

ГОРЕНИЕ СЛОЕВЫХ ТОПЛИВ (ОБЗОР). 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Р. П. Фитцджеральд, М. К. Брюстер

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

Проведен обзор теоретических исследований по горению слоевых образцов твердых топлив. Детализированы цель и принимаемые упрощения при исследовании горения гетерогенных топлив с помощью представления в виде системы слоев компонентов. Во второй части обзорной статьи изложены: 1) представления о горении слоев на основе аналитического и численного описания многочисленных аспектов общей теоретической проблемы, 2) обоснования теоретических описаний путем сравнения результатов расчетов с соответствующими экспериментальными данными. Следует отметить, что, несмотря на наличие большого объема двумерных экспериментальных данных, которые могут быть использованы для проверки теоретических моделей, и множества теоретических описаний, лишь в редких случаях проведены требуемые сравнения. Практически в настоящее время ни одна модель не получила обоснования через достаточно подробное сравнение с экспериментальными результатами.

Ключевые слова: слоевые топлива, моделирование, горение.

ВВЕДЕНИЕ

В течение уже почти столетия проблема научного описания горения гетерогенных твердых топлив привлекает внимание исследователей, ищущих способы лучшего использования этих материалов для реактивного движения. Множество препятствий делает эту задачу трудновыполнимой. Частицы окислителя, внедренные в углеводородное связующее, малы (с точки зрения методов традиционных оптических измерений), хаотически распределены по пространству и имеют различную морфологию и распределение по размерам. Кроме того, еще многое неизвестно о поведении как окислителя, так и горючего-связующего в процессах разложения и горения. Реагирование этих компонентов суть сложный процесс, включающий сотни, если не тысячи элементарных стадий. И даже если бы все было известно о поведении компонентов и их взаимных превращениях, численное моделирование тысяч реакций в многофазном течении осуществить в настоящее время невозможно. Как и в ряде других сложных задач, трудности могут быть преодолены за счет использования различных допущений и упрощений.

В связи с общей сложностью проблемы любое теоретическое описание горения слоевых

топлив содержит те или иные допущения и упрощения. Хотя это может рассматриваться в качестве некоторого препятствия к достижению конечной цели, тем не менее следует считать оправданным анализ изолированных аспектов проблемы для получения сведений об отдельных параметрах и о роли данного процесса в общем явлении. Если же все сложные составляющие включены в модель, очень трудно исследовать, какие процессы оказывают наибольшее влияние на поведение горящего топлива.

Образец твердого топлива, состоящий из перемежающихся слоев топлива и окислителя (рис. 1, *a*), представляет собой двумерный аналог общего случая (т. е. полностью трехмерного смесового топлива), который позволяет изолировать различные физико-химические явления для их лучшего исследования и обоснования в простейшей геометрической конфигурации. Двумерный случай позволяет уменьшить или даже устранить внутреннюю нестационарность горения твердого топлива, обусловленную случайным распределением частиц по размерам, вариацией морфологии и концентрации частиц. При этом сохраняются важные характеристики явления, такие как типы и свойства компонентов топлива, размер частиц окислителя, давление, массовое соотношение компонентов, многомерный тепло- и массоперенос, неплоская поверхность горения, а также струк-

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

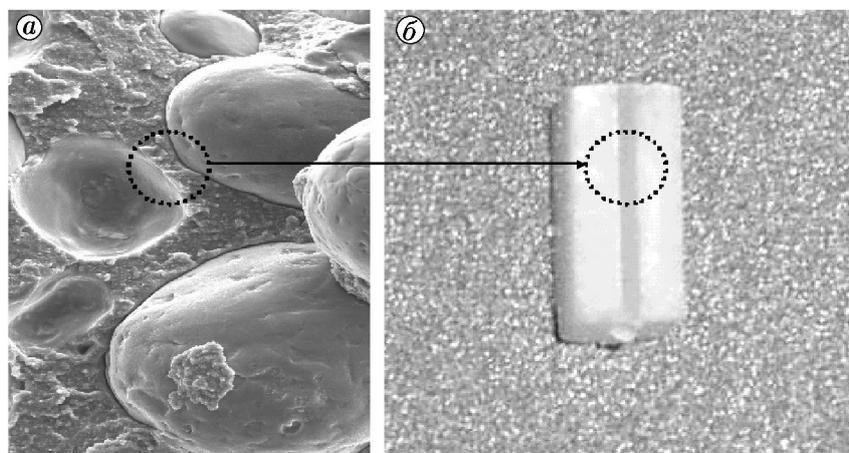


Рис. 1. Общий вид гетерогенного топлива (а) и слоевого твердого топлива (б)

тура пламени для предварительно перемешанных и неперемешанных газов. С помощью исследования слоевых топлив можно получить информацию о реакционном поведении отдельных компонентов и изучить влияние различных параметров на структуры пламени и горячей поверхности. Кроме того, такие исследования позволяют сделать множество экспериментальных наблюдений (профиль горячей поверхности, структура пламени, скорость горения и др.), которые можно использовать для проверки вычислительных моделей. В самом деле, для подтверждения модели и обоснования ее предсказательной способности необходимо проводить обширное сопоставление с имеющимися экспериментальными данными. Осторожный переход от надежных результатов, полученных в простейших случаях, к анализу более сложных случаев прокладывает дорогу к созданию усовершенствованных моделей и к окончательному решению общей проблемы.

Рис. 1 иллюстрирует возможность моделирования с помощью слоев окислителя ситуации с крупными зернами окислителя в гетерогенном твердом топливе. Толщина этих слоев соответствует примерно размеру зерен окислителя, а толщина прослойки горючего — примерно расстоянию между поверхностями зерен окислителя. Отношение толщин слоев приближенно моделирует общее соотношение компонентов в топливе. Слой горючего может также содержать малые частицы окислителя. Это позволяет моделировать присутствие малых частиц

окислителя в бимодальном или мультимодальном распределении частиц окислителя по размерам в гетерогенном твердом топливе.

Успех в понимании закономерности горения слоевых топлив был достигнут за счет удачного сочетания экспериментального и теоретического подходов. В отсутствие теоретического описания экспериментальные исследования дают лишь качественные эмпирические результаты, но не дают ответа на вопрос, почему топливо горит тем или иным образом. В то же время в отсутствие экспериментальных данных результаты аналитических и численных исследований просто не имеют достаточных оснований для подтверждения своей надежности. В историческом плане прогресс в эксперименте вел к прогрессу в теории, и наоборот, демонстрируя таким образом пользу сочетания обоих подходов. Цель настоящего обзора — теоретический анализ горения слоевого твердого топлива, или «сэндвича».

ГОРЕНИЕ СЛОЕВЫХ ТОПЛИВ

Когда слоевое топливо горит в условиях стационарной внешней среды, процесс запускается с плоской поверхности горения. Затем имеет место переходный период, за которым следует стационарное горение при условии, что слои постоянны по толщине и составу. Такая картина не наблюдается при горении смесевых топлив, постоянно подверженных в микромасштабе нестационарному горению в связи с их трехмерной структурой, случайным распреде-

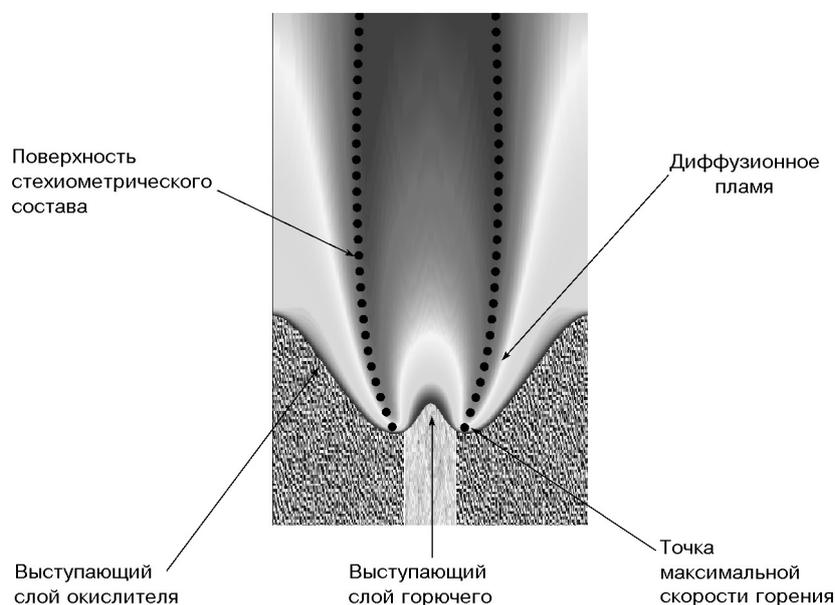


Рис. 2. Схематическое изображение горящего слоевого топлива

лением частиц по размерам и вариацией морфологии и локального соотношения компонентов; микронеустационарность горения наблюдается даже после установления стационарного горения в макромасштабе.

Подобно смесевым топливам, слоевые топлива имеют неплоский профиль горячей поверхности (рис. 2). Относительное выступание одного слоя над другим с образованием впадин и гребней определяет места максимальной и минимальной теплопередачи к горячей поверхности. В точке минимума во впадине локальная скорость горения по нормали к поверхности имеет относительный максимум, обусловленный большим теплоприходом от горячего стехиометрического диффузионного пламени вблизи этой точки. В точке максимума на гребне, который часто оказывается в центре слоя твердого горючего, локальная скорость горения по нормали к поверхности также принимает максимальное значение, но обусловлено это теплопередачей внутри конденсированной фазы к слою горючего, выступающего в роли стока тепла.

Другой фактор, существенно влияющий на относительную скорость выгорания слоев, связан с наличием пламени предварительно перемешанных газов или пламени монотоплива, характерного для энергетических материалов, способных к самостоятельному горению. Окис-

литель, перхлорат аммония (ПХА) в частности, горит самостоятельно лишь при давлениях свыше 20 атм. При давлениях меньше нижнего предела горения по давлению слоя ПХА в слоевом образце обычно оказываются выше слоев горючего, а при более высоких давлениях над поверхностью ПХА образуется пламя предварительно перемешанных газов (рис. 3), которое и ведет процесс горения слоевого топлива.

Общее массовое отношение компонентов топлива оказывает существенное влияние на результирующую структуру пламени. Слойные образцы обычно содержат избыток окислителя, что ведет к образованию бедного горючим пламени, накрывающего слой горючего. С ростом ширины слоя горючего увеличивается среднее диффузионное расстояние, которое нужно преодолеть молекулам горючего и окислителя до вступления в реакцию. В итоге поверхность стехиометрического соотношения компонентов (см. рис. 2) отодвигается дальше по потоку, увеличивая общую высоту диффузионного пламени. Следует отметить, что реальные смесевые топлива обычно богаты горючим (частично благодаря добавке алюминия) и поэтому, напротив, образуют локальные диффузионные пламена, периодически накрывающие поверхность горящих частиц окислителя. Такое различие в соотношении массовых долей компонентов необходимо иметь в виду при

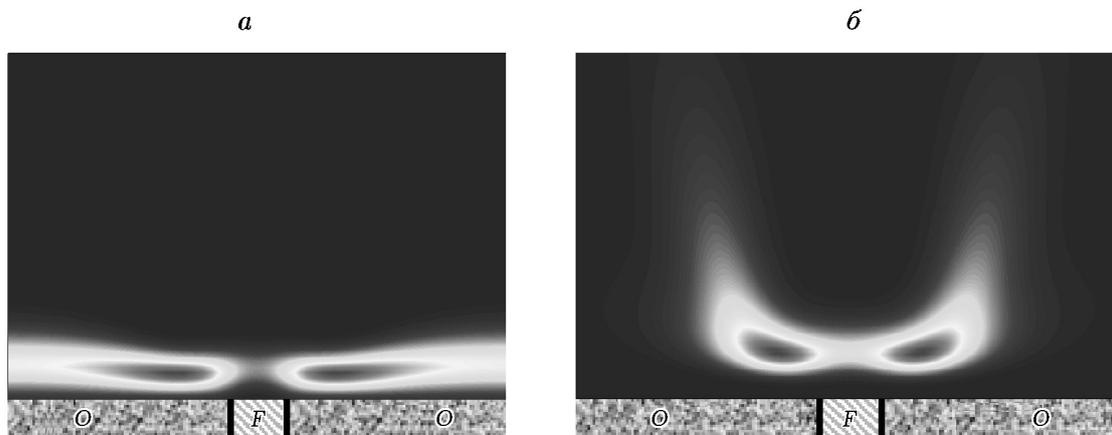


Рис. 3. Типичные распределения тепловыделения в газовой фазе:

a — пламя продуктов разложения ПХА, *б* — финальное диффузионное пламя; *O* — окислитель, *F* — горючее

анализе горения смесевых топлив, в противоположность наблюдаемому двумерному поведению слоевых образцов.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первая аналитическая модель слоевых топлив опубликована в 1960 г. [1]. Рассматривалось горение перемежающихся слоев окислителя и горючего с целью определения относительного выступления одного плоского слоя над другим. Постулировалось, что при горении один компонент будет выступать над другим в результате различия скоростей пиролиза горючего и окислителя в предположении одинаковой температуры поверхности. Был применен чрезвычайно упрощенный подход, основанный на рассмотрении уравнений неразрывности и энергии в газовой фазе в сочетании с экспериментальными «законами» пиролиза для каждого компонента. Уравнения в газовой фазе были объединены с использованием переменной Шваба — Зельдовича, а кинетика газофазных реакций исключена из рассмотрения на основе допущения, что скорости реакций значительно выше скоростей массовой диффузии. Результатом рассмотрения чисто диффузионного пламени стало пренебрежение зависимостью от давления (для скоростей реакции и горения), которая согласно экспериментальным наблюдениям имеет первостепенное значение не только для газофазных реакций, но и для разложения ПХА. Дополнительно предполагалось от-

сутствие поперечной теплопередачи в конденсированной фазе, наличие граничного условия на поверхности раздела «газ — твердое тело» в форме уравнения Дирихле. Термические характеристики в каждой фазе были осреднены, число Льюиса принято равным единице. Результаты вычислений, которые согласно [1] должны соответствовать условиям высоких давлений, свидетельствовали о монотонном увеличении скорости горения при уменьшении размера частиц. Невозможность учета в рассматриваемой теории конкуренции между пламенами предварительно перемешанных и неперемешанных газов не позволила предсказать предполагаемое снижение скорости горения при дальнейшем уменьшении размера частиц. Основные допущения модели, в особенности независимость скорости реакций от давления, обусловили значительные ограничения ее применимости. Однако она стала первым шагом в аналитическом описании горения слоевого топлива.

В работе [2] вопрос о зависимости скорости горения от давления был рассмотрен в рамках эвристического подхода к моделированию газофазного пламени над соприкасающимися слоями окислителя и горючего. В ней было правильно замечено, что теплопередача из газовой фазы в конденсированную должна обеспечить достаточно энергии для поддержания требуемой температуры поверхности и испарения реагентов. Следовательно, для точного описания горения смесевых топлив необходимо учитывать взаимодействие газовой и конденсирован-

ной фаз. В работе [2] отмечалось, что при низком давлении структура пламени соответствует таковой для пламени предварительно перемешанных газов, а тепловой поток к поверхности горения и соответственно скорость горения линейно зависят от давления, что следует из обратно пропорциональной зависимости расстояния отхода (высоты) пламени от давления. Последняя зависимость определяет поведение температурного градиента. При высоких давлениях темп расходования продуктов разложения зависит от скорости, с которой молекулы горючего и окислителя диффундируют в область, где они могут реагировать между собой. Поскольку высота диффузионного пламени не зависит от давления, результирующие тепловой поток и скорость горения, зависящая от температурного градиента, также не должны зависеть от давления. В работе [2] было верно замечено, что названная независимость параметров от давления служит главным препятствием для построения адекватной теории для скорости горения. Было постулировано, что сразу над поверхностью контакта слоев должна существовать область, в которой горючее и окислитель смешиваются и подогреваются перед началом реагирования. В этой области (названной в [2] «сердцевиной реакционной зоны») реакции не происходят вследствие недостаточно высокого уровня температуры, обусловленного соседством с относительно холодной конденсированной фазой. Пространственно эта область приобретает форму «фаланги». При этом осуществляется интенсивный нагрев твердого вещества горячими газами, что ведет к увеличению теплопередачи к поверхности в данной точке и повышению скорости горения. Теоретические построения [2] не включали рассмотрение роли отношения массовых долей горючего и окислителя и соответственно не давали объяснения боковому смещению ведущей точки пламени, которая согласно экспериментальным наблюдениям находится на стороне ПХА при использовании пластин из горючего без добавок окислителя. Тем не менее модель объяснила множество наблюдаемых закономерностей, в том числе обратно пропорциональную зависимость скорости горения от толщины слоя как результат увеличения общего теплового потока, обусловленного уменьшением длины смещения компонентов. Было сформулировано выражение для скорости горения в виде зависимости от температуры пламени, темпе-

ратуры поверхности, размеров реакционной зоны и разности энтальпий конденсированной и газовой фаз. На основе расчетов по модели было дано реалистичное объяснение, подобное ранее предложенному в рамках гранулярной диффузионной модели Саммерфильда [3], существованию меньшего единицы показателя степени при давлении в законе скорости горения. Были также предложены качественные описания эффекта самостоятельного горения окислителя и различия скоростей пиролиза компонентов топлива. В то же время конкуренция между пламенем монотоплива ПХА и диффузионным «фаланговым» пламенем не была рассмотрена в теоретическом анализе.

В работе [4] развита модель для описания процесса горения в окрестности поверхности контакта полубесконечных пластин горючего и окислителя. Расчеты по модели сопоставлены с собственными результатами измерений профиля горячей поверхности как функции давления и скорости горения. В теоретическом анализе использовано предположение о стационарности процесса; симметричные относительно границы раздела пластин профили получены при допущении равенства термических характеристик компонентов слоевой системы. Считалось, что чисто диффузионное пламя возникает в некоторой «критической» точке над поверхностью раздела слоев и имеет место до внешней границы. В зоне между поверхностью и «критической» точкой существует пламя предварительно перемешанных газов, моделируемое в предположении о доминирующем влиянии теплопотерь в холодные соприкасающиеся слои и о притоке «холодных» реагентов. Автомодельное решение было получено для профилей температуры в конденсированной и газовой фазах для пламени с лимитируемой диффузией реакционной зоной. При этом предполагалось, что продольная теплопередача пренебрежимо мала по сравнению с поперечной (вдали от кончика пламени). Поскольку это условие не выполняется в вершине (кончике) диффузионного пламени и вблизи поверхности, в этой области было предложено решение другого типа. Константы интегрирования были определены с использованием интегрального соотношения для окрестности поверхностной зоны и условий на бесконечности, а затем получены тепловые и геометрические профили в виде функции от скорости горения. Значение скорости горения не задавалось априори, а получалось из связи

между критическим вдувом массы в диффузионное пламя (в соответствии с подходом Шваба — Зельдовича) и аррениусовской скоростью реакции, рассчитанной по температуре пламени. Прямые количественные сравнения расчетных и экспериментальных профилей, сделанные в [4] для различных скоростей горения слоевых топлив на основе полиметилметакрилата (ПММА), дали удивительно близкие результаты, если учесть, каким упрощающим предположением они соответствуют. Общая тенденция углубления и сужения впадины на месте раздела слоев с увеличением давления была подтверждена теоретически. Расчеты ширины реакционной зоны показали, что увеличение толщины слоев свыше величины протяженности реакционной зоны перестает оказывать влияние на профиль горячей поверхности и скорость горения. Асимметрия профиля поверхности была объяснена с учетом различия теплот газификации компонентов. Например, относительно низкая теплота газификации перхлората калия обуславливает меньшую ширину впадины на слое окислителя (измеренную как расстояние от поверхности раздела слоев до поверхности окислителя), чем на слое горючего. Наряду с рассмотрением структуры пламени как предварительно перемешанных, так и неперемешанных газов, авторы [4] сделали плодотворную попытку обосновать теоретическую модель сравнением с имеющимися экспериментальными данными по профилям горячей поверхности.

Аналитическое решение для скорости горения смесового топлива, полученное в [5] для упрощенного одномерного случая, хотя и не имело непосредственного отношения к проблеме горения слоевых систем, в идейном отношении оказало существенное влияние на многочисленные последующие попытки моделирования горения слоевых топлив. В работе [5] существенное внимание было уделено влиянию конкуренции кинетики химических реакций и диффузии на структуры пламени предварительно перемешанных и неперемешанных газов. Рассмотрены три типа пламени. Первое суть кинетически контролируемое пламя предварительно перемешанных газов, продуктов разложения ПХА. Это — монотопливное пламя ПХА. Второе постулируется как гибридное «первичное» диффузионное пламя, зависящее как от смешения, так и от кинетики реагирования. Оно образуется за счет взаимодействия богатых кис-

лородом продуктов разложения ПХА и продуктов пиролиза горючего. Наконец, «конечное» пламя представляет собой пламя продуктов газификации горючего и окислителя чисто диффузионного типа. При высоких давлениях, когда реакция идут с большой скоростью, пламя монотоплива доминирует, а два других пламени имеют меньшее значение. Включение этих теоретических представлений в одномерную модель [5] обеспечило прекрасные результаты по предсказанию скорости горения, а также различных качественных характеристик процесса, как, например, влияние размера частиц и их концентрации, а также зависимость скорости горения от давления.

В аналитическом исследовании [6] сделана попытка предсказать форму профиля горячей поверхности и скорость горения полубесконечных слоев горючего и окислителя с учетом самостоятельного горения окислителя. Основываясь на имеющихся экспериментальных данных, свидетельствующих о приблизительном равенстве скоростей горения слоевых топлив и чистого ПХА (при давлении $20 \div 100$ атм), автор [6] постулировал весьма слабое влияние связующего на горение. Соответственно предполагалось, что реакции горючее — окислитель имеют «пренебрежимо малую скорость» в согласии с гипотезой, что диффузионное пламя «расположено недостаточно близко к поверхности раздела слоев, чтобы играть заметную роль в процессе горения». Однако эти построения оказались в серьезном противоречии с экспериментальными результатами [4, 7], которые свидетельствовали о сильном влиянии процессов в газе вблизи поверхности на общую картину горения смесовой системы. В более поздней экспериментальной работе [8] было точно установлено, что диффузионное пламя горючее — окислитель действительно локализуется близко к поверхности горения и точек максимальной скорости выгорания.

Возвращаясь снова к работе [6], отметим, что в ней было получено стационарное решение для температурных полей в конденсированной и газовой фазах, рассчитаны геометрия поверхности и скорость горения (как собственное значение задачи). Кроме того, в ней впервые получено асимптотическое решение для окрестности слоя ПХА, расположенного вдали от поверхности раздела слоев. Это решение основано на модели Гайрао и Вильямса [9] для горения чистого ПХА. Решение для окрестности

вблизи поверхности раздела слоев получено методом линейных возмущений с учетом влияния слоя связующего. Результаты расчетов показали, что вдали от поверхности раздела ПХА выгорает в основном «плоским» образом, с малым отклонением от горизонтали. В то же время было предсказано, что вблизи поверхности раздела на стороне слоя горючего имеется переходная область с почти вертикальным наклоном поверхности в точке контакта слоев. Согласно расчетам эта область очень узкая и ее протяженность составляет всего несколько микрометров. Теоретические расчеты показали, что скорость горения слоевого топлива не зависит от типа связующего и лишь немного отличается от скорости горения ПХА. Форма поверхности горения слабо зависит от давления. Теория также предсказывала наличие сравнительно небольшого потока тепла в конденсированной фазе от слоя горючего к окислителю. Этот результат оказался в сильном противоречии с многочисленными экспериментальными данными. Считалось, что сделанные в [6] теоретические предсказания верны для горения образцов с неплавящимся, «сухим» горючим, а наблюдаемые отличия между результатами расчетов и экспериментов были приписаны доминирующему влиянию потока расплавленного горючего на форму поверхности горения реальных слоевых образцов. Следует заметить, что если даже пренебрежение движением расплавленного горючего в теоретическом анализе и могло привести к некоторому различию теоретической и экспериментально регистрируемой информации, то, по-видимому, большее значение могло иметь отсутствие анализа конкуренции между пламенем перемешанных газов и расположенным вблизи поверхности диффузионным пламенем. Тем не менее, комплексный подход [6] к моделированию неплюской поверхности горения сэндвича с априорным предсказанием собственного значения скорости горения на основе анализа самораспространяющегося горения ПХА в целом имел положительное значение.

В работе [10] развита квазидвумерная модель горения гетерогенных топлив, в которой использовалось поперечное пространственное осреднение параметров по слоям горючего и окислителя. Газовая и конденсированная фазы сопряжены на плоской поверхности горения, на которой только и происходили химические реакции и выделялось тепло. Реакции в газо-

вой фазе не учитывались; не учитывалось также тепловыделение в окрестности контакта горючее — окислитель. Реакции на поверхности включали окисление и разложение горючего, а также термораспад и сублимацию окислителя. В модели учитывалось, что поперечные конвективные потоки массы и тепла происходят вблизи поверхности контакта слоев окислителя и горючего как в конденсированной, так и в газовой фазе, при этом использовались осредненные расчетные значения числа Нуссельта. Для продуктов разложения горючего и окислителя были приняты различные значения температур, но обоснование этого не приведено. Были также сделаны типичные предположения о равенстве числа Льюиса единице и равенстве плотностей горючего и окислителя. С помощью упрощений получены линейные дифференциальные уравнения, решения которых найдены интегрированием и представлены в виде набора трансцендентных уравнений. Найденные в итоге стационарные распределения компонентов в газовой фазе и температур трактовались как соответствующие случаю почти «гомогенизированных топлив» (случай очень тонких слоев).

Согласно результатам расчетов [10] скорость горения вначале увеличивается, а затем понижается при увеличении общей толщины слоев, что получило название «первая аномальная ветвь» (решения), поскольку эта тенденция противоречила экспериментальным наблюдениям, свидетельствующим о снижении скорости горения с ростом толщины слоя горючего. В экспериментах было замечено, что при увеличении толщины слоя горючего температура на его поверхности ниже температуры поверхности окислителя. Когда общая толщина слоевого образца устремлялась в расчете к бесконечности, скорость горения соответствовала скорости самостоятельного горения ПХА, поскольку отсутствовала возможность для продуктов разложения ПХА достичь горючего путем диффузии. Это получило название «вторая аномальная ветвь» (решения). Зависимость скорости горения от давления согласно расчетам [10] имеет участки с нулевым и отрицательным наклонами. При уменьшении толщины слоя на этой зависимости наблюдались менее протяженные участки с нулевым наклоном и при более высоких давлениях. Если уменьшить тепловыделение при реагировании окислителя, общая зависимость скорости горе-

ния от давления становится более пологой, но участки с нулевой зависимостью от давления практически исчезают. Хотя обсуждаемая модель и демонстрирует легко трактуемый метод решения, принятые в ней допущения, особенно сведение всей химии к поверхностным реакциям, существенно ограничивают область применимости результатов расчетов.

В качестве дополнения к экспериментальным исследованиям, выполненным с помощью масс-спектрометрии, в работе [11] сформулирована численная модель на основе кинетической схемы, состоящей из 58 реакций и включающей 35 химических компонентов. Схема моделировала горение гомогенизированного топлива, содержащего ПХА и полибутADIеновое связующее (с неизвестными концевыми группами). Модель базируется на уравнениях Навье — Стокса, упрощенных с использованием допущения о нулевом значении числа Маха. Поскольку анализ процессов в конденсированной фазе не проводился, граничные условия для скорости движения поверхности, ее геометрии и значений температуры назначались, после чего определялись соответствующие профили в газовой фазе. Для газовой фазы применялась кинетическая модель, близко соответствующая модели Бекстеда — Дерра — Прайса [5]. Экспериментальные данные использовались для выбора параметров реакции на поверхности горения и в первичном диффузионном пламени (прямые реакции между газообразными продуктами разложения горючего и окислителя). В то же время предэкспонент для реакции в конечном диффузионном пламени (реакция между CO и O_2) варьировался с целью определения влияния этого фактора. В результате были получены стационарные решения для полей температуры и скорости газа с использованием неявной разностной схемы и метода искусственной сжимаемости.

В работе [11] теоретически показано, что при горении слоевого образца «ПХА — чистое горючее» при давлении 0.26 атм максимальный градиент температуры в газе реализуется у поверхности образца и расположен на стороне горючего. Температура на поверхности горючего обычно выбиралась ниже, чем на поверхности окислителя, играя роль стока тепла, как следовало из экспериментальных данных. Разумное согласие между измеренными и рассчитанными профилями температуры в газе было получено при использовании самых больших зна-

чений предэкспонента для реакции в конечном диффузионном пламени. Было предсказано существование широкой зоны предварительно перемешанных газов над поверхностью, характеризующейся низкими температурами, в согласии с имеющимися экспериментальными данными.

Проводилось также моделирование горения при давлении 40 атм слоевого образца с горючим, содержащим окислитель. В связи с отсутствием данных по температуре поверхности и кинетике реакций при повышенных давлениях в расчетах использовались данные для субатмосферных давлений. Теоретический анализ предсказывал большие значения градиентов температур вблизи и выше точки максимальной скорости выгорания конденсированной фазы, однако надежность этих результатов остается под вопросом в связи с произвольной экстраполяцией кинетической информации на высокие давления. Результаты расчетов как для осесимметричного, так и для плоскопараллельного случая оказались одинаковыми. Достоинством этой работы было двумерное моделирование конкурирующих пламен перемешанных и неперемешанных газов с использованием экспериментальных данных по детальной кинетике при горении слоевых образцов.

Важный вклад в теоретические исследования сделан в работе [12], в которой изучалось влияние использования конечных значений чисел Рейнольдса и Пекле в граничных условиях при решении классической задачи Бурке — Шумана [13]. В ранних исследованиях обычно принималось, что массовая доля горючего равна 1 на поверхности связующего (горючего) и 0 на поверхности окислителя. Такие граничные условия типа Дирихле подразумевают существование «чистых» потоков при наличии интенсивной конвекции и нулевой обратной диффузии (бесконечное значение числа Пекле). Вместо этого граничного условия в работе [12] предложено другое, основанное на законе сохранения массы компонентов на поверхности раздела фаз. Соответствующие граничные условия и дифференциальные уравнения решались численно. Из расчетов следовало, что в предельном случае очень больших чисел Рейнольдса (свыше 100) поток превращается в «чистый» и граничное условие типа Дирихле применимо. Однако при низких числах Рейнольдса становится заметным вклад обратной диффузии и граничное условие для «чи-

стых» потоков использовать нельзя. Результирующая доля массы горючего принимает значения меньше 1 на границе «твердое горючее — газ» и больше нуля на границе раздела «твердый окислитель — газ». Утверждается, что эти условия обязательно выполняются, если поверхность горения представляет собой поверхность раздела фаз между твердым или жидким веществом и газом.

Из результатов [12] вытекает, что газовое диффузионное пламя, локализованное близко от поверхности горения содержащих ПХА твердых топлив, будет «усиливаться за счет присутствия продуктов разложения горючего и, следовательно, будут достигаться более высокие температуры на конце этого пламени». В итоге температура пламени и результирующий поток тепла оказываются в сильной зависимости от концентрации горючего и окислителя на поверхности. Для горящих твердых смесевых топлив этот эффект проявляется в основном за счет испарения компонентов на поверхности горения; концентрационная и тепловая диффузия приобретают исключительное значение, что проявляется в величине числа Пекле, которое имеет теперь порядок 1, а не бесконечности. Такое граничное условие ранее не рассматривалось.

Названные выше результаты были включены в новую модель горения гетерогенного топлива [14], в рамках которой исследовалось влияние потоков компонентов и тепловой диффузии в ячейках, образованных частицами разного размера. Мелкие частицы ПХА принимались настолько малыми, чтобы связующее с их включением рассматривать как однородный материал и не учитывать разницу температур компонентов и сколь-нибудь заметную диффузию внутри такой системы. Крупные и среднего размера частицы ПХА помещались в центр единичной ячейки, что позволяло рассматривать слоевую систему с цилиндрической сердцевинкой, состоящей из окислителя, которая окружена связующим. Поверхность раздела твердое — газ считалась неплоской. Предполагалось, что реакции в газовой фазе идут с бесконечной скоростью, поэтому можно было анализировать только чисто диффузионное пламя, избегая рассмотрения конкуренции между пламенами перемешанных и непемешанных газов. Предполагалось также, что поток продуктов реакции с поверхности стационарный и ламинарный, коэффициенты диффу-

зии для газовых молекул горючего и окислителя равны друг другу, а число Шмидта равно 0.7. Учитывались боковая теплопередача и кривизна неплоской горячей поверхности. И наконец, было учтено влияние конечной величины числа Пекле, как описано выше, путем записи на границе контакта «конденсированная фаза — газ» граничного условия для потока концентраций компонентов (в противоположность условию Дирихле).

Сформулированная выше задача была численно решена в цилиндрических координатах, что позволило определить поля скоростей газового потока и концентраций компонентов для каждой единичной ячейки как функции скорости горения и геометрии поверхности. Последние величины были взяты из экспериментальных авторских данных, полученных в зависимости от давления. Расчеты показали, что значительные количества продуктов пиролиза связующего диффундируют в центральную часть потока над поверхностью частиц ПХА среднего размера. Аналогичное поведение наблюдалось для крупных частиц ПХА, но в меньшей степени. Было сделано заключение, что частицы средних размеров не горят с образованием монотопливного пламени, как это происходит с крупными частицами при высоком давлении. Процессы диффузии вблизи поверхности, как было найдено, оказывают сильное влияние на горение смесевых топлив на основе ПХА, что согласуется с многочисленными экспериментами. Сделан вывод, что суммарная скорость горения контролируется скоростью горения частиц ПХА средних размеров и горючего с включением мелких частиц.

Одна из первых попыток полностью численного моделирования горения гетерогенных топлив предпринята в работе [15]. В дополнение к исследованию «сандвичевой» геометрии в работе изучалось поперечное сечение топлива, содержащего сферические частицы окислителя. Для моделирования горения использовались нестационарные двумерные уравнения, описывающие процессы в конденсированной и газовой фазах. Была реализована неподвижная координатная сетка, каждая ячейка которой соответствовала или окислителю, или горючему либо газу. Ячейка превращалась в «газовую», как только окислитель или горючее в ней полностью расходовались в процессе горения. Реакционная схема включала 1) пиролиз связующего, 2) диссоциацию окислителя, 3) реакцию

в конденсированной фазе горючего с продуктами диссоциации окислителя, 4) пламя предварительно перемешанных газов окислителя (монотопливная реакция), 5) первичное диффузионное пламя между продуктами пиролиза связующего и диссоциации окислителя. Предполагалось, что в конденсированной фазе теплофизические свойства одинаковы по всему объему. Жидкое и расплавленное состояния не рассматривались, поперечными скоростями в газе пренебрегали. Путем решения уравнений сохранения массы и энергии с учетом кинетики химических реакций получены зависящие от времени зависимости для мольных долей газовых компонентов, температуры и профилей поверхности горения. В качестве входных данных для расчетов принимались давление, начальная температура и массовое соотношение между горючим и окислителем, а также характерный размер, представляющий общую толщину слоевой системы, чтобы исследовать тенденции поведения скорости горения, профиля горячей поверхности и тепловыделения в газовой фазе.

Расчеты, проведенные в [15], предсказывали, что температура на поверхности горючего выше, чем на поверхности окислителя, что подразумевало наличие теплового потока из слоя горючего в слой окислителя. Последнее противоречило экспериментальным наблюдениям. Объяснение было дано с точки зрения относительно низкой теплоты пиролиза горючего, принятой в расчетах, но это могло быть и следствием использования одинаковых теплофизических характеристик для горючего и окислителя. Расчетные температуры поверхности оказались выше в случае задачи со сферическими частицами окислителя, нежели для «сандвичевой» геометрии. Это можно объяснить увеличением поверхности контакта горючее — окислитель, что приводило к более интенсивному смешению компонентов и повышению роли первичного диффузионного пламени. В целом поверхность монотопливного пламени была много меньше поверхности первичного пламени, как это следовало из распределения концентрации реагирующих компонентов в локальных областях газовой фазы. Максимальные высоты монотопливного и диффузионного пламен составили 40 и 50 мкм соответственно. Профиль горячей поверхности изменялся во времени от первоначально плоского до неровного, с впадинами или «желобами» на поверхности контакта слоев горючего и окисли-

теля, что свидетельствовало о доминирующей роли диффузионного пламени. Скорости горения, как найдено в расчетах, увеличивались с ростом давления и отличались не более чем на 20 % от экспериментальных значений в диапазоне 4 ÷ 9 МПа. В то же время скорость горения слоевого образца уменьшалась при увеличении избытка окислителя и приближалась к скорости горения чистого ПХА. Наконец, было обнаружено, что уменьшение характерного размера (толщины слоя) ведет к монотонному увеличению скорости горения, вплоть до толщины 80 мкм. Работа [15] представляла уникальную попытку описать неровности поверхности горения и их влияние на характеристики процесса с использованием численных расчетов.

В работе [16] представлено «элементарное обсуждение геометрии пламени твердого топлива», основанное на результатах [12], устанавливающих связь между граничными потоковыми условиями и конечным значением числа Пекле. В этом «обсуждении» пересмотрено классическое решение задачи Бурке — Шумана в стиле работы [12] и продемонстрировано, что «виртуальное (диффузионное) пламя», реализуемое на поверхности стехиометрического соотношения реагирующих компонентов, находится не над поверхностью контакта слоев горючего и окислителя. Этот результат оказался в противоречии с результатами многочисленных теоретических работ, в которых принятие граничного условия на поверхности типа Дирихле приводило к установлению вершины «стехиометрического» пламени прямо над границей контакта горючее — окислитель. В работе [16] также было продемонстрировано изменение размеров и геометрии «виртуального пламени» при вариации числа Пекле. При доминировании конвективного переноса и числе Пекле больше 1 высота пламени увеличивается, а при малых числах Пекле пламя устанавливается ближе к поверхности и уширяется (т. е. нависает над слоями компонентов). Для случаев слоевой цилиндрической геометрии независимо от материала центрального слоя (горючее или окислитель) показано, что существует минимальное значение числа Пекле, при котором не могут проходить диффузионно контролируемые реакции, поскольку поверхность стехиометрического уровня не может образоваться в газе над конденсированной фазой. Установив, что при заданном числе Пекле высота пламени гораздо больше в случае, когда централь-

ный слой выполнен из горючего, авторы [16] показали более высокую склонность к погасанию при низких числах Пекле слоевого образца с центральным ядром, состоящим из окислителя. Этот результат имеет большое значение и должен учитываться, когда данные анализа горения слоевых образцов, обычно содержащих избыток окислителя, используют для анализа горения твердых топлив с избытком горючего. В последнем случае диффузионные пламена накрывают крупные частицы окислителя.

Численное исследование нестационарных температурных и концентрационных полей в газовой фазе, связанных с конденсированной фазой посредством закона поверхностного пиролиза, проведено в [17]. В этой работе использовалась упрощенная кинетика химических реакций, с помощью которой в рамках подхода [5] были рассчитаны пламя разложения ПХА и финальное пламя топлива. Авторы [17] сформулировали утверждение о малой значимости «первичного диффузионного пламени». Они заявили, что это положение давно обсуждается в литературе, но подтверждающих ссылок не представили. Анализ процессов в газовой фазе был проведен [17] как в рамках полной системы уравнений Навье — Стокса с включением боковых скоростей газа, так и в рамках подхода Озеена, в котором пренебрегаются гидродинамические эффекты за счет переменной плотности. Теплопередача в конденсированной фазе была учтена, но нижний предел горения по давлению для чистого ПХА не моделировался. Это ограничивает применимость результатов теории областью давлений не ниже 20 атм. Как и во многих других моделях, плавление связующего и влияние излучения не учитывались. Зато достоин внимания учет некоторых усложняющих деталей, в частности рассмотрение неплоской поверхности горения и температурной зависимости транспортных свойств в газовой фазе отдельно для каждого компонента.

Один из наиболее важных результатов выполненного анализа заключался в установлении факта, что использование полной гидродинамической постановки задачи (в форме Навье — Стокса) лишь слабо изменяет значения скоростей горения и тепловыделения, а также форму поверхности по сравнению с результатами, полученными в приближении Озеена. Это служит оправданием использования менее трудоемких вычислений на базе допущения о по-

стоянной плотности газа. Авторы [17] также указали, что допущение о высокой энергии активации скорее ведет к тому, что температура поверхности компонента определяется скоростью его выгорания, а не наоборот. Было показано, что расчетные скорости горения увеличиваются с ростом числа Дамкеллера для финального диффузионного пламени и, следовательно, можно подобрать его значение для согласования с экспериментальными данными (хотя в действительности это сделано не было). Из анализа геометрии структуры пламени следовало, что зона тепловыделения в монотопливном пламени ПХА параллельна горячей поверхности, а диффузионное пламя сосредоточено вблизи поверхности контакта слоев и наклонено по направлению к слою ПХА (рис. 3 показывает типичные распределения тепловыделения для различных вычислительных моделей). Влияние размера частиц было изучено с помощью вариации числа Пекле. Его уменьшение ведет к увеличению скорости горения в связи с уменьшением масштабной длины диффузии. Поскольку тенденции изменения скорости горения не были непосредственно проанализированы с точки зрения влияния толщины слоя связующего, оказалось невозможным установить, насколько надежно моделируются конкурирующие эффекты массового соотношения компонентов. Известно, что, согласно экспериментальным данным, с уменьшением толщины слоя горючего скорость горения растет и достигает максимума, а затем снижается. На самом деле модель продемонстрировала лишь увеличение интенсивности смешивания реагентов с уменьшением характерной длины.

В работе [17] проводилось исследование влияния относительной доли тепловыделения в поверхностном слое и в газовой фазе на процесс разложения ПХА. Сделав допущение об экзотермическом разложении ПХА в конденсированной фазе (вместо эндотермической диссоциации) и соответственно уменьшив тепловыделение в газовой фазе, авторы получили данные о количественном эффекте. Так, при наличии экзотермических реакций в конденсированной фазе скорость горения возросла примерно на 29 %, при этом профиль поверхности ПХА стал более плоским, а выступание слоя связующего увеличилось. Влияние массового отношения компонентов было продемонстрировано на примере резкого снижения скорости горения для слоевого образца, обедненного горю-

чим (отношение окислителя к горючему больше 0.9 в сравнении со стехиометрией). Авторы постулировали, что такая сильная зависимость от локального отношения массовых долей компонентов, вероятно, обуславливает появление больших неровностей на поверхности горения реальных топлив. Согласно расчетам закон скорости горения имел степенную зависимость от давления с показателем степени при давлении, равным 0.6. На графике зависимости можно было заметить резкое уменьшение этого показателя при давлениях свыше 20 атм, тогда как в эксперименте наблюдалось увеличение показателя при переходе через этот уровень давления.

Авторы [17] не проводили прямого сравнения теоретических и экспериментальных данных из-за «трудностей задания боковых граничных условий». Отмечая отсутствие экспериментальных данных по горению многослойных сэндвичей и малую ценность экспериментов с однослойными образцами, для которых отсутствуют симметричные граничные условия, авторы главным образом обращались к неоднородным эффектам для описания общих черт поведения горящего топлива.

Кинетическая схема [11] была использована в [18] при построении двумерной нестационарной модели горения слоевых топлив. Представляя пламя разложения ПХА, первичное и финальное диффузионные пламена с помощью трех глобальных реакций и 8 компонентов, авторы [18] провели расчеты с целью предсказания скорости горения, температуры поверхности и температуры в газовой фазе, а также полей скоростей газа при давлениях 40, 60 и 80 атм. Использовалась полная система уравнений Навье — Стокса при допущении пренебрежимо малой сжимаемости среды (число Маха равно примерно нулю). Связь между конденсированной и газовой фазами осуществлялась через законы пиролиза для горючего и окислителя. Теплопередача в конденсированной фазе описывалась вначале с использованием условия «поверхностного переноса», которое трактуется перенос тепла между изотермическими слоями, а затем был проведен анализ температурного поля в твердом теле на основе двумерной теплопроводности с целью обоснования упрощенного подхода с «поверхностным переносом». В то же время использование представлений об идеально плоской поверхности горения и граничных условий типа Дирихле для

реагентов на поверхности горения заставляет сомневаться в предсказательной силе результатов, несмотря на очень строгое математическое описание других деталей процесса.

Для решения задачи о распределении энергии и о концентрационных и газодинамических полях в работе [18] использовалась конечно-разностная схема 2-го порядка. Для связующего и окислителя были выбраны зависящие от температуры и давления свойства, присутствующие НТРВ (полибутадиеи с концевыми гидроксильными группами) и ПХА. Расчет скоростей горения показал, что средняя скорость горения имеет промежуточное значение между скоростями горения слоев горючего и окислителя, причем скорость горения связующего была наименьшей. Утверждалось, что тенденции изменения скорости горения соответствовали экспериментальным данным [19], однако результаты сравнений приведены не были. Показатель в степенном законе горения изменялся в пределах $0.4 \div 0.68$, что действительно хорошо соответствовало экспериментальным зависимостям. Температура поверхности связующего варьировалась в пределах $670 \div 1130$ К, а поверхности ПХА — в пределах $800 \div 900$ К. Максимальная температура пламени изменялась от 1350 до 2020 К, что соответствует нижней границе известных в литературе значений для гомогенных смесей ПХА и НТРВ. Скорость горения, как было обнаружено, резко снижается с уменьшением массового отношения компонентов (или доли окислителя).

Расчеты [18] структуры газофазного пламени показали, что тепловыделение обычно локализуется в зоне над поверхностью контакта горючее — окислитель. Изотермы в газовой фазе располагаются более густо вблизи горячей поверхности при повышенных давлениях, отражая факт увеличения теплового потока с приближением диффузионного пламени к поверхности. Максимальные концентрации NH_3 и HClO_4 находятся вблизи горячей поверхности. Уменьшение массовой доли окислителя вплоть до достижения условий сильно обогащенного горючим состава топлива вело к снижению тепловыделения и появлению вихревой возвратной зоны в газовой фазе, как следствие низкой интенсивности газовой фазы с поверхности связующего. В таких условиях горения наблюдалось протяженное пламя (вдали от поверхности концентрации продуктов разложения были выше, чем в случае «бедного»

пламени).

Были также проведены дополнительные исследования по изучению влияния на горение объемного поглощения энергии излучения и большой величины массовых сил. Скорость горения предсказуемо увеличилась при действии дополнительного теплового потока. Результаты расчетов по влиянию сильных гравитационных полей (100 ускорений силы тяжести) оказались неокончательными. Расчетные отклики скорости горения на периодические возмущения давления имели слабое запаздывание при частотах 600 и 1200 Гц. Приведено слишком мало результатов для варьируемой толщины слоев, что не позволяет оценить возможности принятой модели для описания конкуренции пламен перемешанных и неперемешанных газов. В целом, требуется провести больше прямых сравнений с экспериментальными данными для того, чтобы обосновать модель [18] и продемонстрировать ее предсказательные возможности.

В работе [20], которая оказалась первой в серии теоретических исследований авторов данного обзора, были рассмотрены три отдельные задачи, чтобы продемонстрировать возможность расчета скорости горения как собственного значения в рамках двумерного анализа полностью связанной конденсированной и газовой фаз. Первая задача связана с анализом газофазных процессов на основе подхода Шваба — Зельдовича. При этом использовались симметричные боковые граничные условия, а не условия для полубесконечных слоев. В соответствии с результатами предшествующих работ найдено, что с увеличением числа Пекле расстояние отхода (высота) пламени растет. Значение соответствующего погасанию числа Пекле, как было показано, возрастает по мере уменьшения массовой доли окислителя и соответствующего обогащения смеси горючим компонентом.

Вторая задача заключалась в анализе энергетического обмена газ — твердое при заданных массовом потоке или числе Пекле. Поскольку подход Шваба — Зельдовича перестает работать при включении в анализ конденсированной фазы, необходимо было сделать определенное допущение, чтобы подойти к достижению провозглашенной цели: определение величины скорости горения как собственного значения. В соответствии с результатами, полученными при исследовании богатых горючим

монотоплив типа октогена [21], была использована сильно упрощенная кинетическая модель с низкой энергией активации, основанная на представлениях о зависимости скорости реакции от массовой доли промежуточных продуктов разложения окислителя по первому порядку и от давления по второму порядку (что соответствует бимолекулярным реакциям). Это подразумевало протекание в зоне вблизи поверхности радикальных цепных реакций, а не реакций термораспада. В итоге концентрация компонентов становится неконсервативным скаляром. Тонкая зона пламени, соответствующая ситуации с высокой энергией активации, более не существует, и результаты расчетов соответствуют наличию широкой зоны тепловыделения в газовой фазе. Решение для распределения температуры в обеих фазах удалось получить в виде зависимости от доли твердого окислителя и числа Пекле, при этом уравнения в газовой фазе были связаны с уравнением переноса энергии в конденсированной фазе с использованием асимптотик для энергии активации. Было показано, что температура на поверхности связующего понижена по сравнению с ПХА, что согласуется с выводами предыдущих работ, гласящими, что слой горючего играет роль стока тепла. При увеличении доли окислителя до 1 (чистый ПХА) результаты расчетов сводились к ранее полученному решению для монотопливного горения.

Третья задача [20] включала анализ связи внешнего температурного профиля (в газе) из предыдущей задачи с распределением температуры внутри конденсированной фазы при использовании дополнительных асимптотик по энергии активации и представления о промежуточном слое на реагирующей поверхности. Решение было получено с помощью итераций температуры и скорости горения, пока средний остаток не снижался до нуля. В связи с ограниченной природой сделанных допущений результаты расчетов не сравнивались с экспериментальными данными, тем не менее ряд тенденций удалось заметить.

Как ранее было определено в экспериментах, температура поверхности окислителя превышает таковую для связующего. Значения числа Пекле (и безразмерной скорости горения) ограничены в расчетах относительно малым диапазоном вариаций из-за особенностей асимптотического анализа по энергии активации термического разложения конденсиро-

ванной фазы. Другими словами, поверхностное разложение гетерогенного горючего сильно лимитирует величину скорости горения. Было также показано, что относительно малое значение числа Пекле, характеризующее слабой конвекцией и сильной диффузией, может приводить к достижению предела горения топлива из-за обогащения окислителем. Это наблюдалось в экспериментах при горении сэндвичей с клиновидным (с уменьшением ширины по мере сгорания образца) слоем связующего [19]. Согласно расчетам при малых числах Пекле тепловыделение в газе над поверхностью было более однородным и располагалось ближе к поверхности. Это соответствовало экспериментальным данным, согласно которым при малых числах Пекле горящая поверхность была плоской, при этом масштабы времен диффузии более чем на порядок превышали масштабы времен конвекции.

В работе [20] сообщалось о значительных трудностях, возникающих при итерационных вычислениях скорости горения и температур. Как показали расчеты, температура поверхности понижалась при увеличении числа Пекле в противоречии с экспериментальными результатами. Это вероятнее всего происходило за счет того, что в расчетах использовалась плоская поверхность горения. Было признано, что результаты этого анализа еще невозможно сравнивать с экспериментом. Однако при этом все же удалось достичь успеха в демонстрации возможностей отыскания величины скорости горения как собственного значения задачи о горении гетерогенных слоевых топлив в двумерной постановке при использовании данных о тепловых и транспортных свойствах веществ и о кинетических параметрах реакций.

В расширенном численном исследовании газофазных реакций [22] те же авторы применили собственный метод анализа на основе вариации числа Пекле к процессам тепловыделения в газовой фазе, а также провели исследования контура горячей поверхности. Двухстадийная кинетическая схема для газофазных реакций описывала пламя перемешанных газов разложения окислителя (с низкой энергией активации) и вторичное диффузионное пламя (с высокой энергией активации), образованное за счет реагирования продуктов разложения горючего и окислителя. Были рассчитаны числа Пекле (безразмерная скорость горения) и Дамкеллера (безразмерная скорость ре-

акции) и исследованы пространственные распределения результирующего тепловыделения в газовой фазе. Последние были инвертированы для исследования возможной корреляции между предполагаемой формой поверхности, построенной на основе анализа функции тепловыделения, и экспериментально определенной [22] формой поверхности слоевого топлива (ПХА/НТРВ). При низких значениях чисел Пекле и Дамкеллера зона тепловыделения сливалась с почти плоской расчетной (предполагаемой) поверхностью, что близко соответствовало экспериментальным данным, полученным при низком давлении и малых толщинах связующего. По мере увеличения числа Дамкеллера скорость реакции становилась более высокой и зона реакции образовывала ветви на обеих сторонах центральной пластины горючего. Рассчитанный профиль поверхности включал выступающий слой горючего с локальными точками максимального выгорания на стороне окислителя сбоку от поверхности контакта слоев. Расчетные результаты оказались в согласии с данными по профилям пламени и горячей поверхности при высоком давлении и больших толщинах слоя горючего. Несмотря на то, что это исследование было ограничено поиском соответствия между профилями тепловыделения и поверхности горения, оно представляло шаг вперед к созданию полностью определенной численной модели горения гетерогенного слоевого топлива.

Такая модель опубликована в работе [23]. В ней анализ газофазных процессов связан с анализом процессов в конденсированной фазе и получены решения для стационарной скорости горения, неплоского профиля горячей поверхности, полей температур и реагентов с использованием упрощенной кинетики химических реакций и конечно-разностной схемы 4-го порядка точности. Эта работа представляет интерес также в связи с моделированием горения слоев горючего, наполненных (мелким) ПХА, в дополнение к обычному случаю горения чистых слоев горючего. Константы скоростей химических реакций были заимствованы из [22], но для разложения связующего принят закон скорости реакции нулевого порядка с низкой энергией активации, данные для которого взяты из работы по лазерному пиролизу [24]. Скорость горения и профиль горячей поверхности определялись из условия сохранения потока массы, найденного по модели распределен-

ной реакции в конденсированной фазе, а также из условия равенства нулю поперечного градиента скорости выгорания во всех точках поверхности горения.

В рамках анализа [23] найдено, что структура пламени, определяемого как область интенсивного тепловыделения и высокой температуры, включает зону монотопливного пламени ПХА, имеющего плоскую форму и расположенного параллельно горячей поверхности. Результирующее диффузионное пламя сосредоточено вдоль линий стехиометрического соотношения компонентов в соответствии с подходом Шваба — Зельдовича. Тепловыделение в диффузионном пламени также локализуется в близкой окрестности к поверхности контакта горючее — окислитель, но слегка сдвинуто на сторону ПХА в связи с требованием стехиометрии для реакции между ПХА и НТРВ (9:1). Все теоретические результаты полностью соответствовали экспериментальным данным [22] по профилям поверхности горения и структуре газовой фазы пламени, полученным для слоистых образцов с чистым (ненаполненным) связующим. Общие экспериментальные зависимости по давлению были также воспроизведены. В них увеличение давления приводило к увеличенному тепловыделению, особенно на поверхности стехиометрического уровня, а это вело к более значительному выступанию слоя связующего и более глубоким впадинам на искривленной поверхности. Степенная зависимость скорости горения от давления характеризовалась показателем степени в пределах $0.6 \div 0.4$ при различных уровнях давления. Это согласовывалось с общими представлениями о чувствительности скорости горения смесового топлива к давлению, но, как и в [17], рассчитанное по модели уменьшение показателя в законе горения при увеличении давления противоречило наблюдаемой в эксперименте тенденции.

Результаты расчетов [23] по влиянию размера толщины слоя связующего оказались соответствующими наблюдаемым в эксперименте зависимостям. Горение слоистого образца с малой толщиной слоя связующего характеризовалось плоской поверхностью связующего и однородным тепловыделением в газовой фазе. В случае большой толщины слоя связующего наблюдалось его выступание над слоем окислителя и тепловыделение локализовалось в окрестности контакта слоев. Достижение максимума скорости горения при данной толщине наблю-

далось при различных условиях и демонстрировало связь между увеличением взаимовоздействия пламени при уменьшении длины диффузии и изменением общей геометрии горящего слоистого образца.

Немногочисленные расчеты были также проведены для случая горения образцов с наполненным окислителем слоем связующего. Было продемонстрировано в согласии с экспериментом, что при горении образца с центральным слоем такого связующего реализуется более однородное тепловыделение над слоем и поверхность горения более ровная по сравнению со случаем горения образца со слоем чистого связующего. Однако модельные расчеты не продемонстрировали перехода к лимитируемому диффузией режиму, характеризующему сильно выступающим слоем связующего и наличием интенсивного тепловыделения в вершине пламени, которое наблюдалось экспериментально в [25]. Следует также отметить, что все расчеты и сравнения с экспериментом были ограничены в [23] рассмотрением общих тенденций при увеличении пространственных масштабов. Прямые сравнения для образцов, идентичных по компонентным составам и размерам слоев, не проводились. Считалось, что внешние граничные условия для экспериментов со слоистыми образцами отличны от расчетных. При этом прямые сравнения становятся неуместными. Это соответствовало общему (ложному) мнению специалистов по моделированию горения, но последующие исследования влияния граничных условий поставили такое понимание под вопрос и проложили дорогу для более прямых сопоставлений.

Дальнейшее развитие идеи [23] получили в работах [25, 26], в которых было улучшено моделирование горения ПХА и численные результаты прямо сравнивались с экспериментом. Использовался механизм разложения ПХА [9], который включает сублимацию и реакцию в газовой фазе наряду с разложением ПХА в жидком слое конденсированной фазы. Учет исчезновения слоя расплава при уменьшении давления ниже нижнего предела горения ПХА по давлению был призван повысить точность моделирования при низких давлениях.

В работе [25] улучшенная модель использовалась для исследования горения образца, содержащего слой наполненного окислителем связующего. Были предприняты усилия для моделирования экспериментально наблю-

даемых профилей пламени и горящей поверхности. В результате удалось правильно предсказать выступание слоя ПХА над слоем связующего при давлениях ниже 20 атм. Прямые сравнения результатов расчетов и экспериментов для одинаковых давлений и толщин связующего обнаружили, что модель правильно описывает конкуренцию механизмов горения перемешанных и перемешанных газов в случае горения образца со слоем чистого связующего. Графики расчетных значений тепловыделения демонстрировали изменение режимов горения при добавлении мелкого ПХА в связующее. Для лимитируемого диффузией случая горения толстого слоя чистого связующего тепловыделение локализовалось в вершине пламени (на стороне ПХА) и простиралось ниже по потоку вдоль поверхности стехиометрического уровня. Когда в слой связующего добавляли ПХА, тепловыделение равномерно распределялось над центром слоя связующего, приводя к образованию плоской горящей поверхности, даже если толщина центрального слоя горючего (и соответственно характеристическая длина) увеличивалась вдвое. Этот результат вычислений соответствовал экспериментальным данным по профилю горящей поверхности, полученным для идентичных условий.

Дополнительные расчеты были проведены в [25] для исследования влияния граничных условий и последующего сравнения результатов с экспериментальными данными для образцов, также имеющих периодические граничные условия (рис. 4). Результаты расчетов для слоев чистого связующего толщиной 130 мкм, горящих при давлении 13 атм, свидетельствовали, что переход от ячеек со стехиометрическим составом к ячейкам с увеличивающимся избытком окислителя сопровождается увеличением высоты выступающего внешнего слоя ПХА в связи с избытком окислителя во внешних слоях ПХА. Несмотря на это отличие, все важные детали структуры пламени у поверхности образца в окрестности поверхности контакта горючее/окислитель остались неизменными. Это касалось вершины пламени и геометрии поверхности связующего (степень выступления центра слоя горючего по отношению к впадине ПХА в месте вершины пламени). Результаты расчетов соответствовали экспериментам для образцов как с одним, так и с тремя слоями горючего. Совокупность экспериментальных и расчетных данных отражала

факт, многократно зарегистрированный экспериментаторами: процессы вблизи поверхности в наибольшей степени влияют на общий характер процесса горения слоевого топлива. Такое заключение не только дало возможность использовать экспериментально обоснованную карту областей структуры пламени и поверхности горения в целях проверки численной модели, но и позволило отвергнуть утверждения тех исследователей, которые считали, что различие во внешних граничных условиях делает сравнение эксперимента с расчетом бессмысленным.

Считая необходимым провести проверку разработанной численной модели всеми имеющимися средствами, авторы [27] построили диаграмму режимов горения слоевых образцов с чистым горючим для классификации экспериментальных данных по структуре пламени и поверхности горения при вариации давления и толщины слоя связующего. Это позволило провести прямое сравнение с соответствующей экспериментальной диаграммой, построенной в [25]. Расчетные результаты в согласии с экспериментом характеризовали два режима: кинетически лимитируемое горение с плоской горящей поверхностью и пламенем предварительно перемешанных газов, а также диффузионно лимитируемое горение с выраженным выступанием слоя горючего и диффузионными пламенами в лидирующих точках. Комбинации давления и толщины связующего были нанесены на диаграмму для каждого режима. После этого количественно определили переходные условия в терминах давления и слоя связующего. Общие тенденции были воспроизведены, включая наклоненную вниз линию смены режимов (минимальная толщина слоя связующего, при которой осуществляется лимитируемый диффузией режим горения, уменьшалась при увеличении давления). Выше этой линии (высокие давления и толстые слои горючего) реализуется режим «разделенного» пламени, ниже — режим «слившегося» пламени. Сопоставление расчетной и экспериментально определенной линий смены режимов горения свидетельствовало об адекватности моделирования при давлении около 10 атм, однако наклон расчетной линии был значительно выше экспериментальной, что свидетельствовало о переоценке влияния давления на диффузионное пламя при повышенных давлениях. Это сопоставление продемонстрировало необходимость бо-

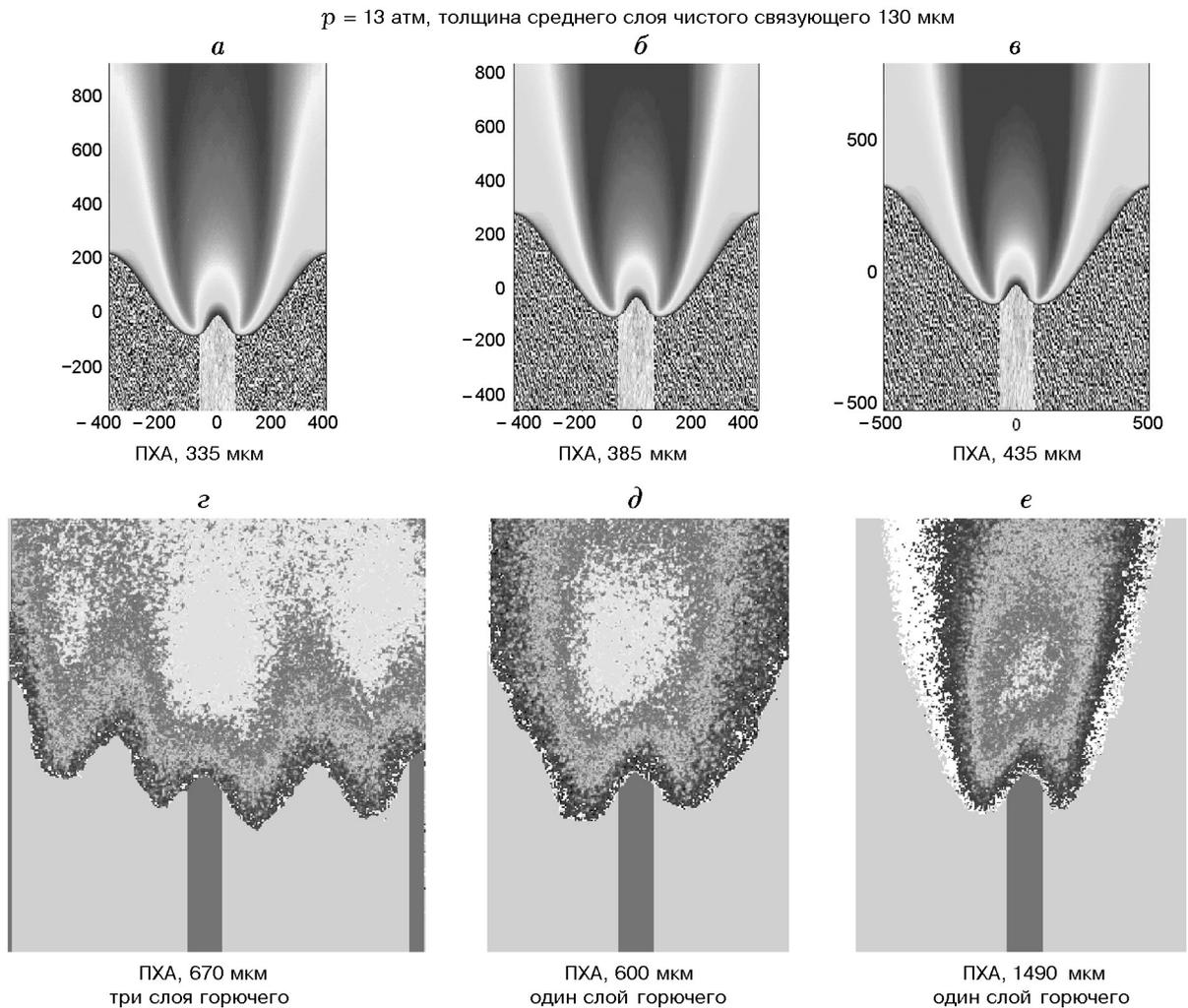


Рис. 4. Расчетные (а–в) и экспериментальные данные (г–е), демонстрирующие влияние боковых граничных условий

лее сложных вычислений, возможно, с включением газофазных механизмов.

В работах индийских исследователей [28, 29] сделан новый шаг к прямым сравнениям результатов экспериментальных и теоретических исследований горения слоевых топлив. В работе [28] развита численная модель для слоев чистого горючего с использованием нестационарных уравнений массы, импульса, энергии и транспорта реагентов, предназначенная для предсказания скорости горения и профиля горячей поверхности. Процессы в конденсированной фазе описаны на основе закона поверхностного пиролиза, однако сделана попытка моделировать нижний предел по горению для чистого ПХА с помощью

рассмотрения перехода от экзотермических реакций в жидком поверхностном слое к эндотермическим на сухой поверхности ПХА. Приняв модель горения ПХА Гайрао и Вильямса [9], авторы [28] получили возможность исследовать роли первичного и финального диффузионных пламен [5] при высоком и низком давлении в модификации пламени монотоплива ПХА. Поточковые граничные условия использовались на горячей поверхности и симметричные граничные условия — на боковых границах сэндвича.

При теоретическом моделировании температурной зависимости для нижнего предела горения ПХА по давлению были выбраны минимальные значения из известных для энергии

активации газовой и твердофазной реакций (в основном соответствующие высоким скоростям нагрева). Выбор значений входных параметров обеспечивал выполнение критерия устойчивости горения, сформулированного в работе [30]. Авторы [28] справедливо отмечали, что во многих предыдущих исследованиях игнорировалось требование устойчивости при формулировании моделей горения. В расчетах использовались зависящие от давления значения теплоемкости и выбирались значения предэкспонентов в кинетических уравнениях, которые позволяли получить справочное значение скорости горения 3.3 мм/с при давлении 20.7 атм и температуре поверхности 850 К. Следует отметить, что для описания первичного и финального диффузионных пламен были использованы низкие нецелые значения порядка реакции (показателя степени при давлении). Отличия от бимолекулярного взаимодействия реагентов не были объяснены. В конечном итоге результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными для образцов, содержащих слой РВАН (полибутадиев акрилонитрил), так как это связующее характеризуется меньшей склонностью к плавлению, которое не учитывалось в постановке задачи. Однако в расчетах для связующего использовались теплофизические свойства НТРВ, ввиду их доступности. Влияние допущения о равенстве теплофизических параметров не исследовалось.

Результаты расчетов [28] нестационарной скорости горения продемонстрировали, что при давлениях меньше нижнего предела ПХА по горению выгорание окислителя вдали от поверхности контакта слоев происходит с меньшей скоростью, чем в других точках слоевого образца, и стационарный профиль устанавливается очень медленно. При повышенных давлениях скорости горения на боковых частях сэндвича быстро устанавливались на одном уровне, что вселяло уверенность в возможности теоретически рассчитывать характеристики горения монотоплива-окислителя. Анализ соответствующих профилей и зон тепловыделений для обоих газозоных пламен показал, что по мере повышения давления над уровнем нижнего предела ПХА по горению финальное диффузионное пламя увеличивается в объеме и становится более интенсивным, сдвигаясь по поверхности ПХА к месту раздела слоев горючего и окислителя. При низких давлениях первич-

ное диффузионное пламя приобретает доминирующую роль, поскольку продукты твердофазного разложения окислителя становятся более доступными для реагирования (с продуктами разложения связующего) в связи со снижением интенсивности монотопливного пламени ПХА. Разработана обоснованная версия необходимости учета расходования окислителя в диффузионном пламени в случае, когда решается задача о горении слоевых образцов при давлениях ниже предела ПХА по горению.

Было исследовано влияние различия коэффициентов температуропроводности горючего и окислителя. Результаты оказались в хорошем согласии с экспериментальными данными [19] по замедлению выгорания ПХА в ближней окрестности поверхности контакта слоев. Согласно расчетам [28] различие величин температуропроводности обуславливает наличие узкого локального гребня на поверхности ПХА вблизи поверхности контакта слоев. В случае идентичной температуропроводности замедления горения ПХА не наблюдалось, что позволяет приписать этот эффект поперечным теплотерям в более холодный слой связующего, действующий как сток тепла.

Были также воспроизведены общие закономерности горения слоевых образцов, в том числе наличие точек максимальной скорости горения, локализуемых на стороне ПХА вблизи поверхности контакта слоев, с тем большим выступанием слоя связующего, чем больше его толщина. В расчетах получено сравнительно небольшое максимальное значение скорости горения сэндвича при вариации толщины слоя связующего. Однако численное значение оптимальной толщины отличалось от экспериментального [19] по крайней мере вдвое. Для давления 14 атм получено удовлетворительное согласие с экспериментальным минимальным значением толщины слоя связующего, при котором погасает слоевой образец.

В последующей работе [29] тех же авторов усилия были направлены на моделирование горения слоевых образцов при субатмосферном давлении. Использовался в основном тот же самый подход, но энергии активации для реакций в диффузионном пламени были пересмотрены с точки зрения существования кинетически лимитируемого процесса горения при низких давлениях. Вычисления проводились с целью сравнения с авторскими экспериментальными данными для толщин слоя связующего в диапазоне

10 ÷ 400 мкм и давлений 0.78, 0.92, 2, 4, 7.1 и 10.1 атм.

Согласно эксперименту [29] скорость горения была максимальной при давлении 0.92 атм для образцов с толщиной слоя 225 мкм. Минимальная толщина слоя связующего, при которой происходило погасание при том же уровне давления, равнялась 125 мкм. Для немного более низкого давления 0.78 атм наблюдалось монотонное снижение скорости горения с уменьшением толщины слоя связующего вплоть до погасания, которое соответствовало толщине 200 мкм. Хотя это и не было четко сформулировано в [29], обнаружение максимума скорости горения находилось в соответствии с результатами работ [19, 25], в которых максимум приписывался конкурирующему влиянию связанных диффузионных пламен и отклонению от стехиометрически выгодных условий при уменьшении толщины связующего. Увеличение требуемой для самоподдерживающегося горения минимальной толщины связующего с понижением давления также находилось в согласии с экспериментальными данными [19] для клиновидных образцов, согласно которым в кинетически лимитируемой области параметров невозможно поддерживать горение при сильном избытке окислителя. Дополнительно авторы [29] экспериментально обнаружили появление темных зон над поверхностью связующего в случае горения толстых слоев связующего; это явление было связано с наличием потока нереагирующего расплавленного связующего во впадины. Основная ценность этого исследования заключалась в том, что оно обеспечило экспериментальный базис для сравнения с теорией данных по горению при низком давлении слоевых образцов с НТРВ, полимеризованных с помощью диизоцианата толуола (TDI).

Проведенные в [29] модельные расчеты продемонстрировали неплохое согласие с экспериментом. Теоретические пределы погасания соответствовали толщинам слоев связующего 80 и 120 мкм при давлениях 0.92 и 0.78 атм соответственно. Это хорошо воспроизводило экспериментальную тенденцию увеличения минимальной «гасящей» толщины связующего при уменьшении давления. При обоих уровнях давления расчетные «гасящие» толщины оказались меньше экспериментальных. Различие результатов было приписано наличию боковых теплопотерь в реальных образцах, которые

отсутствовали в модели, использующей симметричные граничные условия. Модель также предсказала существование максимума скорости горения при вариации толщины слоя связующего, но теоретические значения оказались больше экспериментальных по крайней мере на 100 мкм (различия более чем на 50 %).

По результатам расчетов были построены профили поверхности горения и графики для тепловыделения при горении тонкого (120 мкм) и толстого (400 мкм) слоев связующего, демонстрирующие согласие с ранее полученными экспериментальными данными. В обоих случаях поверхность ПХА отставала от горячей поверхности связующего из-за исключительно слабого тепловыделения в монотопливном пламени ПХА. Именно это и ожидалось, поскольку расчеты проводились для давлений ниже предела горения ПХА по давлению. В случае еще более толстых слоев связующего происходило выступание связующего с одновременным уширением первичного диффузионного пламени и образованием структуры финального диффузионного пламени с двумя ветвями, вершина которого располагалась над поверхностью контакта слоев. Авторы [29] также показали, что максимальные температуры при низких давлениях обычно находились на высоте около 1 мм над поверхностью, а при давлении, соответствующем нижнему пределу горения чистого ПХА по давлению, максимальные температуры находились на расстоянии приблизительно 100 мкм над поверхностью горения. Эти результаты, по-видимому, отражают факт увеличения отхода пламени при уменьшении давления, как это регистрировалось в экспериментах [31–33]. Наконец, расчетные зависимости скорости горения от давления демонстрировали изменение значения показателя степени от 0.4 при давлениях ниже 200 атм до 0.74 при более высоких давлениях. Такой вид зависимости скорости горения от давления наблюдался в экспериментах многочисленными исследователями и был, по-видимому, правильно интерпретирован в работе [29]. В ней утверждалось, что с ростом давления происходит переход от режима горения, в котором монотопливное пламя ПХА и финальное диффузионное пламя относительно слабые и доминирует первичное диффузионное пламя, к режиму, в котором два вышеупомянутых пламени усиливаются и становятся доминирующими, а роль первичного диффузионного пламени незначительна. Такой анализ

конкуренции пламенных структур и результирующего влияния на профиль поверхности горения в сочетании с обоснованием модели с помощью сравнения ее с экспериментом представляется весьма важным дополнением в ряду продолжающихся исследований горения гетерогенных слоевых топлив.

В работе [34] продолжены исследования, начатые в [17], путем нового рассмотрения газофазной кинетической модели, включавшей также модель первичного диффузионного пламени, впервые предложенную в [5]. Для более точного моделирования поведения скорости самостоятельного горения слоя связующего, наполненного мелким ПХА с различными соотношениями горючее/окислитель, потребовалось рассмотреть добавочное диффузионное пламя, возникающее за счет прямой реакции между продуктами пиролиза ПХА и связующего. Модель была сформулирована на базе подхода [17] и дополнительно адаптирована, чтобы получить возможность оперировать крутыми градиентами на профиле горячей поверхности. Величины предэкспонентов в кинетических соотношениях подбирались путем согласования расчетов со значениями скоростей горения индивидуальных веществ. В согласии с другими моделями первичное диффузионное пламя было пространственно локализовано в зоне вблизи поверхности контакта горючее/окислитель. Хотя вклад от этого пламени в общее тепловыделение относительно невелик, особенно при высоком давлении, его близкое расположение около горячей поверхности и пространственная локализация оказывали значительное влияние на скорость горения и профиль горячей поверхности. Учет влияния первичного диффузионного пламени приводил к увеличенному выступанию слоя горючего. Этот эффект был уже предсказан в работе [27] в качестве вероятной причины расхождения экспериментальных и вычислительных данных на диаграммах [27] структуры пламени и горячей поверхности и отсутствия в расчетах наблюдаемого в эксперименте выступания наполненного окислителем слоя горючего. Авторы [34] показали, что выступание слоя ПХА в газовую фазу также недостаточно предсказывалось двустадийным механизмом газофазных реакций. Учет первичного диффузионного пламени увеличивал скорости горения на 25 %.

Основываясь на данных [25] о возможности использования экспериментальных резуль-

татов по горению сэндвичей с одиночным центральным слоем (несмотря на различие внешних граничных условий), авторы [34] провели ряд качественных сопоставлений собственных результатов расчетов с экспериментально зарегистрированными профилями горячей поверхности [19]. Общий результат расчетов заключался в том, что с ростом толщины слоя горючего высота его выступления над окислителем увеличивается. В [34] сформулировано, что это происходит из-за недостаточного прогрева слоя горючего. Последнее ведет к увеличению его выступающей части для обеспечения более высокой температуры поверхности. Таким способом удастся повысить скорость горения и сравнять ее со средней по образцу слоевого топлива. Рост давления также приводил к увеличению выступления слоя связующего и выравниванию поверхности толстых (внешних) слоев ПХА по мере того, как общая скорость горения сэндвича приближалась к скорости горения чистого ПХА. При давлениях ниже ≈ 120 атм скорость горения смесевых образцов была выше таковой для чистого ПХА. Игнорирование в модели существования нижнего предела ПХА по горению привело к наличию утопленных слоев окислителя при давлениях ниже 20 атм, что качественно не соответствовало данным [19]. Хотя эти качественные сравнения представляют шаг в правильном направлении, были бы полезны дополнительные количественные сопоставления с экспериментальными данными, чтобы повысить доверие к результатам расчетов по модели. Такие сопоставления могли бы включать данные по зависимости скорости горения от толщины слоя связующего при различных давлениях, а также по условиям (давление и толщина слоя связующего) разделения режимов горения с доминирующим пламенем перемешанных газов и плоской горячей поверхностью и горения с доминирующими пламенами перемешанных газов и выступающим слоем связующего.

В недавно опубликованной работе [35] используются экспериментально полученные значения скоростей горения и профили поверхности погашенных сэндвичей ПХА/полиметилметакрилат в качестве входных данных для численных расчетов, чтобы получить сведения о величине и пространственном распределении тепловыделения в газовой фазе. С помощью этого уникального сочетания теоретического и экспериментального подходов авторы

[35] сделали попытку добыть сведения о структуре газозафазного пламени, не привлекая данных по газозафазной кинетике. С использованием законов поверхностного пиролиза (которые все же требуют предположений о величине кинетических параметров) были определены температуры поверхности на основе известных скорости горения и профилей горящей поверхности. Далее значения температуры принимались в качестве граничного условия в задаче о температурном поле в конденсированной фазе. Полученный в результате решения этой задачи тепловой поток через границу раздела твердое — газ служит в качестве граничного условия для уравнения, описывающего распределение температуры в газовой фазе. Экспериментально определенные параметры использовались для задания других граничных условий для уравнений движения газа и энергии. Функции тепловыделения в газовой фазе итерировались в системе уравнений, описывающих процессы в газе, чтобы удовлетворить условию заданного теплового потока на поверхности горения. В связи с предположением об отсутствии монотопливного пламени ПХА анализ был ограничен уровнем давлений ниже 21 атм. Это упрощало граничные условия (делая их не очень реалистичными) и общее математическое решение.

Расчеты [35] показали, что для существования решения уравнения энергии необходимо задать довольно большое тепловыделение в газе вблизи (в пределах 10 мкм) поверхности. Было получено, что максимальные температуры в газе достигаются на расстояниях 1300 и 700 мкм для давлений 7.8 и 14.6 атм соответственно. Это демонстрировало соответствие результатов расчетов по модели экспериментальным данным [31–33]. С помощью анализа чувствительности решения к вариации параметров было найдено, что наибольшее влияние оказывают форма профиля горящей поверхности, а также значения коэффициентов теплопроводности конденсированной фазы и теплоемкости газовой фазы.

Следует заметить, что точность результатов расчетов [35] недостаточно велика. В частности, уравнение энергии в газовой фазе удовлетворяет граничному условию по тепловому потоку в пределах 10 % вблизи поверхности контакта слоев и 30 ÷ 40 % на боковых удалениях от нее на расстояние 1 мм и более. Другое серьезное замечание касается возмож-

ной неоднозначности решений, что ставит под большое сомнение любые серьезные утверждения по структуре газозафазного пламени. Тем не менее следует признать значение работы [35], продемонстрировавшей потенциал подхода, сочетающего использование экспериментальных и теоретических результатов для получения информации о горении гетерогенных слоевых топлив. Ее авторы справедливо отмечают во введении к своей статье, что сравнения вычислительных результатов с профилями поверхности горения и расстояниями отхода пламени так же важны, как и сравнения с экспериментальными значениями скорости горения и ее отклика в колебательных режимах горения. При этом первые два параметра не так легко удастся согласовать вариацией подгоночных (не феноменологических) параметров. Надежное подтверждение предсказательной способности вычислительных моделей должно основываться на возможно более полном доступном экспериментальном базисе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После почти полувековых попыток моделирования горения гетерогенных слоевых топлив достигнут большой прогресс в объяснении экспериментальных данных по горению и пониманию влияния различных параметров на профиль горящей поверхности, скорость горения, структуру пламени, воспламенение и другие характеристики горящего топлива. Теория подтвердила то, что было известно из эксперимента, а именно что конкуренция между пламенами перемешанных и предварительно перемешанных газов играет ключевую роль в процессе горения. Было показано, что процессы вблизи поверхности оказывают решающее влияние на теплопередачу к горящей поверхности и на ее результирующую геометрию и скорость горения. По этой причине экспериментальные результаты, полученные на образцах с одиночным центральным слоем горючего, вполне пригодны для обоснования вычислительных моделей. Несмотря на обилие двумерных экспериментальных данных, детальное сопоставление с расчетными результатами проводилось лишь в редких случаях. До настоящего времени ни одна двумерная модель не продемонстрировала возможность предсказания всех или большинства важных закономерностей горения, наблюдаемых в широком диапазоне изменения параметров. Хотя уже делались попытки обоснова-

ния аналитических и численных моделей при вариации параметров как в широком, так и в очень узком диапазоне, в настоящее время проявляется тенденция использования как можно более значительного объема экспериментальных данных для сравнения с предсказаниями теории. Эта тенденция должна привести к созданию моделей с большей предсказательной силой в ряду исследований, направленных на лучшее понимание явления горения двумерных слоевых топлив и создание модели для исследования более сложной, трехмерной проблемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Nachbar W.** A theoretical study of the burning of a solid propellant sandwich // *Solid Propellant Rocket Research* / M. Summerfield (Ed.). (Progress in Astronautics and Rocketry Series). New York: Academic Press, 1960. V. 1. P. 207–226.
2. **Fenn J. B.** A phalanx flame model for the combustion of composite solid propellants // *Combust. Flame*. 1968. V. 12. P. 201–216.
3. **Саммерфилд М., Сатерленд Г. С., Уэбб М. Дж. и др.** Механизм горения топлив на ПХА // *Исследование ракетных двигателей на твердом топливе* / Под ред. М. Саммерфилда. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. С. 104–129.
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. **Beckstead M. W., Derr R. L., Price C. F.** A model of composite solid-propellant combustion based on multiple flames // *AIAA Journal*. 1970. V. 8, N 12. P. 2200–2007.
6. **Strahle W.** Solid propellant sandwich deflagration analysis // *AIAA Journal*. 1975. V. 13, N 5. P. 640–646.
7. **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.
8. **Parr T. P., Hanson-Parr D. M.** Solid propellant diffusion flame structure // *Proc. Combust. Inst.* 1996. V. 26. P. 1981–1987.
9. **Guirao C., Williams F. A.** A model for ammonium perchlorate deflagration between 20 and 100 atm. // *AIAA Journal*. 1971. V. 9, N 7. P. 1345–1356.
10. **Струнин В. А., Фирсов А. Н., Шкадинский К. Г., Манелис Г. Б.** Закономерности гетерогенного горения // *Физика горения и взрыва*. 1989. Т. 25, № 5. P. 25–32.
11. **Ермолин Н. Е., Коробейничев О. П., Фомин В. М., Чернов А. А.** Исследование структуры пламен смесевых твердых топлив на основе перхлората аммония и полибутадиенового каучука // *Физика горения и взрыва*. 1992. Т. 28, № 4. С. 59–65.
12. **Jia X., Bilger R. W.** The Burke-Schumann diffusion flame with zero net flux boundary conditions // *Combust. Sci. Technol.* 1994. V. 99. P. 371–376.
13. **Burke S. P., Schumann T. E. W.** Diffusion flames // *Indust. Eng. Chem.* 1928. V. 20. P. 998–1004.
14. **Bilger R. W., Jia X., Li J. D., Nyugen T. T.** Theoretical and experimental study of composite solid propellant combustion // *Combust. Sci. Technol.* 1996. V. 114. P. 1–39.
15. **Miccio F.** Numerical modeling of composite propellant combustion // *Proc. Combust. Inst.* 1998. V. 27. P. 2387–2395.
16. **Buckmaster J., Jackson T. L., Yao J.** An elementary discussion of propellant flame geometry // *Combust. Flame*. 1999. V. 117, N 3. P. 541–552.
17. **Hegab A., Jackson T. L., Buckmaster J., Stewart D. S.** Non-steady burning of periodic sandwich propellants with complete coupling between the solid and gas phases // *Combust. Flame*. 2001. V. 125. P. 1055–1070.
18. **Surzhikov S. T., Murphy J. J., Krier H.** 2D model for unsteady burning heterogeneous AP/binder solid propellants // *AIAA Paper* N 2000-3573. 2000.
19. **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.
20. **Knott G. M., Brewster M. Q.** Two-dimensional combustion modeling of heterogeneous solid propellants with finite Peclet number // *Combust. Flame*. 2000. V. 121. P. 91–106.
21. **Ward M. J., Son S. F., Brewster M. Q.** Steady deflagration of HMX with simple kinetics: a gas phase chain reaction model // *Combust. Flame*. 1998. V. 114. P. 556–568.
22. **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.
23. **Knott G. M., Brewster M. Q.** Modeling the combustion of propellant sandwiches // *Combust. Sci. Technol.* 2002. V. 174. P. 61–90.
24. **Esker D. R., Brewster M. Q.** Laser pyrolysis of hydroxyl-terminated polybutadiene // *J. Propulsion and Power*. 1996. V. 12, N 2. P. 296–301.
25. **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.

26. **Fitzgerald R. P., Genevieve P., Brewster M. Q.** Flame and surface structure of laminate propellants with coarse and fine ammonium perchlorate // AIAA Paper N 2003-1161. 2003.
27. **Fitzgerald R. P., Brewster M. Q.** Validation of composite propellant combustion modeling using laminate propellants // AIAA Paper N 2003-4628. 2003.
28. **Ramakrishna P. A., Paul P. J., Mukunda H. S.** Sandwich propellant combustion: modeling and experimental // Proc. Combust. Inst. 2002. V. 29. P. 2963–2973.
29. **Ramakrishna P. A., Paul P. J., Mukunda H. S., Sohn C. H.** Combustion of sandwich propellant at low pressures // Proc. Combust. Inst. 2004. V. 30. P. 2097–2104.
30. **Denison M. R., Baum E.** A simplified model of unstable burning in solid propellants // Amer. Rocket Soc. J. 1961. V. 31. P. 1112.
31. **Parr T. P., Hanson-Parr D. M.** Solid Propellant Flame Chemistry and Structure, Non-Intrusive Combustion Diagnostics. Begell House, 1994. P. 571–599.
32. **Parr T. P., Hanson-Parr D. M.** AP diffusion flame structure // Proc. 33th JANNAF Combustion Meeting. 1996. V. 2. P. 35–44.
33. **Parr T. P., Hanson-Parr D. M.** Solid propellant diffusion flame structure // Proc. Combust. Inst. 1996. V. 26. P. 1981–1987.
34. **Massa L., Jackson T. L., Buckmaster J.** New kinetics for a model of heterogeneous propellant combustion // J. Propulsion and Power. 2005. V. 21. N 5.
35. **Panyam R. R., Price E. W., Chakravathy S. R.** Combustion at the interface of a laminate system of solid oxidizer and solid fuel // Combust. Flame. 2004. V. 136. P. 1–15.

Поступила в редакцию 16/VI 2005 г.
