

УДК 662.613

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

В. А. Бабук, Н. Л. Будный, А. Н. Ивоненко, А. А. Низяев

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова
198005 Санкт-Петербург, babuk@peterlink.ru

Рассматриваются принципы расчетного определения характеристик как крупной, так и мелкой фракции конденсированных продуктов сгорания, образующихся у поверхности топлива и эволюционирующих в составе многофазного потока в камере сгорания. Характеристики конденсированных продуктов у поверхности топлива определяются путем моделирования процессов при их формировании с использованием системы принятия решений, базирующейся на идеологии экспертных систем. Для определения характеристик конденсированных продуктов в многофазном потоке продуктов сгорания разработана модель эволюции в условиях неоднородного течения с учетом взаимного влияния характеристик конденсированных и газообразных продуктов сгорания. Разработанные средства позволяют определять характеристики конденсированных продуктов в зависимости от состава топлива, характеристик заряда топлива и параметров камеры сгорания. Проведен параметрический анализ разработанных моделей для условий в камере сгорания.

Ключевые слова: конденсированные продукты, агломерация, горение, многофазный поток, моделирование.

DOI 10.15372/FGV20180306

ВВЕДЕНИЕ

Одним из следствий использования металлического горючего — алюминия в составе смесевых твердых топлив является образование конденсированных продуктов горения (КПГ) у поверхности горящего топлива, которые в дальнейшем трансформируются в конденсированные продукты сгорания. Как правило, КПГ характеризуются наличием двух фракций частиц, отличающихся размерами и свойствами, — высокодисперсного оксида алюминия (ВДОК) и агломератов. Фракция ВДОК состоит из частиц Al_2O_3 размеров $\approx 0.1 \div 10.0$ мкм. Фракция агломератов представляет собой укрупненные частицы, состоящие из Al и Al_2O_3 , обладающие сложным строением и способные существенно превосходить по размерам исходные частицы металлического горючего.

Актуальность исследования процессов образования и эволюции КПГ обусловлена значительным влиянием конденсированных продуктов на процессы при функционировании двигателя. Отметим, что существенное значение имеют дисперсность этих продуктов, массовая

доля агломератов и ВДОК, а также химический состав и структура агломератов.

Значимость проблем, связанных с наличием КПГ, определила многочисленность публикаций по вопросам моделирования многофазных потоков с учетом горения частиц Al [1–7]. Существенное количество работ посвящено численному моделированию процесса агломерации и определению характеристик агломератов у поверхности топлива (см. обзор [8]). В то же время число работ по моделированию формирования ВДОК ограничено. Некоторые аспекты этого процесса рассмотрены в работах [9–11].

К настоящему времени авторами данной работы разработан ряд моделей, которые позволяют решать задачу определения характеристик КПГ как у поверхности топлива, так и в потоке продуктов сгорания. К ним относятся математическая модель агломерации [12], модель эволюции агломератов [13] и модель эволюции ВДОК [14] в многофазном потоке продуктов сгорания. Кроме того, разрабатывается система принятия решений о свойствах КПГ у поверхности топлива, которая базируется на идеологии экспертных систем [15]. Особенностью созданных средств является возможность

определения не только размеров и массовой доли КППГ, но и химического состава и структуры частиц при горении различных типов топлива. Данное обстоятельство является следствием учета многообразия явлений в процессе эволюции.

В настоящей работе рассматриваются принципы использования разработанных авторами средств [12–15] для расчета характеристик КППГ на поверхности топлива и в условиях камеры сгорания. Особенности эволюции КППГ в условиях камеры сгорания являются неоднородный характер течения, распределенный по поверхности заряда подвод продуктов сгорания, взаимное влияние характеристик конденсированных продуктов и газовой фазы.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПИСАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ

КППГ формируются в поверхностном слое горящего топлива и у его поверхности.

Формирование агломератов обусловлено образованием каркасного слоя. В пределах и на поверхности каркасного слоя осуществляются плавление и воспламенение исходных частиц металла, в результате чего происходят их слияние, накопление оксида и формирование агломератов. В свою очередь, образование каркасного слоя связано с наличием «карманов» и «межкарманных мостиков» в исходной структуре топлива. «Карман» — область, заключенная между несколькими частицами дисперсного окислителя. Подобный подход к моделированию агломерации, основанный на концепции «карманов», развивался в работах [16, 17]. «Межкарманный мостик» — область, находящаяся в узкой прослойке между двумя соседними частицами окислителя [12]. Как правило, формирование каркасного слоя происходит в пределах «карманов». В случае использования окислителя с относительно низкой температурой плавления при горении топлива возможно растекание окислителя, т. е. потеря индивидуальности частиц окислителя. В этом случае исчезают предпосылки для применения этих структурных образований в описании процесса формирования КППГ [12].

В соответствии с понятием «карман» выделяются карманный, межкарманный, докарманный механизмы агломерации [12], т. е. механизмы, при реализации которых агломерат

формируется при выработке одного, нескольких либо менее одного «кармана».

Если каркасный слой не формируется, частицы металла покидают поверхность топлива без участия в процессе агломерации. Подобная ситуация возможна при использовании топлив на базе активного связующего [18].

Формирование ВДОК осуществляется в результате реализации различных процессов: конденсации продуктов газозафазного (парофазного) горения частиц агломерирующего металла у поверхности топлива; конденсации продуктов газозафазного (парофазного) горения частиц неагломерирующего металла; сгорания неагломерирующего металла в гетерогенном режиме.

Наличие нескольких механизмов формирования КППГ объясняет многомодовый характер распределения частиц по размерам у поверхности топлива.

В составе многофазного потока в результате эволюции КППГ формируются конечные продукты сгорания топлива. Под эволюцией КППГ в составе многофазного потока продуктов сгорания понимается совокупность физико-химических превращений, приводящих к изменению дисперсности, химического состава, структуры, а также массовой доли КППГ. Взаимодействие между крупной и мелкой фракциями КППГ приводит к перераспределению их долей и изменению дисперсности частиц. Горение металла агломератов в ходе эволюции КППГ приводит к изменению состава и свойств газообразных продуктов сгорания. Таким образом, имеет место эволюция как крупной и мелкой фракций КППГ, так и газообразных продуктов сгорания. Общая схема эволюции КППГ представлена на рис. 1.

2. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК КППГ У ПОВЕРХНОСТИ ГОРЯЩЕГО ТОПЛИВА

Для определения характеристик формирующихся агломератов может быть использована модель агломерации [12]. Модель позволяет определять следующие основные параметры агломератов: $f_m(D)$ — массовая функция плотности распределения агломератов по размерам; D_{43} — среднемассовый размер агломератов, мкм; Z_m^a — массовая доля исходного металлического горючего, формирующего агломераты; η — массовая доля оксида в агломератах; параметры структуры агломератов. Параметры агломератов в зависимости от условий

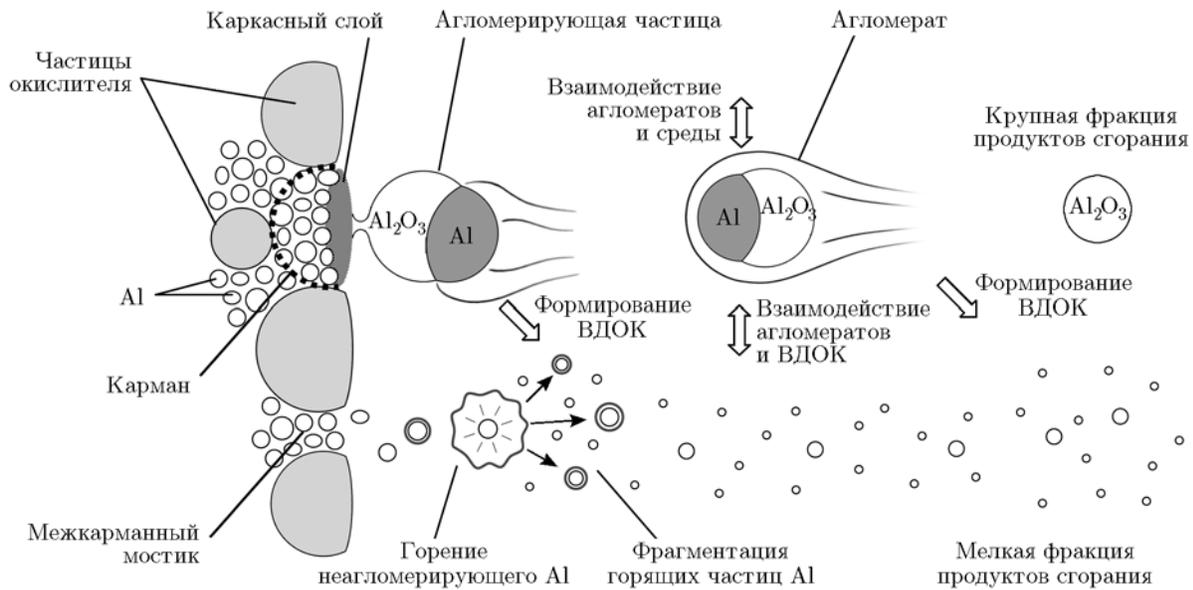


Рис. 1. Схема эволюции КПП

Таблица 1

Закономерности агломерации
и определяемые при использовании модели [12] характеристики агломератов

Тип	Формирование каркасного слоя	Сохранение индивидуальности окислителя	Давление, механизм агломерации	Определяемые характеристики агломератов
I	В пределах всех «карманов»	Полное	$p \lesssim 1.0$ МПа — карманный	$f_m(D)$, Z_m^a , η , параметры структуры агломератов
II	В пределах всех «карманов»	Полное	$p \lesssim 1.0$ МПа — докарманный	Z_m^a , η , параметры структуры агломератов, верхняя оценка D_{43}
III	Только в «карманах», формируемых сохраняющими индивидуальность частицами окислителя	Частичное	$p \lesssim 4.0$ МПа — карманный и межкарманный, $p \gtrsim 4.0$ МПа — карманный	$f_m(D)$, Z_m^a , η , параметры структуры агломератов
IV	В пределах всех «карманов»	Полное	$p \lesssim 0.5 \div 6.0$ МПа* — карманный и межкарманный, $p \gtrsim 0.5 \div 6.0$ МПа* — карманный	$f_m(D)$, Z_m^a , η , параметры структуры агломератов

*Предельное давление зависит от скорости горения топлива.

формирования каркасного слоя, свойств окислителя, механизма агломерации и давления (p) представлены в табл. 1. Модель [12] позволяет определять (оценивать) эти характеристики, если известно, к какому типу относится рассматриваемое в каждом случае топливо и, следовательно, известны закономерности агломерационного процесса. Входными параметра-

ми модели являются тип и содержание компонентов топлива, размеры и содержание частиц окислителя, условия горения (давление, перегрузка).

В общем случае задача расчетного прогнозирования характеристик конденсированных продуктов у поверхности горящего топлива в зависимости от его рецептуры и условий

горения является чрезвычайно сложной. Только в ряде ситуаций можно говорить о наличии расчетных формализованных средств, обеспечивающих решение данной задачи. Для оценки характеристик как агломератов, так и ВДОК авторами настоящей работы разрабатывается система принятия решений о свойствах конденсированных продуктов у поверхности производного топлива. Она включает в себя формализованные описания (совокупность математических моделей процессов, определяющих формирование КПП), а также описания, базирующиеся на нечеткой логике. Последние являются следствием неопределенности информации о закономерностях формирования КПП, что в существенной мере связано с недостаточным количеством и неполным характером экспериментальных данных о рассматриваемых явлениях. Принципы системы принятия решений описаны в работе [15]. Данная система использовалась при выполнении настоящей работы.

3. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК КПП В СОСТАВЕ МНОГОФАЗНОГО ПОТОКА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Эволюция агломератов. Для моделирования эволюции агломератов в составе потока продуктов сгорания используется модель из работы [13]. В основе моделирования лежит описание следующих явлений: газофазное (парофазное) горение Al; химическое взаимодействие между конденсированными Al и Al_2O_3 с формированием газообразных продуктов в составе агломератов; изменение структуры агломератов; коагуляция агломератов и ВДОК; движение агломератов в потоке.

В ходе моделирования осуществляется численное интегрирование обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих движение и изменение характеристик отдельных агломератов во времени. Данная модель позволяет прогнозировать изменение характеристик агломератов в составе многофазного потока от момента отрыва от поверхности топлива до их попадания на стенки камеры сгорания либо поступления в сопло.

Эволюция ВДОК. Для моделирования эволюции ВДОК используется модель из работы [14]. В ее основе лежит представление о том, что частицы ВДОК, попадая в зону газофазного (парофазного) горения агломератов, укрупняются за счет конденсации на них продуктов горения. Основные положения модели: кон-

денсация является «быстрым» процессом, режим конденсации — гетерогенный, толщина зоны конденсации и скорость подвода субоксидов определяются моделью газофазного (парофазного) горения металла агломератов [13], коагуляция определяется броуновским движением, пространственное положение зоны конденсации определяется параметрами течения газа вблизи агломерата. Модель представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих изменение массы и количества частиц каждой фракции ВДОК при его движении в зоне горения агломерата вследствие конденсации и коагуляции. Распределение ядер конденсации по размерам служит исходной информацией. Применительно к эволюции ВДОК, ядрами конденсации являются уже существующие в потоке частицы оксида. Модель позволяет определять изменение функции распределения ВДОК по размерам при течении многофазного потока.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ КПП В УСЛОВИЯХ НЕОДНОМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Моделирование эволюции КПП в условиях камеры сгорания связано с решением ряда задач, к которым относятся моделирование течения газообразных продуктов сгорания, определение параметров состава и свойств газообразных продуктов сгорания, определение характеристик агломератов и ВДОК, учет взаимного влияния свойств КПП и газовой фазы. Ниже приведено описание принятых подходов к решению этих задач.

Моделирование течения газообразных продуктов сгорания. Математическое описание течения газовой фазы осуществляется в рамках решения уравнений Навье — Стокса и уравнения неразрывности для несжимаемого вязкого газа в стационарной постановке. На данном этапе свойства газа считаются постоянными. Граничные условия определяются геометрическими параметрами расчетной области, массовой скоростью подвода газа, давлением в выходном сечении камеры сгорания, которое, в свою очередь, определяется условиями функционирования камеры сгорания.

Дискретизация расчетной области. С целью дальнейшего учета взаимодействия процессов при эволюции агломератов, ВДОК и их

влияния на свойства газовой фазы проводится дискретизация расчетной области. Для этого создается расчетная сетка, связанная с линиями тока газовой фазы. Ячейка такой сетки представляет собой трубку тока газообразных продуктов. В пределах каждой ячейки строится криволинейная система координат, ось которой соответствует линии тока газовой фазы. В качестве начала такой системы координат выступает поверхность топлива.

Параметры агломератов, ВДОК и газовой фазы определяются как функции криволинейных координат в каждой ячейке расчетной области. Интерполяция значений параметров между осями ячеек позволяет перейти к описанию поля искоемых параметров агломератов.

Определение характеристик агломератов. Фракция агломератов представляется в виде некоторого числа частиц, размер и начальные координаты которых меняются дискретно. При этом непрерывная функция $f_m(D)$ разбивается на несколько фракций, характеризующихся размерами и массовой долей, а поверхность топлива разделяется на несколько участков, с которых идет поставка агломератов в газовую фазу. Моделирование эволюции сводится к расчету траекторий этих агломератов и определению изменений их характеристик вдоль траекторий при использовании модели эволюции [13]. Затем траектории агломератов анализируются и определяются параметры агломератов в зависимости от криволинейных координат в ячейках расчетной области.

Определение характеристик ВДОК. Эволюция ВДОК на настоящем этапе моделируется в приближении одномерного (квазиодномерного в криволинейной трубке тока) течения продуктов сгорания. При этом вводится параметр l_{inv} , характеризующий промежуток, на котором ВДОК полностью вовлечены в эволюционный процесс при взаимодействии с агломератами. Значение l_{inv} зависит от скорости несущей газовой фазы, средней скоростной неравновесности агломератов и газовой фазы, а также от суммарной площади миделевых сечений агломератов в единице объема [14].

В каждой ячейке расчетной области криволинейные координатные оси разбиваются на отрезки длиной l_{inv} . На концах этих отрезков при помощи модели [14] определяются массовая функция плотности распределения ВДОК по размерам и среднемассовый размер ВДОК d_{43} . Считается, что между этими точками па-

раметры ВДОК изменяются линейно. Таким образом, характеристики ВДОК определяются как функции криволинейных координат в каждой ячейке расчетной области.

Определение характеристик многокомпонентной смеси продуктов сгорания. В качестве индивидуальных компонентов смеси рассматриваются 22 вещества, включающие в себя соединения элементов С, Н, О, N, Cl, Al. Характеристики смеси определяются исходя из допущения о термодинамическом равновесии смеси газообразных и конденсированных продуктов, за исключением металла в составе агломератов. Эволюция агломератов приводит к изменению содержания Al в агломератах и к увеличению полноты сгорания Al. Полнота сгорания Al характеризуется параметром X_m , определяемым как отношение массы металла, окисленного в пределах ячейки расчетной области, к массе исходного металла в основании рассматриваемой ячейки. Это позволяет представить характеристики смеси (температура, параметры состава, характеристики тепло- и массопереноса) в виде функций параметра X_m .

Осуществление расчета. Расчет продолжается путем глобальных итераций, на которых последовательно уточняются характеристики газа и агломератов в ячейках расчетной области. Итерации продолжаются до достижения потребной точности по сходимости параметра X_m в нескольких контрольных точках. Моделирование эволюции ВДОК осуществляется по завершении расчета параметров агломератов и газовой фазы ввиду слабого на них влияния характеристик ВДОК.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для анализа созданных средств выбраны два топлива — А-1 и N-5, характеристики эволюции КПП при их горении экспериментально определены в работе [19]. Параметры состава и скорость горения данных топлив приведены в табл. 2. Эти топлива относятся к IV и I типу в соответствии с табл. 1.

Для подтверждения адекватности созданных моделей проведен их анализ применительно к условиям одномерного течения в экспериментальной установке и результаты расчета сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными [19] (табл. 3).

Представленные в табл. 3 характеристики КПП у поверхности топлива ($x = 0$) определялись с использованием модели агломерации

Таблица 2

Характеристики топлив А-1 и N-5

Топливо	Компоненты топлива и их массовые доли			Скорость горения топлива, мм/с
	Al	окислитель	инертное связующее + добавки	
A-1	0.20	0.68*	0.12	5.2 ($p = 1.0$ МПа) 11.0 ($p = 4.0$ МПа)
N-5	0.24	0.64**	0.12	5.9 ($p = 1.0$ МПа) 8.1 ($p = 6.0$ МПа)

*Динитрамид аммония, 160 ÷ 210 мкм; **перхлорат аммония, 400 ÷ 600 мкм.

Таблица 3

Расчетные и экспериментальные характеристики КПГ при горении топлив А-1 и N-5 в условиях экспериментальной установки

x , см	D_{43} , мкм	η	Z_m^a	d_{43} , мкм
А-1, $p = 4.0$ МПа				
0	85 (101 ± 16)	0.390 (0.45 ± 0.04)	0.410 (0.371 ± 0.041)	0.51 (0.52 ± 0.05)
7	89 (106 ± 16)	0.669 (0.567 ± 0.06)	0.175 (0.172 ± 0.015)	0.78 (0.68 ± 0.07)
N-5, $p = 6.0$ МПа				
0	250 (250 ± 27)	0.401 (0.401 ± 0.067)	0.344 (0.344 ± 0.025)	0.80 (0.80 ± 0.16)
7	262 (285 ± 45)	0.525 (0.457 ± 0.075)	0.219 (0.243 ± 0.028)	1.20 (1.35 ± 0.20)

Примечание. В скобках указаны экспериментальные данные работы [19].

[12] и системы принятия решений о свойствах КПГ, а на расстоянии от поверхности топлива $x = 7$ см — с помощью модели эволюции многофазного потока.

Для условий нестационарного течения многофазного потока в камере сгорания проведен параметрический анализ созданных моделей. Рассматривалось осесимметричное течение в канале топливного заряда и в камере сложной конфигурации на двух стадиях выработки топливного заряда — начальной (А) и промежуточной (Б) (рис. 2). В последнем случае форма заряда соответствует наблюдаемой в момент времени, когда выработана половина свода горения заряда топлива. С учетом различной площади поверхности заряда топлива давление на стадии А равно 4.0 МПа, на стадии Б — 6.0 МПа. Исследовались топлива А-1 и N-5, начальные характеристики КПГ соответствовали данным, представленным в табл. 3 при $x = 0$. В дальнейшем при описании результатов моделирования эволюции КПГ при горении топлива А-1 рассматривается стадия А, а при горении топлива N-5 — стадия Б.

На рис. 2 представлены некоторые траек-

тории агломератов с начальными размерами $D_0 = 85$ мкм (стадия А) и 250 мкм (стадия Б),

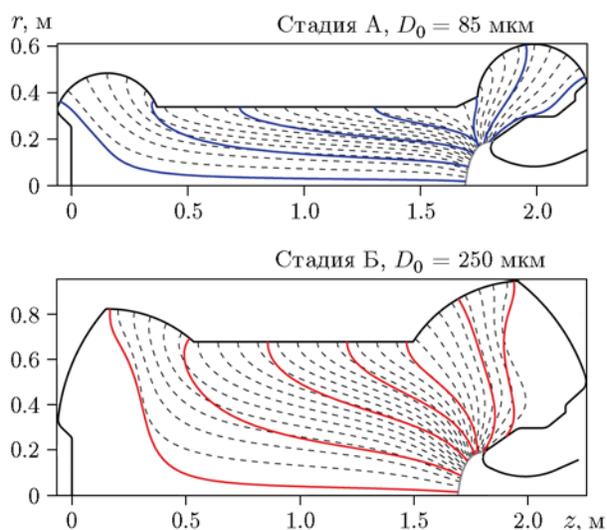


Рис. 2. Геометрические характеристики расчетной области (z — продольная координата, r — радиальная), траектории агломератов и границы ячеек расчетной области

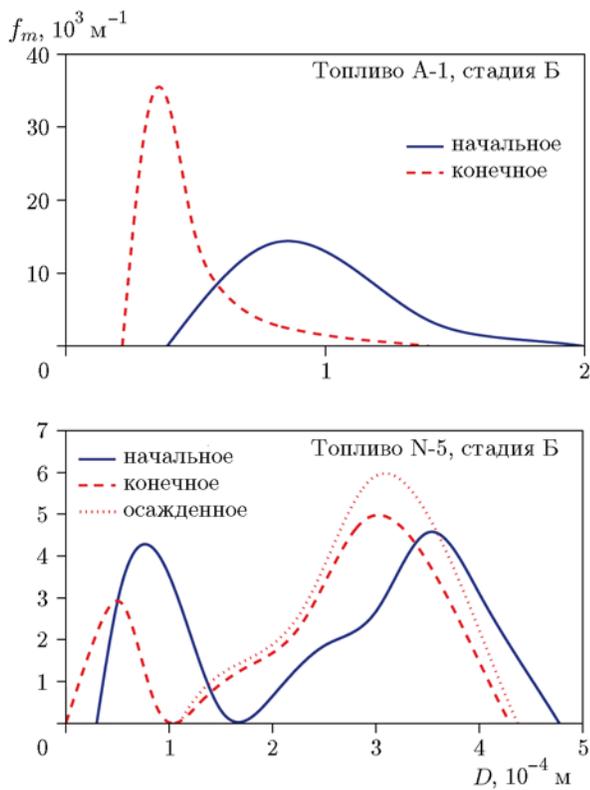


Рис. 3. Массовые функции плотности распределения агломератов по размерам

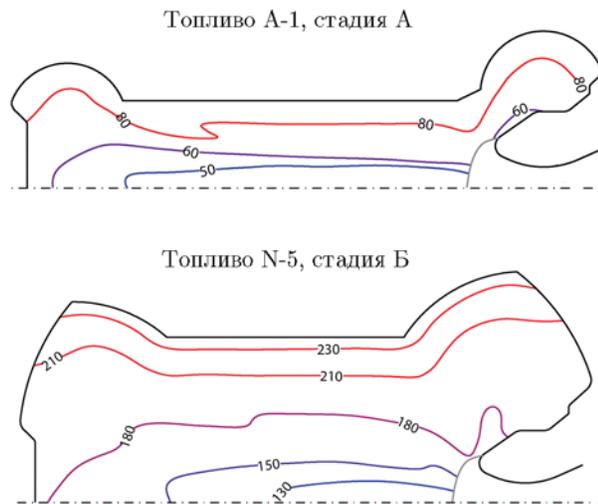


Рис. 4. Распределение размеров агломератов (мкм)

а также обозначены границы ячеек расчетной области (границы совпадают с линиями тока газовой фазы).

На рис. 3 приведены массовые функции плотности распределения агломератов по раз-

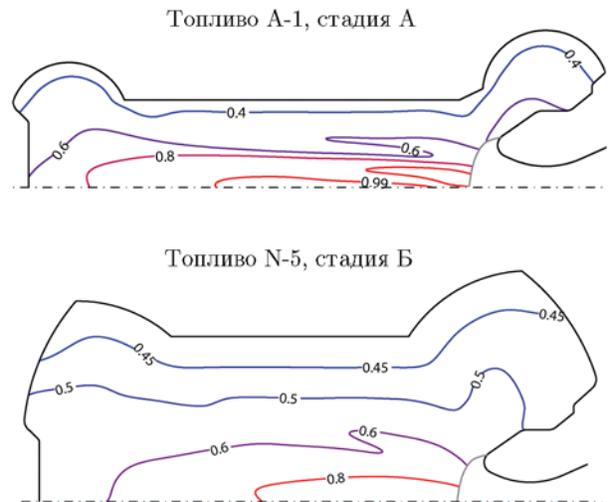


Рис. 5. Распределение массовой доли оксидов в агломератах

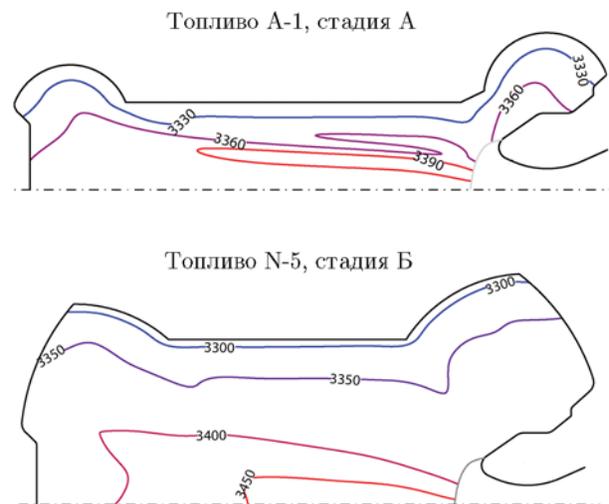


Рис. 6. Распределение температуры газовой фазы (K)

мерам при горении топлив А-1 и N-5 на стадии Б выработки топливного заряда. Эти функции соответствуют начальному распределению агломератов у поверхности топлива, а также распределению агломератов, поступающих в сопло и осаждающихся на стенках камеры сгорания.

Диаграммы распределения размера и массовой доли оксида η в агломератах ($D_0 = 85$ и 250 мкм) в расчетной области приведены на рис. 4 и 5. Диаграммы распределения температуры газовой фазы в расчетной области представлены на рис. 6.

Таким образом, результаты моделирования дают основания для утверждения возмож-

ности определения характеристик конденсированных продуктов горения в камере сгорания, а также свойств осаждающихся продуктов, т. е. формирующих шлаковый остаток. Корректность получаемых результатов обеспечивается использованием моделей [12–14], которые были верифицированы при использовании экспериментальных данных при исследовании эволюции КПП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные в работе принципы использования ранее разработанных методов и средств обеспечивают расчетное определение характеристик КПП как вблизи поверхности горящего топлива, так и в объеме камеры сгорания. Полученные результаты являются базой для совершенствования описания внутрикамерных процессов, связанных с наличием конденсированных продуктов.

ЛИТЕРАТУРА

- Dupays J., Fabignon Y., Villedieu P., Lavergne G., Estivalezes J. L. Some aspects of two-phase flows in solid-propellant rocket motors // Prog. Astronaut. Aeronaut. — AIAA, 2000. — V. 185. — P. 859–883.
- Shimada T., Daimon Y., Sekino N. Numerical simulation of flow inside a solid rocket motor by eulerian-hybrid approach with relation to nozzle inlet ablation // Proc. 8th Intern. Symp. on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, July 2007, Lyon, France. — Paper Ref. ISAI8-00109. — P. 1–10.
- Attili A., Favini B., Di Giacinto M. Numerical simulation of multiphase flows in solid rocket motors // 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2–5 August 2009, Denver, Colorado. — AIAA Paper 2009-5507. — P. 1–19.
- Sabnis J. S. Numerical simulation of distributed combustion in solid rocket motors with metalized propellant // J. Propul. Power. — 2003. — V. 19, N 1. — P. 48–55.
- Вилюнов В. Н., Ворожцов А. Б., Феценко Ю. В. Моделирование двухфазного течения смеси газа с горящими частицами металла в полужамкнутом канале // Физика горения и взрыва. — 1989. — Т. 25, № 3. — С. 39–43.
- Волков К. Н., Емельянов В. Н., Тетерина И. В. Движение и горение металл-оксидных агломератов в потоке продуктов сгорания твердого топлива // Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и в ствольных системах (ICOC'2014). — М., 2014. — С. 62–74.
- Миньков Л. Л., Шрагер Э. Р. Оптимальное распределение частиц металла в заряде твердого топлива в приближении одномерного поля течения в цилиндрическом канале // Инж.-физ. журн. — 2015. — Т. 88, № 2. — С. 371–379.
- Beckstead M. W. An overview of aluminum agglomeration modeling // Proc. 50th Annu. Israeli Aerospace Sciences Conf. — Tel Aviv, 2010. — P. 1–28.
- Золотко А. Н., Вовчук Я. И., Полетаев Н. И., Флорко А. В., Альтман И. С. Синтез наноксидов в двухфазных ламинарных пламенах // Физика горения и взрыва. — 1996. — Т. 32, № 3. — С. 24–33.
- Лукин А. Я., Степанов А. М. Теоретическое исследование процессов образования конденсированных продуктов при горении частиц металла // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 4. — С. 45–49.
- Карасев В. В., Онищук А. А., Хромова С. А., Глотов О. Г., Зарко В. Е., Пилюгина Е. А., Тсай Ч. Ц. Образование наночастиц оксида металла при горении частиц титана и алюминия // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 6. — С. 33–47.
- Бабук В. А., Ивоненко А. Н., Низяев А. А. Расчет характеристик агломератов при горении высокоэнергетических смесевых твердых топлив // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 5. — С. 44–56.
- Babuk V. A., Vasilyev V. A. Model of aluminum agglomerate evolution in combustion products of solid rocket propellant // J. Propul. Power. — 2002. — V. 18, N 4. — P. 814–824.
- Бабук В. А., Будный Н. Л. Моделирование эволюции высокодисперсного оксида в составе потока продуктов сгорания алюминизированного твердого топлива // Хим. физика и мезоскопия. — 2017. — Т. 19, № 1. — С. 5–19.
- Бабук В. А., Ивоненко А. Н. Разработка системы принятия решений о свойствах конденсированных продуктов горения высокоэнергетических твердых топлив // Лазерная и ракетно-космическая техника XXI века: сб. науч. тр. / под ред. В. А. Бабука, А. С. Борейшо. — СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2016. — С. 34–44.
- Козн Н. С. Модель «карманов» для описания процесса агломерации в составе ракетных топлив // Аэрокосм. техника. — 1984. — Т. 2, № 2. — С. 67–75.
- Григорьев В. Г., Зарко В. Е., Куценогий К. П. и др. Модель агломерации порошкообразного металла при горении смесевых составов // Докл. АН СССР — 1981. — Т. 259, № 4. — С. 881–885.
- Babuk V. A., Dolotkazin I. N., Glebov A. A. Burning mechanism of aluminized solid rocket propellants based on energetic binders // Propell., Explos. Pyrotech. — 2005. — V. 30, N 4. — P. 281–290.

19. **Babuk V. A., Vassiliev V. A., Naslednikov P. A.** Experimental study of evolution of condensed combustion products in gas phase of burning solid rocket propellant // Intern. J. Energ. Mater. Chem. Propul. — 2002. — V. 5, N 1-6. — P. 412-426.

*Поступила в редакцию 7/IX 2017 г.,
в окончательном варианте — 1/XI 2017 г.*
