных положений зонда над поверхностью слоевой системы. Конечно, при использовании данных, полученных при низких давлениях и в случае толстых слоев горючего, для прогнозирования поведения реальных топлив в условиях горения в ракетном двигателе необходимо соблюдать определенную осторожность; однако значение таких данных для проверки и обоснования вычислительных моделей, базирующихся на детальной химической кинетике, трудно переоценить.

В работе [13] изучались сэндвичи, состоящие из двух слоев горючего и трех слоев ПХА. Слой горючего, или «основа», включали частицы ПХА (размером не больше 50 мкм), смешанные с полибутадиеновым каучуком в массовом соотношении 57:43. Наряду с получением профилей температуры, авторы также измеряли концентрации следующих веществ:  $H_2$ ,  $NH_3$ ,  $H_2O$ ,  $C_2H_2$ ,  $HCN$ ,  $CO$ ,  $N_2$ ,  $NO$ ,  $HCl$ ,  $CO_2$ ,  $N_2O$ ,  $NO_2$ ,  $ClOH$ ,  $C_4H_6$ ,  $ClO_2$  и  $Cl_2$ . В газовой фазе над слоем окислителя были зафиксированы две зоны пламени. Первая, прилегающая к поверхности зона, шириной  $0.2 \div 0.3$  мм, характеризуется протеканием реакции окисления аммиака хлорной кислотой; эта зона аналогична той, что наблюдалась при разложении чистого ПХА при близких давлениях. Следующая за

первой вторая зона (шириной  $\approx 3$  мм) связана с расходом  $O_2$  и  $NO$ . В этой зоне также происходит накопление  $HCN$  и ацетилена, которое связано с поперечной диффузией из соседних слоев горючего. Над слоем основы были также обнаружены две зоны, а именно узкая зона, характеризующаяся расходом диоксида хлора и хлорной кислоты, и следующая за ней широкая зона, в которой происходило непрерывное расходование аммиака и накопление азотной кислоты. Было обнаружено, что процесс расходования и окисления бутадиена конкурирует с окислением аммиака над окислителем. Последнее приводит к неполному окислению в первой зоне над слоями ПХА, которое должно быть завершено во второй зоне. Эти двойные реакционные зоны, наблюдавшиеся над обоими типами слоев, отличались от регистрируемой простой тепловой структуры, которая обычно имеет только одну непрерывную зону с соответствующим тепловыделением.

Метод, используемый в работах [12, 13], несомненно, стал бы лучше, если бы удалось увеличить пространственное разрешение, особенно в поперечном направлении, а также детально охарактеризовать возмущение, вносимое зондом в пламя. Однако для полного понимания всех тонкостей горения гетерогенных слоевых систем в газовой фазе анализ такого типа просто необходим.

Работы [14–17], подобные работам [12, 13], представляют значительный интерес для исследования природы газофазного горения гетерогенных слоевых топлив. Кроме определения локальных температур путем анализа населенностей вращательных уровней, с помощью метода плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции получены локальные концентрации различных газообразных компонентов, включая концентрации промежуточных веществ. К достоинствам этого метода относится то, что может быть использован достаточно тонкий (толщиной 150 мкм) плоский пучок лазерного излучения, позволяющий изучать очень узкие сечения в газовой фазе, избавившись от многих эффектов, сопутствующих традиционным методам визуализации. Однако этот метод имеет и свои недостатки. Требования к плоскостности поверхности горения ограничивают время анализа начальной стадией горения, пока поверхность горения достаточно ровная. Измерения должны проводиться либо в течение этого переходного периода (до

того как на поверхности образуются неровности), либо при очень низком давлении и для тонких слоев, так чтобы один слой не выступал над другим. Дополнительный поток лазерного излучения ( $800 \text{ Вт/см}^2$ ) использовался для того, чтобы обеспечить горение компонентов топлива ниже их предела (по давлению) горения и моделировать горение топлива при высоких давлениях, поскольку этот метод не может быть использован при таких условиях. Несмотря на то, что данные, полученные с помощью такого подхода, требуют тщательного анализа, тем не менее их можно использовать для количественного определения концентраций веществ в пламени, что необходимо для проверки моделей, базирующихся на детальной химической кинетике. Возможно, лучше всего в пользу применения методики [14–17] говорит установленная с ее помощью уникальная способность ПХА образовывать интенсивное приповерхностное диффузионное пламя, что обеспечивает увеличение скорости горения топлив на основе ПХА при уменьшении размера частиц ПХА.

В случае горения слоевых систем на основе нитраминов, динитрамида аммония (ADN) и нитроформата гидразиния (HNF) диффузионные пламена вблизи поверхности топлива не обнаружены [14–17]. Только в случае слоевых систем на основе ПХА интенсивные диффузионные пламена образовывались вблизи поверхности топлива, рядом с границей раздела слоев. При атмосферном давлении ширина темной зоны пламени для слоевых систем ПХА/полиуретан составляла всего лишь 100 мкм. Авторы постулируют, что если бы это расстояние контролировалось кинетически (что соответствовало бы теоретическим представлениям многих исследователей, включая Прайса, Фенна, Бахмана и Либровича), то ширина темной зоны для реальных давлений в ракетных двигателях ( $50 \div 100 \text{ атм}$ ) составляла бы 0.1 мкм. Допущения, что анализ [14–17] корректен, несмотря на дополнительное лазерное излучение, и что кинетические механизмы не изменяются при более высоких давлениях, несомненно, требуют дополнительного изучения. Однако трактовки авторов [14–17] имеют большое значение для описания наблюдаемой зависимости скорости горения ПХА от размера частиц. В случае крупных частиц горение определяется более холодным пламенем продуктов разложения ПХА (1400 К), тогда как в

случае мелких частиц большая часть поверхности топлива подвергнута действию приповерхностных горячих диффузионных пламен, существующих на краях кристаллов ПХА, и это приводит к значительному увеличению скорости горения.

Помимо обнаружения уникальности горения ПХА, авторы [14–17] также показали, что диффузионные пламена подчиняются закономерностям, полученным теоретически в работе [18]. Было установлено, что высота диффузионного пламени изменяется пропорционально изменению толщины слоя горючего, тогда как при изменении давления она остается практически неизменной. Обнаружено, что в случае бедного пламени диффузионное пламя смыкается над слоем горючего. Для слоевых систем, содержащих полиуретан толщиной 500 мкм, максимум температуры достигался на стороне ПХА на расстоянии 1 мм. Наличие дополнительного лазерного потока привело к тому, что конечная температура в диффузионном пламени превысила адиабатическую температуру на  $\approx 100 \text{ К}$  и составила 2750 К. Из-за теплопотерь и подмешивания окружающего холодного воздуха локальные максимумы температуры над слоем ПХА были немного ниже адиабатической температуры пламени ПХА. При измерении температуры вдоль линии, проходящей посередине слоя горючего, в направлении от поверхности образца было зафиксировано очень небольшое изменение температуры. Несмотря на то, что эти эксперименты проводились при низких давлениях, они внесли значительный вклад в понимание структуры пламени слоевых топлив.

Расширяя область исследования по сравнению со своей предыдущей работой, авторы работы [19] провели детальное исследование слоевых систем, в которых слои горючего содержали кристаллы ПХА, для того чтобы определить, как варьируются структура поверхности и скорость горения. В качестве горючего использовался РВАН, в который подмешивался мелкодисперсный ПХА с размером частиц 10 или 33.5 мкм. Массовое соотношение между окислителем и горючим — 50:50 либо 70:30. Диапазон изменения толщины слоя горючего был значительно расширен и составил  $100 \div 600 \text{ мкм}$ . В экспериментах при давлениях 2.1, 3.5 и 6.9 МПа проводилась фотосъемка процесса, измерялась скорость горения, а также с помощью сканирующей электронной мик-

роскопии исследовалась поверхность затушенных образцов. Установлено, что слоевые системы с частицами ПХА размером 10 мкм практически всегда горели быстрее слоевых систем с более крупными частицами ПХА. Независимые эксперименты со смесью горючего и ПХА показали, что при соотношении 70:30 смесь горит сама по себе, а при 50:50 — нет. Максимум скорости горения в изученных слоевых системах достигался при значительно большей толщине слоя горючего ( $\approx 250$  мкм), чем в слоевых системах, в которых слой горючего не содержал ПХА ( $\approx 75$  мкм). При большем содержании ПХА в слое горючего (70 %) на зависимости скорости горения от толщины слоя горючего обнаружен более острый пик, чем при содержании ПХА 50 %, но в работе никак не объясняется это наблюдение. В случае толстых слоев горючего (с толщиной больше 500 мкм) скорость горения слоевой системы асимптотически приближалась к скорости горения образца смеси горючего и ПХА (только для смеси с соотношением 70:30). Уменьшение нормальной скорости горения ПХА вблизи границы раздела и сопутствующий плавный переход от слоя к слою наблюдались в гораздо меньшей степени и почти отсутствовали для слоевых систем, в которых слои горючего содержали большое количество ПХА. Причина этого заключается в уменьшении «бокового стока тепла» к слою горючего вследствие увеличения подвода тепла из зоны над этим слоем, связанного с разбавлением горючего окислителем. В заключение отметим, что изображения затушенных образцов показали, что частицы ПХА размером 10 мкм находятся под слоем расплавленного горючего, тогда как частицы ПХА размером 33.5 мкм можно было различить на поверхности, особенно при высоких давлениях и содержании ПХА.

В работе [19] сделан ряд утверждений о структуре, характеристиках и взаимодействии различных пламен в газовой фазе. Но, поскольку пространственное разрешение в газовой фазе было ограниченным и для наблюдения была доступна только видимая область спектра, многие утверждения недостаточно обоснованы, особенно если учесть тот факт, что в работе не исследовалось, как процесс тушения изменяет микроструктуру поверхности. Конечно, выводы о структуре пламени, сделанные на основе изучения затушенных поверхностей, в определенной степени умозрительны, однако с некоторой осторожностью часть выводов приведена

ниже.

Авторы [19] различают диффузионные пламена, возникающие вблизи границы раздела слоев (на стороне ПХА), и диффузионные пламена, возникающие вокруг частиц ПХА, находящихся в слое горючего. Они утверждают, что при добавлении высокодисперсного ПХА в слой горючего диффузионное пламя сдвигается к границе раздела слоев. Но при этом непонятно, как точка максимальной регрессии может все еще оставаться на стороне ПХА, находясь при этом на значительном удалении от передней кромки диффузионного пламени, как это показано на иллюстрациях [19]. Тем не менее, эти авторы признают, что наличие предварительно перемешанной смеси продуктов разложения окислителя и горючего над слоем горючего приводит к более высокой температуре (и соответственно к большему тепловыделению) и увеличению ширины диффузионного пламени. Авторы предсказали существование единого предварительно перемешанного пламени, соединяющего отдельные диффузионные пламена, существующие вблизи границ раздела слоев. Они считают, что пламена вблизи границ раздела слоев способствуют усилению индивидуальных пламен вокруг частиц ПХА, находящихся в слое горючего. В пользу этого утверждения свидетельствует большее количество частично разложившихся крупных (33.5 мкм) частиц ПХА в слое горючего вблизи границ раздела. Авторы считают, что в случае мелких частиц ПХА или при достаточно низком давлении пламена вокруг частиц ПХА будут гаснуть, и связывают это со смещением положения переднего фронта пламени относительно поверхности стехиометрического состава, которое происходит из-за ухудшения кинетических условий или уменьшения высоты стехиометрического пламени. Хотя и следовало бы сравнить положение вершины стехиометрической поверхности с результатами анализа по модели Шваба — Зельдовича, осуществление этого сценария при давлениях, характерных для ракетных двигателей, кажется маловероятным, особенно если принять во внимание, что авторы работ [14–17] предсказали ширину темной зоны пламени меньше 0.1 мкм. Кроме того, утверждение, что толщина слоя горючего влияет на ширину темной зоны, противоречит данным работ [14–17], где было показано, что ширина темной зоны определяется кинетикой химических реакций, сильно зависит от дав-

ления и не зависит от толщины слоя горючего. В целом, многие из сделанных утверждений указывают на то, что для проверки их достоверности необходимо развивать дополнительные прямые методы изучения структуры газофазных пламен. Несмотря на недостатки работы [19], можно с уверенностью сказать, что она действительно обозначила область изучения различных типов пламени и влияния, оказываемого давлением, размером частиц и составом горючего.

В работе [20] исследовалась зависимость скорости горения от давления для слоевых систем, в которых слои горючего содержали ПХА, а также особенности аномального горения, наблюдавшегося при самостоятельном горении основы (слоя горючего с ПХА). Иногда кривая зависимости скорости горения от давления содержала участки, на которых скорость горения не менялась с ростом давления (так называемые плато) и даже падала (участки с обратной зависимостью скорости горения от давления, *mesa burning*). Такие отклонения от «нормального» поведения скорости горения наблюдались как для ПХА, так и для богатых горючим смесей горючего с ПХА. Исследование слоевых систем на основе РВАН, содержащих частицы ПХА размером 10 мкм, с соотношением окислитель/горючее 70:30 показало обратную зависимость скорости горения в диапазоне давлений  $69 \div 103$  атм при толщине слоя горючего  $\approx 250$  мкм (кстати, это толщина слоя, при которой скорость горения достигает максимума). Для образцов с толщиной слоя горючего  $200 \div 400$  мкм при близких значениях давления на зависимости скорости горения от давления имело место плато. Для смесей горючего и ПХА с соотношением окислитель/горючее 50:50 в диапазоне давлений  $69 \div 137$  атм при толщине слоя горючего  $100 \div 600$  мкм на зависимости скорости горения от давления наблюдались как плато, так и участки с обратной зависимостью. На основе данных, полученных при исследовании затухенных образцов, авторы сделали вывод, что плато появляется при взаимодействии процессов горения крупных частиц окислителя и основы. Это было очевидно для режима, при котором передние фронты пламен находились в непосредственной близости друг от друга. Совокупность полученных данных указывает также на то, что накопление на поверхности расплавленного горючего также служит причиной появления плато; однако

такой же эффект наблюдался и при отсутствии расплавленного слоя горючего.

В недавней работе [21] продолжено изучение эффекта плато в контексте исследования неустойчивого горения основы и характера горения слоевых систем, которые ее содержат. В качестве горючего использовался НТРВ, отвержденный с помощью IPDI (изофорондиизоцианат). Эксперименты проводились с целью определения влияния размера частиц ПХА в горючем и давления на процесс горения (т. е. на то, какие режимы при этом устанавливаются). Все составы содержали небольшой избыток горючего по сравнению со стехиометрией, соотношение окислитель/горючее равнялось 65:35. Горючее, заполненное частицами ПХА размером 2 мкм, поддерживало горение в очень узком диапазоне давлений  $2.07 \div 2.42$  МПа. В случае размера частиц ПХА 10 мкм диапазон давлений был шире —  $1.38 \div 3.45$  МПа. Фотографии, полученные при горении основы вблизи пределов горения по давлению, показали, что горение в этих условиях носит переходный, случайный характер и характеризуется неплоским профилем поверхности горения. Продукты плавления/разложения горючего скапливались на поверхности в виде темных капель. Для слоев с размером частиц ПХА 10 мкм эти капли были значительно заметнее, чем в случае размера частиц 2 мкм, когда обычно происходило застывание расплава горючего.

Для каждой слоевой системы были построены графики зависимости скорости горения от давления, на которых плато было очевидным. В обоих случаях плато появлялось при давлении (своем в каждом случае), при котором основа перестает поддерживать самостоятельное горение. Считается, что диффузионные пламена вблизи границы раздела слоев помогают горению основы и тем самым увеличивают давление, при котором прекращение горения основы начинает влиять на горение всей слоевой системы в целом. Во всех случаях скорость горения слоевых систем была выше скорости самостоятельного горения основы (когда она горела). Это служит дополнительным подтверждением того, что передний фронт диффузионного пламени играет важную роль при горении слоевых систем и определяет скорость горения.

Фотоснимки процесса горения основы с частицами ПХА 2 и 10 мкм показали, что при значениях давления, лежащих у нижней грани-

цы диапазона самостоятельного горения основы, пламя равномерно покрывало поверхность образца, ширина темной зоны принимала минимальное значение, а геометрия в целом была симметричной. В области более высоких давлений, при которых основа перестает гореть сама по себе, существование потока расплавленного горючего было более явным, что подтверждалось наличием темных капель на краях горящего образца. Обнаружено, что пламя в этих условиях прерывистое и существует единая зона пламени, находящаяся на значительном расстоянии от поверхности образца, где сливаются индивидуальные пламена.

С помощью сканирующей электронной микроскопии получены [21] изображения поверхностей затушенных образцов. В случае систем с тонкими слоями горючего ( $100 \div 150$  мкм) слой горючего был утоплен по сравнению со слоями окислителя. Для образцов с промежуточной толщиной слоя горючего ( $250 \div 275$  мкм) при низком давлении слой горючего был также углублен, однако при высоком давлении на поверхности наблюдались расплавленное горючее и перераспределение частиц ПХА. В случае образцов с толстыми слоями горючего ( $450 \div 600$  мкм) слой горючего выступал и сопровождалось это неустойчивостью (прерывистостью) пламени при давлениях, близких к верхней границе диапазона самостоятельного горения. При этом для частиц размером 2 мкм регистрировалось скопление большого количества частиц окислителя на краях слоевой системы, а для частиц размером 10 мкм — значительное перераспределение частиц ПХА.

Опираясь на новые результаты, авторы [21] предложили объяснение для более сильной зависимости скорости горения от толщины слоя горючего, наблюдавшейся в работе [19] для слоевых систем, в которых слой горючего содержал большое количество ПХА (70:30). Так как смесь с соотношением между окислителем и горючим 70:30 способна поддерживать самостоятельное горение, она имеет тенденцию к образованию единого, предварительно перемешанного пламени, соединяющего отдельные диффузионные пламена. Это пламя прогревает газовую фазу и приводит к увеличению количества тепла, подводимого ко всей поверхности горения в целом. Как следствие, наблюдается большее увеличение скорости горения при оптимальной толщине слоя горючего, так как диффузионные пламена усиливают друг дру-

га, в отличие от случая, когда слоевая система содержит основу, которая не поддерживает самостоятельное горение, например, в случае соотношения окислитель/горючее 50:50. Наконец, авторы отмечают, что меньшая скорость горения в образцах с толщиной слоя горючего, превышающей оптимальную, может быть обусловлена неустойчивым поведением пламени, которое, как описано выше, наблюдалось для слоев толщиной  $400 \div 600$  мкм.

Работа [22], в которой изучалось горение слоевых систем на основе ПХА и НТРВ методом эмиссионной визуализации, помогла удовлетворить настоятельную потребность в информации, касающейся структуры пламени в газовой фазе и ее связи с профилем поверхности при устойчивом горении. Камера с интенсифицированной ПЗС-матрицей для детектирования УФ-излучения с длиной волны 310 нм использовалась для получения эмиссионных изображений при хемилюминесценции электронно-возбужденного радикала  $\text{OH}\cdot$ . Модулятор позволял получить чередующиеся подсвеченные «просветные» изображения, характеризующие поверхность в процессе горения. Что касается газофазного анализа, то эта работа дополнила количественные данные [14–17], которые были ограничены областью низких давлений и нестабильно горящими плоскими поверхностями. Исследование проводилось в диапазоне давлений вплоть до 32 атм, в основном со слоевыми системами, в которых слой горючего не содержал добавок окислителя. Были измерены скорости горения, а также описана структура пламени как функция безразмерных параметров горения. Использование в данной работе числа Пекле ( $Pe$ ), которое характеризует соотношение между конвективным и молекулярным процессами переноса тепла, и числа Дамкелера ( $Da$ ), которое характеризует отношение скорости образования (расходования) компонента к скорости его диффузии, является одной из первых попыток анализа горения слоевых топлив в терминах связанных параметров. Число Пекле определялось путем умножения скорости горения на характерный масштаб диффузии (половина толщины слоя горючего) и последующего деления на коэффициент диффузии в газовой фазе. Число Дамкелера определялось как произведение квадрата абсолютного давления, квадрата характерной длины диффузии и масштабного коэффициента  $A$ , деленное на произведение плотности конден-

сированной фазы и коэффициента диффузии газа, в предположении, что число Льюиса равно единице. Коэффициент  $A$  выбирался таким образом, чтобы при толщине слоя 100 мкм и давлении 1 атм число Дамкелера равнялось единице.

Измерения зависимости скорости горения от давления для слоевых систем с толщиной слоя горючего 50 ÷ 400 мкм (слои горючего не содержали добавок окислителя) показали, что в области давлений ниже 15 атм барический показатель скорости горения равен 0.31. При давлениях выше 15 атм барический показатель становится равным 0.66, что указывает на изменение механизма горения, возможно обусловленное началом самостоятельного горения ПХА. Очевидной зависимости скорости горения от толщины слоя горючего не наблюдалось. Отсутствие максимума на зависимости скорости горения от толщины, возможно, связано с недостаточным количеством точек на этой зависимости (шаг изменения толщины был слишком большой) или же с наличием потока лазерного излучения ( $120 \text{ Вт/см}^2$ ), который сопровождал горение во всех случаях. В диапазоне поверхностной плотности потока лазерного излучения  $60 \div 360 \text{ Вт/см}^2$  скорость горения изменялась на 15 ÷ 20 %. При низком давлении и тонких слоях горючего, когда ПХА самостоятельно не горит и его горение поддерживается теплоподводом из диффузионного пламени, скорость горения уменьшалась. В целом, нестабильность горения наблюдалась в течение  $\approx 1$  с, пока формировался неплоский профиль поверхности горения.

Авторы [22] обнаружили, что излучение пламени в газовой фазе происходило преимущественно из более холодных, богатых горючим областей, расположенных ниже бедного горючим диффузионного пламени Бурке — Шумана. В работе [23] авторы проверили это, сравнив с результатами анализа по модели Шваба — Зельдовича, которая позволяет рассчитать положение поверхности стехиометрического состава, расположенной над слоем горючего. В точках пламени, расположенных над местом максимальной регрессии, или впадиной, отсутствовало излучение с длиной волны 310 нм, однако эти точки располагались явно на стороне ПХА. Вблизи границы раздела наблюдалось уменьшение нормальной скорости горения ПХА. Указанные выше особенности структуры поверхности согласовывались с

данными, полученными ранее [11].

Можно выделить два основных типа пламени, а именно слившееся пламя, наблюдающееся при малых числах  $Pe$  и  $Da$ , и пламя, в основании которого можно различить отдельные факелы, наблюдающееся при больших числах  $Pe$  и  $Da$ . При больших числах  $Pe$  и малых числах  $Da$  наблюдался частный случай слившегося пламени, когда пламя приподнято над поверхностью. Использование альтернативного числа  $Da$ , зависящего только от давления в первой степени, привело к тому, что данные лучше ложились на аппроксимирующую кривую, хотя никакого теоретического обоснования для такого выбора параметра нельзя было сделать. Увеличение числа  $Pe$  при постоянном значении  $Da$  приводило к изменению режима горения: от случая с почти плоской поверхностью горения и слившимся пламенем к случаю с выступающим средним слоем горючего и большей шириной пламени. Уширение пламени согласовывалось с результатами анализа по модели Шваба — Зельдовича [23], полученными при увеличении числа  $Pe$ . При достаточно больших значениях  $Pe$  ( $\approx 3$ ) продукты разложения, по-видимому, сносятся за счет конвекции достаточно далеко вниз по потоку, что ведет к замедлению реакции и уменьшению интенсивности излучения.

Обнаружено [24], что учет влияния конвекции и диффузии (путем использования числа  $Da$ ) на скорость реакции необходимо проводить более тонким способом. При постоянном большом значении числа  $Pe$  и низких значениях числа  $Da$  реализовывался режим с «приподнятым пламенем», при этом сигнал  $\text{OH}\cdot$  фиксировался на некотором расстоянии от поверхности горения. При больших числах  $Da$  пламя «прилегало» к поверхности горения, несмотря на значительную конвекцию. При умеренных (постоянных) значениях  $Pe$  увеличение числа  $Da$  приводило к возрастанию интенсивности реакции и соответственно интенсивности излучения.

Предварительные исследования слоевых систем, в которых слой горючего содержал окислитель, ограничивались образцами с очень тонкими слоями горючего, в результате значения числа  $Da$ , пропорционального квадрату толщины слоя горючего, были достаточно низкими. Основываясь на том, что излучаемый сигнал локализовался в очень узкой области над горючим, в работе [22] корректно

предположили, что поверхность стехиометрического состава переместилась по направлению к границе раздела. В работе не исследовались слоевые системы с достаточно толстыми слоями горючего, обеспечивающими переход горения слоевой системы в диффузионно лимитируемый режим, так как введение окислителя в слой горючего существенно увеличивает характерный масштаб длины, необходимый для реализации такого сценария.

В работе [24] для более детального исследования слоевых систем, в которых слой горючего содержит ПХА, использовались ранее разработанные [22] трансмиссионный и эмиссионный методы визуализации в УФ-диапазоне. При этом особое внимание уделялось взаимосвязи кинетики и диффузии и тому влиянию, которое она оказывает на структуру пламени и поверхности горения. С целью проведения исследования при значительно различающихся условиях использовались слоевые системы со слоями горючего, состоящими либо из чистого НТРВ, либо из смеси НТРВ и высокодисперсного порошка (2 мкм) ПХА с массовым соотношением окислитель/горючее 76:24 (предельная загрузка для монодисперсного порошка). Горючее отверждалось при помощи IPDI, внешние слои окислителя прессовались из порошка ПХА с размером частиц 200 мкм в течение 30 мин при давлении 170 МПа. Для поджига образцов топлива использовалось излучение CO<sub>2</sub>-лазера; однако сразу после воспламенения поток излучения перекрывался, чтобы иметь возможность наблюдать устойчивое самоподдерживающееся горение. Эксперименты проводились при давлении 1 ÷ 55 атм и толщине слоя горючего 200 ÷ 1 500 мкм. Достаточно большая толщина слоя горючего требовалась для того, чтобы реализовывался диффузионно лимитируемый режим в случае, когда слой горючего содержит ПХА, и, таким образом, можно было бы адекватно изучить разные лимитирующие механизмы.

В работе [24] показано, что при заданном давлении слившееся пламя наблюдалось над достаточно плоской поверхностью слоя наполненного зернами ПХА горючего, в то время как в случае чистого горючего слой связующего сильно выступал и наблюдалось пламя, в основании которого можно было различить отдельные факелы. Это происходило несмотря на то, что толщина слоя основы более чем вдвое превышала толщину слоя чистого горючего. Как

структура пламени, так и структура поверхности горения указывали на то, что добавление тонкодисперсного ПХА в слой горючего приводит к реализации режима предварительно перемешанного пламени с однородным тепловыделением, обусловленным более благоприятными стехиометрическими условиями над слоем горючего. Интенсивные диффузионные пламена все еще образуются, но происходит это при значительно большей толщине слоя связующего, чем в случае чистого горючего при постоянном давлении. Увеличение толщины слоя горючего и/или давления приводило к переходу от режима предварительно перемешанного, кинетически лимитируемого пламени к режиму диффузионно лимитируемого пламени, характеризующегося большим выступанием среднего слоя горючего и существованием на границах раздела интенсивных отдельных диффузионных пламен. Наблюдения показали, что передние фронты этих пламен находились на границе раздела либо были незначительно смещены в сторону слоя горючего (в случае слоевых систем, в которых слой горючего содержал ПХА), что до некоторой степени согласуется с предсказаниями, основанными на модели Шваба — Зельдовича. Эти результаты опровергли данные, полученные ранее [11] и указывающие на то, что граница раздела горючего и окислителя никогда не ведет фронт пламени. Это связано с тем, что в работах [11, 19] не исследовали слоевые системы, для которых бы выполнялись следующие условия: 1) толстый слой горючего, 2) частицы ПХА размером 2 мкм, 3) соотношение окислитель/горючее 76:24. Следует также отметить, что в исследованных в [24] условиях не наблюдалось торможения горения ПХА у границы раздела в случае, когда слои горючего содержали ПХА. Расположение переднего фронта пламени на границе раздела обеспечивало максимальный подвод тепла к ПХА вблизи границы, и, как следствие, регрессия ПХА в этой точке была максимальной. Этот эффект сильнее противоположного эффекта, связанного с отводом тепла к эндотермическому горючему, который часто является причиной запаздывания горения ПХА на границе раздела. Этот результат, полученный для слоевых систем, в которых слой горючего содержал ПХА, противоположен результату, наблюдавшемуся для слоевых систем с чистым горючим.

Используя относительную величину выступления слоя горючего, т. е. расстояние от

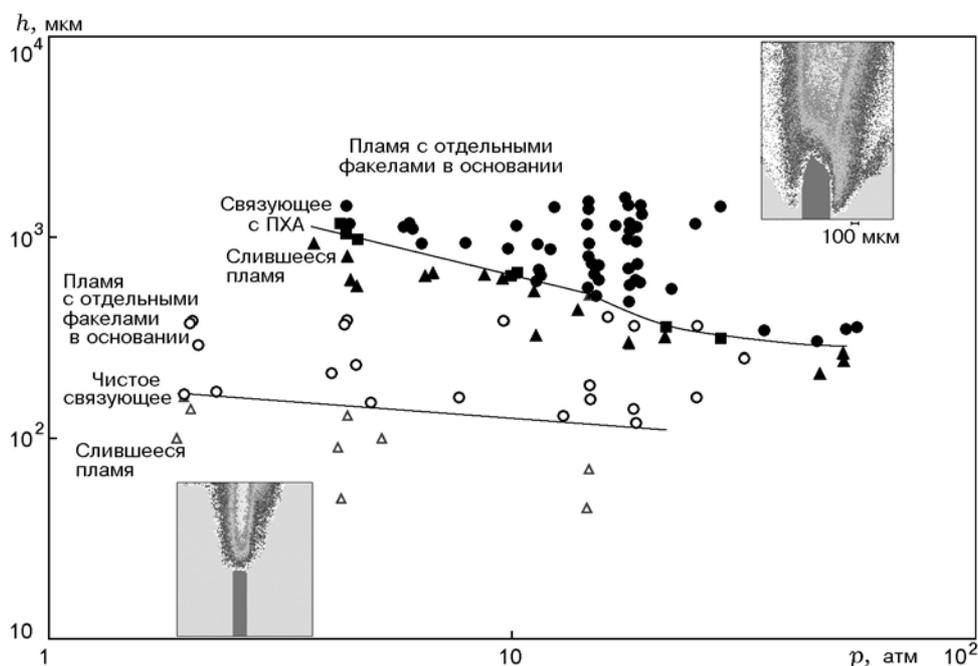


Рис. 4. Области существования различных структур пламени в зависимости от толщины слоя горючего и давления

верхней точки в слое горючего до впадины (точка максимальной регрессии), деленное на суммарную толщину, авторы [24] охарактеризовали структуру поверхности в каждом эксперименте. Результаты экспериментов были классифицированы в терминах «давление» и «толщина связующего» на режимы слившегося (малое выступание слоя связующего) и разделенного (значительное выступание) пламени. Данные работы [22] для слоевых систем с чистым горючим были заново обработаны и аналогично классифицированы вместе с данными дополнительных экспериментов для слоевых систем с чистым горючим. При этом удалось провести сравнение с соответствующими данными для слоевых систем, в которых слой горючего содержит ПХА (рис. 4). В обоих случаях обнаружена четко выраженная граница, разделяющая два режима: предварительно перемешанного пламени с отсутствием выступания слоя горючего и диффузионного пламени с выступающим слоем горючего. Определены соотношения между давлением и толщиной слоя горючего, соответствующие переходу от одного режима к другому. Результаты показали, что толщина, при которой происходит переход, для слоевых систем, в которых слой горюче-

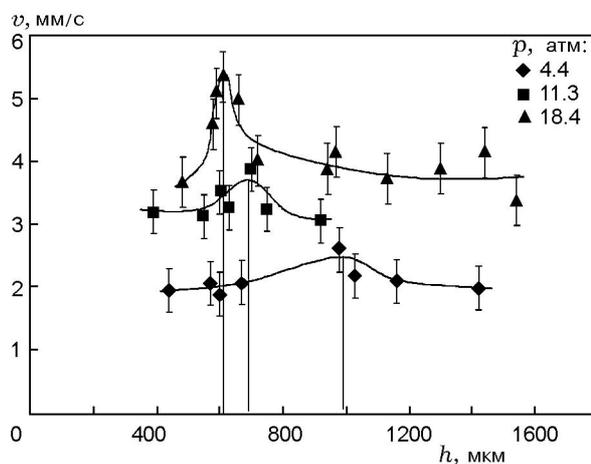


Рис. 5. Зависимость скорости горения от толщины слоя горючего

го содержит ПХА, почти на порядок больше у нижней границы диапазона давления (4 атм) и приблизительно в четыре раза больше у верхней границы диапазона. Таким образом, добавление тонкодисперсного ПХА в средний слой горючего приводит к улучшению стехиометрических условий и эффективному уменьшению средней длины диффузионного пути продуктов



Рис. 6. Результаты экспериментов, показывающие влияние поперечных граничных условий

разложения горючего и окислителя. В этом случае для создания диффузионно лимитирующих условий требуется намного более толстый слой горючего. Также следует отметить, что в случае, когда слой горючего содержит ПХА, при высоких давлениях линия, разделяющая два режима, становится практически горизонтальной, что указывает на уменьшение влияния такого параметра, как толщина слоя горючего.

В работе [24] при анализе зависимости скорости горения от толщины слоя горючего (рис. 5) при давлениях 4.4, 11.3 и 18.4 атм были обнаружены закономерности, аналогичные найденным ранее в [11, 13]. Установлена оптимальная толщина, при которой скорость горения максимальна. Когда эта оптимальная толщина и соответствующее давление были нанесены на карту областей режимов горения (см. рис. 4), обнаружилось, что все точки были либо на, либо слегка выше границы режимов. Это указывает на то, что условия для достижения максимальной скорости горения формируются в то время, когда передние фронты пламен находятся в непосредственной близости друг от друга (как раз перед слиянием), что увеличивает подвод тепла к поверхности горения. Это согласуется с выводами многочисленных экспериментальных исследований о том, что приповерхностные процессы оказывают наибольшее влияние на горение слоевых топлив.

Ценность работы [24] связана с определением количественных соотношений для параметров, определяющих взаимосвязь диффузионно лимитируемого и кинетически лимитиру-

емого режимов. Такие данные служат надежным базисом для проверки достоверности вычислительных моделей. Авторы считают, что взаимосвязь режимов горения должна описываться моделями, претендующими на корректность получаемых результатов. Это обеспечит дополнительный критерий для проверки моделей, которые до этого слишком часто ориентировались в основном лишь на точное воспроизведение скорости горения, чего достаточно легко добиться варьированием кинетических параметров.

Применимость имеющегося экспериментального базиса для проверки достоверности вычислительных моделей (и любых экспериментальных данных, полученных для слоевых систем) зависит от получения результатов, воспроизводимых с разумной точностью при разных внешних граничных условиях. В большинстве вычислительных моделей используются симметричные граничные условия для того, чтобы лучше аппроксимировать периодический характер условий на поверхности реальных топлив, в которых содержится большое количество частиц ПХА, разделенных горючим. В большей части экспериментальных исследований использовались неперiodические и приблизительно полубесконечные граничные условия, при которых слой ПХА был значительно толще, чем нужно (бедный горючим состав). Авторы работы [24] исследовали это несоответствие, изучая слоевые системы с тремя слоями горючего и сравнивая получающуюся структуру пламени и поверхность горения

со случаем слоевых систем с одним слоем горючего (рис. 6). Внешние граничные условия для слоевых систем с одиночным слоем горючего также изменялись, что достигалось изменением толщины слоя ПХА. Таким образом, получался набор данных, соответствующих различным условиям, от почти стехиометрического случая до случая с большим недостатком горючего. Несмотря на некоторые отличия в степени выступания внешних слоев ПХА и общей высоте пламени, такие характеристики, как выступание среднего слоя горючего, ширина темной зоны пламени и положение передних фронтов пламени, не изменились, хотя граничные условия значительно отличались. Этот результат, полученный как для чистых слоев горючего, так и для слоев горючего, содержащих ПХА, дополнительно подтверждает определяющую роль приповерхностных процессов при горении слоевых систем. Основным следствием этого результата является применимость использования описанного выше экспериментального базиса для сравнения с результатами расчетов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования горения слоевых топлив проводятся уже почти сорок лет. За это время удалось много узнать о горении таких систем, включая ряд характеристик поверхности горения, структуру газофазных пламен, скорости горения, пределы горения и тушения, а также влияние на эти характеристики типов окислителя и горючего, толщины слоя горючего, давления, способа отверждения горючего, суммарного компонентного состава и многих других важных параметров.

Изучение процессов в конденсированной и газовой фазах показало, что скорость горения, структура пламени и структура поверхности горения сильно зависят от конкуренции предварительно перемешанных и диффузионных пламен. Соотношение между такими параметрами, как давление, толщина слоя горючего и локальный стехиометрический состав, в конечном итоге определяет, какие пламена и какие реакции будут доминировать. Установлена крайняя важность приповерхностных процессов, поскольку они определяют теплоподвод к поверхности горения. Такие окислители, как ПХА, для которых диффузионные пламена находятся очень близко к поверхности горения,

наиболее эффективны в создании неплоских поверхностей горения и максимизации площади поверхности горения. Это позволяет варьировать баллистические характеристики топлив, содержащих ПХА, путем изменения размера его частиц и соответствующего изменения эффективной площади поверхности горения.

Для создания моделей, описывающих широкий диапазон наблюдаемых режимов горения слоевых топлив, необходимы дальнейшие исследования недостаточно изученных явлений, связанных с горением индивидуальных компонентов. Кроме того, еще многое нужно сделать для проверки общей достоверности получаемых результатов. Проведенные экспериментальные исследования не только способствовали лучшему пониманию процесса горения слоевых топлив, но и предоставили в наше распоряжение большое количество данных для сравнения с соответствующими двумерными теоретическими моделями. Что касается положения дел в настоящий момент, то тот объем данных, который получен экспериментально, еще не удалось адекватно использовать для сравнения с результатами моделирования. По мере усложнения моделей за счет привлечения детальных механизмов химических реакций эксперименты также должны становиться все более тонкими. Это необходимо, в конце концов, для того, чтобы сравнением моделей с экспериментальными данными улучшить предсказательную способность моделей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Powling J.** Experiments relating to the combustion of ammonium perchlorate-based propellants // *Proc. Combust. Inst.* 1967. V. 11. P. 447–456.
2. **Hightower J. D., Price E. W.** Experimental studies relating to the combustion mechanism of composite propellants // *Astronaut. Acta.* 1968. V. 14, N 1. P. 11–21.
3. **Hightower J. D., Price E. W.** Combustion of Ammonium Perchlorate // *Eleventh Symp. (Intern.) on Combustion. The Combustion Inst.,* 1967. V. 11. P. 463–472.
4. **Bakhman N. N., Librovich V. B.** Flame propagation along solid fuel-solid oxidizer interface // *Combust. Flame.* 1970. V. 15, N 2. P. 143–153.
5. **Nachbar W., Cline Jr. G. B.** The effects of particle size and non-stoichiometric composition on the burning rates of composite solid propellants // *Combustion and Propulsion Fifth Agard Colloquium.* 1963. P. 551–568.

6. Ермолаев Б. С., Коротков А. И., Фролов Ю. В. Закономерности горения слоевых конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 1970. Т. 6, № 3. С. 277–285.
7. Varney A. M., Strahle W. C. Experimental combustion studies of two-dimensional ammonium perchlorate-binder sandwiches // Combust. Sci. Technol. 1972. V. 4. P. 197–208.
8. Boggs T. L., Zurn D. E. The deflagration of ammonium perchlorate-polymeric binder sandwich models // Ibid. P. 279–292.
9. Price E. W., Handley J. C., Panyam R. R., et al. Combustion of ammonium perchlorate-polymer sandwiches // AIAA Journal. 1981. V. 19, N 3. P. 380–386.
10. Fenn J. B. A phalanx flame model for the combustion of composite solid propellants // Combust. Flame. 1968. V. 12. P. 201–216.
11. Price E. W., Sambamurthi J. K., Sigman R. K., Panyam R. R. Combustion of ammonium perchlorate-polymer sandwiches // Combust. Flame. 1986. V. 63. P. 381–413.
12. Коробейничев О. П. Динамическая зондовая масс-спектрометрия пламен и процессов разложения конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 5. С. 64–76.
13. Korobeinichev O. P., Tereshchenko A. G., Shvartsberg V. M., et al. Flame Structure. Novosibirsk, Russia: Siberian Branch of USSR Academy of Sciences, Institute of Chemical Kinetics and Combustion, 1991. P. 262–266.
14. Parr T. P., Hanson-Parr D. M. ADN diffusion flame structure at elevated pressure // Proc. 30th JANNAF Combustion Meeting. 1993. V. 2. P. 1–13.
15. Parr T. P., Hanson-Parr D. M. Solid propellant flame chemistry and structure // Non-Intrusive Combustion Diagnostics. Begell House, 1994. P. 571–599.
16. Parr T. P., Hanson-Parr D. M. AP Diffusion Flame Structure // Proc. 33th JANNAF Combustion Meeting. 1996. V. 2. P. 35–44.
17. Parr T. P., Hanson-Parr D. M. Solid propellant diffusion flame structure // Proc. Combust. Inst. 1996. V. 26. P. 1981–1987.
18. Burke S. P., Schumann T. E. W. Diffusion flames // Indust. Eng. Chem. 1928. V. 20. P. 998–1004.
19. Lee S. T., Price E. W., Sigman R. K. Effect of multidimensional flamelets in composite propellant combustion // J. Propulsion. 1994. V. 10, N 6. P. 761–768.
20. Price E. W., Chakravarthy S. R., Sigman R. K., Freeman J. M. Pressure dependence of burning rate of ammonium perchlorate-hydrocarbon binder solid propellants // AIAA Paper N 97-3106. 1997.
21. Chakravarthy S. R., Seitzman J. M., Price E. W., Sigman R. K. Intermittent burning of ammonium perchlorate-hydrocarbon binder monomodal matrixes, sandwiches, and propellants // J. Propulsion. 2004. V. 20, N 1. P. 101–109.
22. Chorpening B. T., Brewster M. Q. Emission imaging of AP/HTPB propellant sandwich combustion // Combust. Sci. Technol. 2002. V. 174. P. 39–60.
23. Chorpening B. T., Knott G. M., Brewster M. Q. Flame structure and burning rate of ammonium perchlorate/hydroxyl-terminated polybutadiene propellant sandwiches // Proc. Combust. Inst. 2000. V. 28. P. 847–853.
24. Fitzgerald R. P., Brewster M. Q. Flame and surface structure of laminate propellants with coarse and fine ammonium perchlorate // Combust. Flame. 2004. V. 136. P. 313–326.

*Поступила в редакцию 12/IV 2005 г.*