

УДК 621.454

ЖИДКОФАЗНЫЕ РЕАКЦИИ ПРИ КАТАЛИТИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ

Н. Т. Ярошенко, А. В. Швейкин, Т. В. Волкова

Российский научный центр «Прикладная химия» (ГИПХ), 193232 Санкт-Петербург,
n.yaroshenko@giph.su, DrYaroshenkoN@yandex.ru

В ракетной технике нашли широкое применение однокомпонентные топлива гидразин и пероксид водорода. Их внедрение связано с созданием катализаторов, инициирующих воспламенение и горение топлива при простом контакте с катализатором без предварительного подогрева. Очевидно, что первоначальным актом воспламенения является жидкофазное разложение однокомпонентного топлива на катализаторе. В противном случае топливо просто не могло бы воспламениться. Представлены физико-химическая и математическая модели жидкофазного каталитического разложения и последующего воспламенения однокомпонентного топлива в слое гранулированного катализатора.

Ключевые слова: однокомпонентное топливо, пористый катализатор, двухфазный поток, капиллярные силы, физико-химическая и математическая модели.

DOI 10.15372/FGV2023.9438

EDN KSQBNU

ВВЕДЕНИЕ

В ракетной технике под термином «самовоспламеняющиеся топлива» понимают такие жидкие горючие и окислители, которые воспламеняются и горят при простом контакте в жидкой фазе. Для однокомпонентных топлив самовоспламенение происходит при контакте топлива с активным катализатором. Описание процесса горения в жидкостных ракетных двигателях (ЖРД) основывается на классических представлениях теории теплового взрыва для периода воспламенения и теории нормального распространения пламени для стационарного режима горения [1–4].

Жидкие компоненты топлива подаются в камеру сгорания ЖРД через форсуночную головку в виде мелких капель, и под смешением компонентов обычно понимается распределение капель горючего и окислителя в объеме камеры сгорания. В то же время процессы столкновения отдельной капли горючего с отдельной каплей окислителя и их физического и химического взаимодействия практически не изучены. При дальнейшем анализе под понятием капли подразумевается элемент жидкости минимального размера, поведение которого определяется силами поверхностного натяжения.

ЖРД, работающие на однокомпонентном топливе с его каталитическим инициированием

разложения и горения, можно рассматривать как двигатели на самовоспламеняющемся топливе, поскольку для его запуска не требуется источник зажигания. Катализатор инициирует разложение, воспламенение и горение однокомпонентного топлива при простом контакте с ним.

ЖРД, работающий на однокомпонентном топливе, более доступен экспериментальному и теоретическому исследованию, чем ЖРД, работающий на двухкомпонентном топливе, состоящем из окислителя и горючего, по двум основным причинам. Во-первых, температура в камере разложения таких топлив, как гидразин или пероксид водорода, не превышает 1000 °С, в то время как в ЖРД на двухкомпонентном топливе достигает 3500 °С, что не позволяет устанавливать в камере сгорания датчики измерения параметров процесса. Во-вторых, в ЖРД на однокомпонентном топливе поверхность жидкофазного контакта топлива с катализатором определяется поверхностью слоя катализатора, которая может быть измерена и описана. Катализаторы самовоспламенения однокомпонентных топлив представляют собой высокопористые гранулы с развитой внутренней поверхностью, и физическое взаимодействие капель топлива с гранулами катализатора определяется капиллярными силами.

Целью настоящей статьи является анализ механизма жидкофазного взаимодействия ка-

пель однокомпонентного, каталитически самовоспламеняющегося топлива с гранулами пористого катализатора и разработка физико-химической и математической моделей процессов в слое гранулированного катализатора.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ОДНОКОМПОНЕНТНОГО ТОПЛИВА

Экспериментальные исследования проводились на примере разложения гидразина на высокоактивном гранулированном алюмоиридиевом катализаторе, имеющем высокоразвитую внутреннюю пористость.

Отдельная гранула катализатора, погруженная в объем гидразина при разложении, покрывается пенообразной (кипящей) пленкой. Жидкая фаза удерживается на поверхности гранулы катализатора капиллярными силами, а пузырьки газообразных продуктов разложе-

ния барботируют через жидкость, создавая пенообразную пленку.

При повышении активности катализатора объем выделяющихся пузырьков газа увеличивается, но пенообразная пленка на поверхности сохраняется и ее не срывает с поверхности гранулы катализатора. Катализатор остается смоченным жидкой фазой гидразина.

Исследование взаимодействия струи и потока капель гидразина с отдельной гранулой катализатора проводилось методом скоростной киносъемки на реакторе с прозрачной стенкой (рис. 1). Отдельная гранула катализатора с отверстием в центре закреплялась на термопаре. Другая термопара прижималась к наружной поверхности гранулы катализатора. Гидразин подавался струей через иглу шприца.

При температуре катализатора ниже температуры кипения с началом разложения гидразина гранула катализатора окутывается пенообразной пленкой, которая удерживается

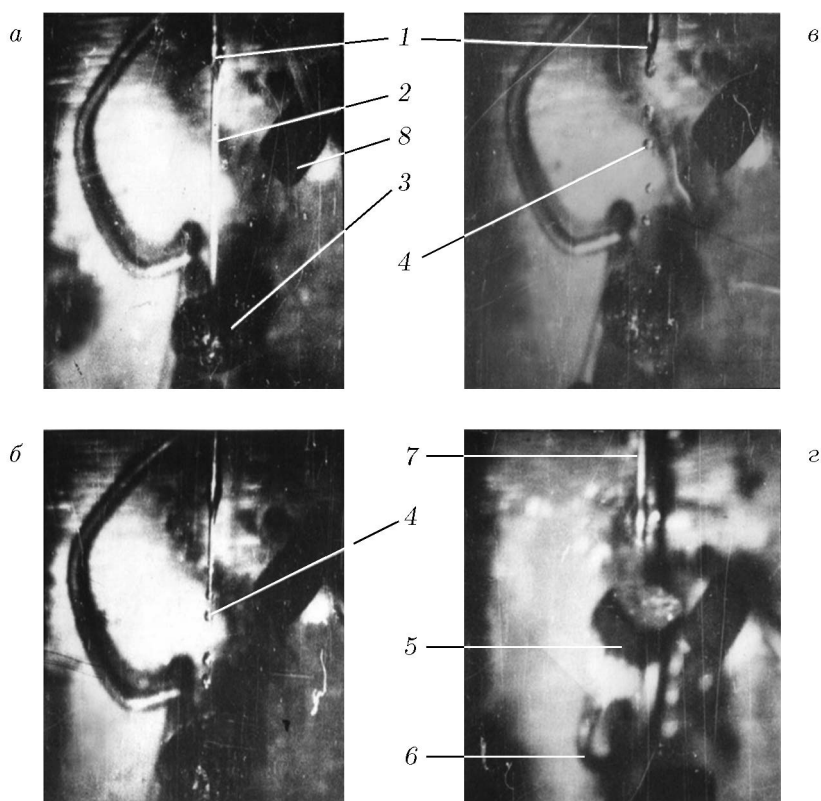


Рис. 1. Взаимодействие пористой гранулы катализатора со струей и каплями гидразина:

а-в — температура поверхности гранулы катализатора ниже температуры кипения (113°C), г — выше 350°C ; 1 — игла шприца, 2, 7 — струя гидразина, 3 — холодное зерно катализатора, покрытое кипящей пленкой, 4 — капли гидразина, 5 — элемент жидкого (крупная капля) гидразина на горячем зерне катализатора, 6 — горячее зерно катализатора, 8 — образец зерна катализатора

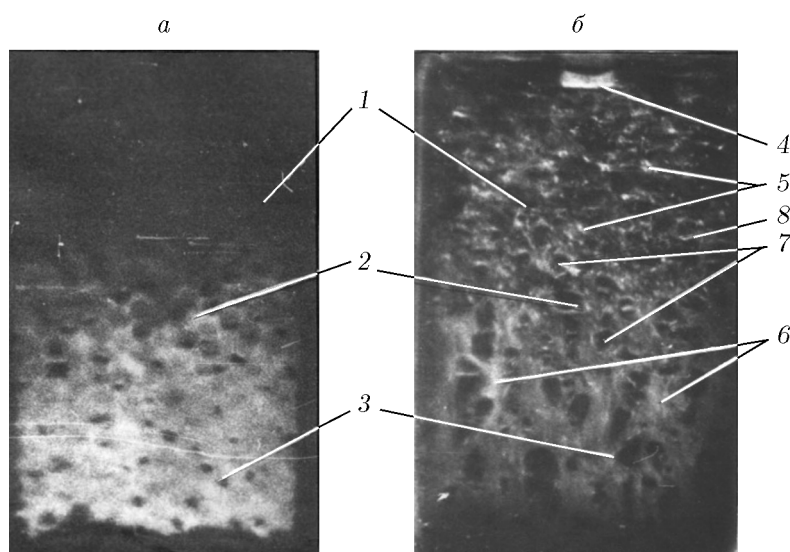


Рис. 2. Фотография процесса разложения гидразина в слое катализатора:

а — вид через прозрачное окно при самосвечении камеры, *б* — при сильном наружном освещении камеры; 1 — зона гетерогенного жидкофазного разложения, 2 — фронт реакции (горения), 3 — зона газофазных реакций, 4 — форсунка, 5 — капли крупного размера, 6 — мелкие капли (туман), 7 — зерна катализатора, 8 — пленка на поверхности катализатора

на внешнем контуре гранулы капиллярными силами (рис. 1, *а*). Температура в слое пенообразной пленки на поверхности катализатора близка к температуре кипения гидразина ($113\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Тепло, выделяющееся в ходе реакции, расходуется на испарение жидкой фазы. Жидкофазное разложение гидразина протекает в поверхностном слое гранулы катализатора, так как в центре гранулы температура превышает $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Высокоскоростная сплошная струя гидразина, падающая на гранулу катализатора, поглощается пенообразной пленкой (рис. 1, *а*). В то же время отдельные капли отбрасываются от гранулы катализатора отходящим от поверхности пенообразной пленки потоком газообразных продуктов разложения гидразина и его паров (рис. 1, *б, в*) и облетают зерно катализатора по огибающей траектории.

Падение струи жидкого топлива на гранулу катализатора, нагретую выше температуры $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, не приводит к смачиванию катализатора. На поверхности гранулы формируется крупный элемент жидкой фазы, который непрерывно перемещается по поверхности гранулы катализатора, постоянно деформируясь как единое целое (рис. 1, *з*). Процесс аналогичен явлению Лейденфроста.

Течение потока гидразина в слое катализатора исследовалась в камере разложения (ре-

акторе) с прозрачной стенкой из кварцевого стекла (рис. 2).

По свечению слоя катализатора (рис. 2, *а*) можно выделить две характерные зоны по длине камеры разложения: холодная темная в головном слое катализатора и горячая светлая в хвостовом слое катализатора. Переход от холодной зоны к горячей имеет фронтальный характер и происходит скачком.

При интенсивном освещении в головном слое катализатора видны отдельные гранулы катализатора и крупные капли жидкости (светлые точки) (рис. 2, *б*). С первого ряда гранул формируется двухфазный поток, в котором крупные капли жидкости размером, равным примерно половине размера гранулы катализатора, переносятся потоком газа. В средней части реактора формируется фронт разогрева слоя катализатора, после этого в слое катализатора формируется другой вид двухфазного потока, в котором крупные капли гидразина распадаются на мельчайшие капли, образующие туманообразные жгуты.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ОДНОКОМПОНЕНТНОГО ТОПЛИВА

Процесс газогенерации высокотемпературного рабочего тела при разложении однокомпонентных топлив типа пероксида водо-

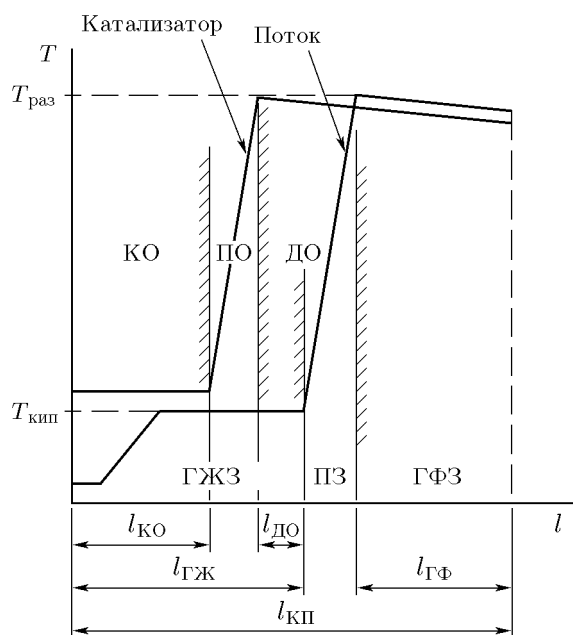


Рис. 3. Обобщенный профиль температуры катализатора и потока по длине слоя катализатора в камере разложения:

КО, ДО, ПО — кинетическая область, диффузионная область, переходная область; ГЖЗ, ГФЗ, ПЗ — зоны газожидкостного потока, газофазного потока, переходная зона; $l_{КО}$, $l_{ДО}$, $l_{ГЖЗ}$, $l_{ГФЗ}$, $l_{ПЗ}$ — протяженность соответствующих областей и зон; $T_{кип}$, $T_{разл}$ — температура соответственно кипения и разложения жидкости

рода, гидразина и их водных растворов на твердых гранулированных катализаторах наиболее наглядно представляется при рассмотрении продольного профиля температуры по длине слоя катализатора, схематическое изображение которого, основанное на обобщении экспериментальных данных, представлено на рис. 3 [5, 6].

В соответствии с рис. 3 выделяются три области процесса разложения. Кинетическая область в головном слое катализатора характеризуется низкой температурой катализатора, незначительно превышающей температуру кипения топлива. Разложение и испарение жидкой фазы происходит непосредственно на поверхности гранул катализатора. Скорость разложения определяется активностью катализатора в реакции жидкофазного разложения топлива. Диффузионная область в хвостовом слое катализатора характеризуется высокой температурой катализатора, близкой к температуре разложения топлива, испарение жидкой фазы протекает в каналах между гранулами. Скорость разложения определяется скоростью пе-

редачи паров топлива к внешней поверхности катализатора. В конце этой области при высокой температуре потока процесс переходит в область гомогенного разложения паров в потоке газовой фазы. Между кинетической и диффузионной областями существует узкая переходная область, в которой происходит скачкообразный разогрев катализатора от температуры кипения до температуры разложения топлива. Гранулы активного катализатора имеют свою внутреннюю пористость, поэтому понятия кинетической и диффузионной областей относятся к процессу переноса вещества к внешней поверхности гранул (геометрическому контуру). Процессы, протекающие на внутренней поверхности пор катализатора, не рассматриваются.

В соответствии с профилем температуры потока в слое катализатора выделяются зона газожидкостного потока и зона газофазного потока. Разложение пероксида водорода и гидразина сопровождается большим газовыделением, и при умеренных давлениях ($1.0 \div 2.0$ МПа) разложение уже 1 % жидкой фазы создает объемное газосодержание более 0.9 МПа. Поэтому уже в первом ряду слоя гранул наблюдается разделение жидкой фазы пузырями газа на отдельные капли размером, равным размеру каналов между гранулами катализатора, а двухфазный поток следует рассматривать как поток газа, несущий отдельные крупные капли жидкости. В кинетической области зоны газожидкостного потока капли контактируют с гранулами катализатора и под действием капиллярных сил жидкое топливо впитывается в поры катализатора. При разложении топлива гранула покрывается пенообразной пленкой, через которую от поверхности катализатора в межгранульные каналы барботируют продукты разложения и пары топлива. Процесс аналогичен пузырьковому кипению.

В результате интенсивного газовыделения при разложении одной капли на зерне катализатора другие капли, находящиеся в потоке в межгранульных каналах, отталкиваются от гранул и не могут контактировать с гранулами катализатора до тех пор, пока не израсходуется предыдущая капля.

Теплота разложения топлива расходуется на испарение жидкой фазы, поэтому температуры жидкой и газовой фаз потока близки друг к другу и испарением капель в межгранульных каналах в кинетической области можно прене-

брець. Убывание жидкой фазы в зоне газожидкостного потока в кинетической области определяется уменьшением числа капель в потоке. По мере увеличения степени разложения топлива количество капель в потоке убывает, и в некотором сечении капель становится недостаточно, чтобы смочить все гранулы катализатора в слое. Появляются гранулы катализатора, на которых жидкофазное разложение прекращается. Процесс переходит в диффузионную область разложения паров топлива, находящихся в газовой фазе потока. Температуры поверхности катализатора и газовой фазы возрастают до температуры разложения топлива. Крупные капли топлива испаряются в каналах между гранулами катализатора и не контактируют с катализатором, они отталкиваются от гранул катализатора парами жидкости, выделяющимися при приближении капли к горячей поверхности катализатора. Процесс аналогичен пленочному кипению. Скорость разложения определяется скоростью испарения крупных капель. Число капель по длине диффузионной области не изменяется, а убывание жидкой фазы происходит за счет испарения капель в межзеренном объеме.

В кинетической области характерным временем процесса является время разложения одной капли на одной грануле катализатора (τ_{kin}) — это период времени от момента контакта капли с гранулой катализатора до момента ее полного разложения. Движение капель жидкой фазы в двухфазном потоке характеризуется периодом следования капель (τ_{dif}) — это период времени между подлетом двух соседних капель к грануле катализатора. Условием перехода процесса из кинетической в диффузионную область является равенство времени пребывания и периода следования капль.

Увеличение степени разложения топлива приводит к увеличению скорости газовой фазы, и при достижении определенного ее значения происходит газодинамическое диспергирование крупных капель на мелкие до туманообразного состояния. Суммарная поверхность капель и соответственно скорости испарения и разложения топлива резко увеличиваются. Возникает скачок температуры потока. Критерием вторичного дробления капель может быть принято число Вебера

$$We = \frac{\rho L U^2}{\sigma}, \quad (1)$$

где ρ — плотность, σ — коэффициент поверхностного натяжения, L — характеристическая длина, U — скорость. Завершение разложения топлива происходит в результате гомогенного разложения паров топлива в зоне газофазного потока.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗЛОЖЕНИЯ ОДНОКОМПОНЕНТНОГО ТОПЛИВА В СЛОЕ АКТИВНОГО КАТАЛИЗАТОРА

В соответствии с физико-химической моделью математическая модель состоит из двух систем уравнений — для кинетической и диффузионной областей.

При математическом описании процессов в кинетической области приняты следующие допущения. С первого ряда гранул катализатора двухфазный поток рассматривается как поток газа, несущий капли жидкости. Размер образующихся капель равен эквивалентному размеру каналов между гранулами. Скорость газовой фазы в двухфазном потоке по длине слоя катализатора возрастает из-за увеличения объема газа по мере разложения топлива. Скорость капель в потоке незначительно возрастает в результате воздействия потока газовой фазы и может быть принята постоянной по длине кинетической области, равной скорости на входе в слой катализатора. С каждой гранулой катализатора одновременно контактирует только одна капля топлива. Следующая капля достигает гранулы катализатора только после полного разложения предыдущей капли.

Между жидкой и газовой фазами существует термическое равновесие. Рассматривается одномерная стационарная задача. Теплоотдача в окружающую среду не учитывается.

Исходная система уравнений представлена в следующем виде:

уравнение неразрывности для газовой фазы

$$\varepsilon \frac{d}{dx}(\rho U) = (W_k + W_{vap})n_{gr}, \quad (2)$$

уравнение неразрывности для жидкой фазы

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\dot{m}_l}{F_p \varepsilon} \right) = -(W_k + W_{vap})n_{gr}, \quad (3)$$

уравнение сохранения энергии

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{d}{dx}(C_p \rho U T) + C_l V_s \frac{d}{dx}(m_s n_s T) = \\ = (Q_p W_k - \Delta H_{vap} W_{vap})n_{gr}, \end{aligned}$$

уравнение движения газовой фазы

$$\varepsilon \rho U \frac{dU}{dx} + \frac{dp}{dx} = (W_k + W_{vap})(V_s - U)n_{gr}. \quad (4)$$

Здесь ε — пористость слоя катализатора; ρ , U , T , C_p , P — плотность, скорость, температура, удельная теплоемкость, давление пара газа; F_p — площадь поперечного сечения реактора; \dot{m}_l — расход жидкой фазы; V_s — скорость капель; n_{gr} , n_s — количество гранул и капель в единице объема; W_k , W_{vap} — скорость разложения и испарения капель на зерне; m_s — масса капли; C_l — удельная теплоемкость жидкости; Q_r — теплота реакции; ΔH_{vap} — теплота испарения.

Расчет проводился на примере разложения гидразина в слое высокоактивного гранулированного катализатора. При вычислении скорости разложения капли на грануле (W_k) используется экспериментальное значение скорости жидкофазного гетерогенного разложения, определенное по специальной методике, исключающей внутридиффузионные ограничения пористой гранулы катализатора:

$$W_{get} = 1.11 \cdot \exp\left(-\frac{62 \cdot 10^6}{RT_{gr}}\right), \quad (5)$$

где T_{gr} — температура гранулы катализатора.

Скорость разложения на грануле катализатора может быть определена через смоченную массу гранулы катализатора:

$$W_k = \pi d_{gr}^2 l_p \mu_0 \rho_{gr} W_{get}, \quad (6)$$

где d_{gr} — диаметр гранулы катализатора, l_p — глубина проникновения топлива в поры гранулы, μ_0 — молекулярная масса топлива, ρ_{gr} — плотность гранулы катализатора.

Величина l_p определяется из решения задачи проникновения жидкости в поры под действием капиллярных сил. Размеры поры гранул катализатора от 100 до 10 000 Å. Соответственно расчетное значение l_p для этих размеров пор изменяется в широком диапазоне, что делает его удобным параметром управления моделью, варьирование которого не затрагивает сущности модели.

Температура зерна катализатора T_{gr} определялась из уравнения баланса тепла при разложении капли гидразина на зерне:

$$Q_r W_k = \Delta H_{vap} W_{vap} + C_l W_{vap} (T_{gr} - T_{vap}), \quad (7)$$

где Q_r — удельная теплота реакции для жидкой фазы, T_{vap} — температура пара в потоке. Величина W_{vap} однозначно связана с W_k :

$$W_{vap} = W_k \gamma \frac{X_p(T_{gr})}{1 - X_p(T_{gr})}, \quad (8)$$

$$X_p(T_{gr}) = \frac{P_i(T_{gr})}{P},$$

где γ — изменение числа молей продуктов разложения, отнесенное к одному моль исходного топлива; X_p — концентрация паров в газовой фазе; $P_i(T_{gr})$ — давление насыщенных паров топлива при температуре T_{gr} . При известной зависимости $P_i = F(T)$ решение уравнения (7) дает значение T_{gr} при заданной температуре газа в каналах между зернами T_g .

Величина \dot{m}_l определялась из соотношения, учитывающего разложение и испарение (топлива):

$$\dot{m}_l = \dot{m}_0 \left(1 - Y - \gamma Y \frac{X_p(T)}{1 - X_p(T)}\right), \quad (9)$$

где \dot{m}_0 — расход жидкой фазы на входе в реактор, Y — степень разложения топлива. С другой стороны,

$$\dot{m}_l = m_s V_s F_p n_s. \quad (10)$$

Начальные условия задавались в следующем виде:

$$x = 0 \rightarrow p = p_0; \quad Y = 0; \quad T = T_0; \quad (11)$$

$$U = V_s; \quad V_s = \frac{\dot{m}_0}{F_p \varepsilon \rho_0}.$$

Условия на границе кинетической и диффузионной зон:

$$\tau_{kin} = \tau_{dif}, \quad \tau_{kin} = \frac{m_s}{W_k \left(1 + \gamma \frac{X_p}{1 - X_p}\right)}, \quad (12)$$

$$\tau_{dif} = \frac{m_s n_{can}}{\dot{m}_l}, \quad (13)$$

где n_{can} — число каналов в поперечном сечении камеры разложения.

При описании процессов в диффузионной области принимались следующие допущения. Капли жидкого топлива не контактируют с гранулами катализатора. Изменение жидкой

фазы происходит только за счет испарения капель топлива в каналах между гранулами. Концентрация паров топлива у поверхности катализатора вследствие быстрого разложения равна нулю. Реакция разложения топлива на катализаторе протекает в паровой фазе, и в реакции участвует только внешняя геометрическая поверхность (геометрический контур) катализатора. При достижении высокой температуры процесс переходит в режим гомогенного разложения в каналах между гранулами катализатора.

Ниже представлена система уравнений, описывающих процесс в диффузионной зоне.

Уравнение движения жидкой фазы

$$\frac{dV_s}{dx} = \frac{F_s}{V_s}, \quad F_s = C_{xs} \frac{p\mu a_s^2}{4RTm_s} \frac{(U - V_s)^2}{2}, \quad (14)$$

$$C_{xs} = 27\text{Re}^{-0.84}.$$

Уравнение испарения капель

$$\frac{da_s}{dx} = -\frac{2M_s}{\pi\rho_0 a_s^2 V_s}, \quad (15)$$

где M_s — скорость испарения капель, рассчитываемая из условия, что при температурах газа ниже температуры кипения скорость испарения лимитируется массопередачей, при температурах выше температуры кипения — теплопередачей.

Уравнение прогрева жидкой капли

$$\frac{dT_l}{dx} = \frac{Q_s - M_s \Delta H_{vap}}{C_l m_s V_s}, \quad (16)$$

$$Q_s = \pi a_s \lambda \text{Nu}(T - T_s),$$

где λ — теплопроводность.

Уравнение движения газовой фазы

$$\rho U \frac{dU}{dx} = \frac{dp}{dx} + (V_s - U)n_s M_s - m_s F_s n_s. \quad (17)$$

Уравнение изменения массы газовой фазы

$$\frac{d}{dx}(\rho U) = M_s n_s. \quad (18)$$

Уравнение сохранения энергии:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx}(C_p \rho U T) &= Q_p(\beta C S_c + W_{gom}) - \\ &- \Delta H_{vap} M_s n_s C_l n_s - C_l \frac{d}{dx}(m_s n_s T_l), \end{aligned} \quad (19)$$

где β — коэффициент массопередачи, C — концентрация паров, $\text{кг}/\text{м}^3$, S_c — удельная поверхность каталитического слоя.

Уравнение изменения концентрации

$$\frac{d}{dx}(UC) = \frac{M_s n_s}{\mu_0} - \beta C S_c + W_{gom}. \quad (20)$$

В уравнения (19), (20) введен член, учитывающий дополнительное гомогенное разложение гидразина.

Уравнение сохранения числа капель

$$V_s n_s = \text{const}. \quad (21)$$

При скорости газовой фазы, соответствующей критическому значению числа We , дробление капель моделировалось уменьшением диаметра капель до размера, определяемого по условию

$$a_s^l = 1.9 a_s \text{Re}^{0.1} We^{-0.6} \left(\frac{\rho}{\rho_l} \right), \quad (22)$$

где ρ_l — плотность жидкости.

В качестве иллюстрации возможностей предложенной модели на рис. 4 представлены для сравнения расчетные и экспериментальные данные по продольному профилю температур

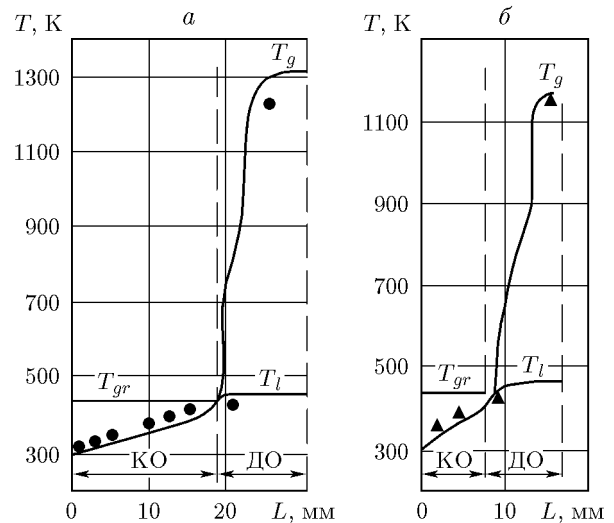


Рис. 4. Расчетный профиль температур по длине слоя катализатора:

T_g — температура газа, T_{gr} — температура катализатора, T_l — температура жидкой фазы; a — $\dot{m}_0 = 37 \text{ г/с}$, b — $\dot{m}_0 = 17 \text{ г/с}$ при постоянном давлении в камере разложения $P = 0.9 \text{ МПа}$; ●, ▲ — экспериментальные данные

катализатора и потока для гидразинового двигателя с номинальной тягой 50 Н при двух значениях расхода гидразина и постоянном давлении в камере разложения. Расчетный профиль температур удовлетворительно совпадает с экспериментальным.

Длина слоя катализатора, необходимого для полного разложения гидразина, которая оценивается по координате достижения максимальной температуры потока, изменяется пропорционально расходу и определяется изменением протяженности кинетической области жидкофазного разложения. Протяженность диффузионной области практически не зависит от расхода. Данный результат получен при условии поддержания постоянного давления в камере разложения.

На практике широко применяются гидразиновые дросселируемые ЖРД с регулируемой тягой. Регулирование тяги достигается путем изменения давления подачи компонентов в камеру сгорания и изменения расхода топлива. При работе ЖРД на однокомпонентном топливе может быть реализовано десятикратное регулирование тяги с соответствующим изменением расхода. Согласно данным, представленным на рис. 4, должна измениться и протяженность кинетической области. В действительности ее протяженность при дросселировании практически не изменяется. Объясняется это тем, что при дросселировании в зависимости от расхода давление в камере двигателя изменяется, что согласно закону Клапейрона — Клаузиуса приводит к изменению температуры кипения топлива и, в свою очередь, в соответствии с законом Аррениуса к изменению скорости жидкофазного разложения и, следовательно, протяженности кинетической области в направлении, противоположном влиянию изменения расхода. В результате действия этих разнонаправленных факторов длина слоя катализатора, необходимого для полного разложения топлива при дросселировании, не изменяется.

Математическая модель не содержит описания теплопередачи от горячих слоев катализатора и потока к холодным, но обеспечивает расчет положения возникновения скачка температур катализатора и потока по длине слоя катализатора. Физически возможность пренебречь продольной теплопередачей от горячих слоев к холодным определяется свойствами слоя катализатора и двухфазного потока. В

данной модели рассматривается слой засыпки высокопористого гранулированного катализатора, такие засыпки широко применяются в технике и строительстве в качестве теплоизолятора. В двухфазном потоке в каналах между гранулами катализатора капли топлива не контактируют друг с другом и теплопередача по жидкости отсутствует. Газы являются плохим проводником тепла, поэтому тепловой поток от горячих слоев к холодным не может быть значительным.

Параметрический анализ, проведенный с целью уточнения и выбора эмпирических констант для описания отдельных стадий процесса, показал, что решающее влияние на формирование процесса разложения оказывает константа скорости жидкофазного разложения на катализаторе. Остальные константы тепло-массообмена могут быть выбраны из литературных источников для аналогичных процессов. Константа скорости жидкофазного разложения должна определяться для каждого конкретного топлива и катализатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны физико-химическая модель и математическое описание процесса каталитического разложения эндотермических жидкостей, применяющихся в ракетной технике для ЖРД и газогенераторов в качестве однокомпонентного топлива для получения высокотемпературного газообразного рабочего тела.

Модель без ограничений применима для любых высокоэнергетических жидкостей (однокомпонентных топлив), разлагающихся с большим выделением тепла и газов. Со стороны катализатора для применения модели необходимо выполнение двух обязательных условий: катализатор должен быть капиллярно-пористым телом и должен обеспечивать инициирование разложения топлива при температуре ниже температуры кипения. Основной особенностью модели является описание жидкофазного каталитического разложения однокомпонентного топлива при взаимодействии с двухфазным дискретно-капельным потоком в каналах между гранулами.

В соответствии с моделью в слое катализатора реализуются две основные области процесса: кинетическая и диффузионная.

В кинетической области жидкофазного разложения жидкое топливо смачивает гранулы катализатора и удерживается на них благо-

даря капиллярным силам, возникающим в порах катализатора. В каналах между гранулами катализатора в этой области реализуется двухфазный поток топлива, в котором отдельные капли жидкости переносятся газовой фазой. Жидкофазное разложение топлива завершается на длине слоя, когда количества капель в двухфазном потоке становится недостаточно для смачивания всех гранул катализатора в поперечном сечении слоя. Сформулированы количественные условия прекращения жидкофазного разложения, основанные на сравнении характерного времени разложения капель топлива на гранулах катализатора и характерного времени переноса капель двухфазным потоком.

В диффузионной области протекают процессы испарения капель и разложения паров топлива на катализаторе, которые описываются общеизвестными из теории тепломассообмена зависимостями. Дополнительно в модели реализуется идея вторичного газодинамического дробления капель в двухфазном потоке, что обеспечивает быстрое завершение испарения капель. Для количественного описания дробления принято число Вебера.

Завершение разложения происходит в каналах между гранулами катализатора при высокой температуре в гомогенной области.

Математическая модель не содержит описания теплопередачи от горячих слоев катализатора и потока к холодным. Механизм формирования скачка температуры катализатора представлен как результат изменения характера взаимодействия капель топлива с поверхностью гранул катализатора. Механизм формирования скачка температуры потока описывается как результат изменения структуры двухфазного потока.

Из свойств катализатора наиболее важным параметром является кинетическая активность катализатора в реакции разложения жидкого топлива. Экспериментальное определение константы скорости разложения для каждого вида топлива и катализатора необходимо проводить по методике, исключающей влияние внутренней диффузии топлива по порам катализатора на скорость разложения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет средств бюджета Российского научного центра «Прикладная химия».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Васильев А. П., Кудрявцев В. М., Кузнецов В. А.** Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. — М.: Высш. шк., 1993.
2. **Алемасов В. Е., Дрегагин А. Ф., Тишин А. П.** Теория ракетных двигателей: учеб. пособие / под ред. В. П. Глушко. — М.: Машиностроение, 1989.
3. **Натанзон М. С.** Неустойчивость горения. — М.: Машиностроение, 1986.
4. **Франк-Каменецкий Д. А.** Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1987.

Поступила в редакцию 12.12.2023.

Принята к публикации 07.02.2024.