

## ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ АЭРОВЗВЕСИ АЛЮМИНИЯ В РЕАКТОРЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА ПОРОШКООБРАЗНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

В. И. Малинин, Е. И. Коломин, И. С. Антипин

ОКБ «Зонд», 614010 Пермь, malinin@perm.raid.ru

На основе анализа особенностей горения взвесей металлических порошков разработан способ стабилизации пламени в реакторе синтеза оксидов металлов. Создан и описан экспериментальный реактор, реализующий этот способ. Проведены исследования воспламенения и горения аэровзвеси алюминиевых порошков АСД-1, АСД-4, и подтверждено их надежное воспламенение и устойчивое горение в камере сгорания реактора. Показано, что эффективность сжигания алюминиево-воздушной смеси определяется дисперсностью порошка, условиями смешения потоков и давлением в камере сгорания.

Ключевые слова: алюминий, порошок, аэровзвесь, пламя, стабилизация, горение, синтез, оксид.

### ВВЕДЕНИЕ

В связи с развитием современных технологий возникла потребность в производстве новых порошковых материалов с особыми свойствами — высокой химической чистотой продукта, сферической формой частиц, заданным дисперсным составом, высокой твердостью и тугоплавкостью. Порошки, обладающие такими свойствами, находят применение в производстве сверхпрочной керамики, композиционных материалов, средств полировки, в микроэлектронике и химической промышленности.

В работах [1–4] был предложен новый метод получения высокодисперсных порошков оксидов металлов. Многие металлы (алюминий, магний, титан и др.) при горении в активных газах (кислороде, азоте, диоксиде углерода или их смесях) образуют конденсированные продукты сгорания (оксиды, нитриды, карбиды), обладающие высокой твердостью и тугоплавкостью. Если горение этих металлов происходит в виде газозвеси металлических частиц, то продукты их сгорания получают в газодисперсной форме. Изменяя условия горения (давление, температуру, состав газовой среды, концентрацию дисперсной фазы) и дисперсный состав исходных порошков металлов, можно влиять на форму и структуру частиц продуктов сгорания, их размер, химический и фазовый состав [3, 5–10]. Используя порошкообразный металл и газообразный окислитель высокой чистоты, можно обеспечить высокую химическую чистоту конечного дисперсного продукта.

Следовательно, сжигая распыленные в активном газе порошкообразные металлы, в технологическом реакторе можно синтезировать новые порошковые материалы с особыми свойствами.

Эффективность высокотемпературного синтеза новых порошковых материалов определяется эффективностью сжигания металл-газовых смесей. Однако в сравнении с углеводородными горючими порошки металлов обладают рядом особенностей, затрудняющих организацию их воспламенения и горения. Во-первых, частицы металлов имеют высокую температуру воспламенения ( $T_{ign} > 1000$  К) [5]. Во-вторых, капли металлов обладают большой вязкостью [11, 12] и плохо испаряются даже при повышенных температурах [13] (температура, при которой давление насыщенных паров алюминия существенно, превышает 2000 К). В-третьих, продукты сгорания металлов содержат большую долю конденсированной фазы.

Стабилизация пламени в углеводородовоздушной смеси обычно осуществляется аэродинамической рециркуляцией, при которой тепло продуктов сгорания переносится к свежей смеси обратными потоками вещества, возникающими за плохообтекаемыми телами или при внезапном расширении потока [14, 15]. Из-за вышеперечисленных особенностей стабилизация пламени в потоке металловоздушной смеси традиционными методами малоэффективна: а) в обратных потоках металлическое горючее будет участвовать преимущественно в

конденсированной, а не в газовой фазе; б) капли металла совместно с конденсированными продуктами сгорания будут интенсивно налипать на поверхность стабилизаторов, уменьшая проходное сечение потока и вызывая неустойчивость процессов горения и синтеза оксида; в) повышенная турбулентность, высокая температура, скорость и содержание конденсированной фазы в зоне обратных токов приведут к резкому возрастанию теплового и эрозионного воздействия на элементы конструкции стабилизаторов; г) крупные частицы металла не будут участвовать в движении обратных токов, поэтому их время пребывания в зоне высокой температуры мало и они не успевают воспламениться; д) при срыве с поверхности стабилизаторов налипшего жидкого металла образуются крупные капли, которые также не будут успевать сгорать.

В экспериментах [16, 17] осуществлена стабилизация пламени в потоке аэрозвеси частиц алюминия за счет внезапного расширения потока. Однако из результатов работ [16, 17] и термодинамических свойств алюминия следует, что при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha < 0,4$  и давлении  $p > 0,1$  МПа доля алюминия, находящегося в зоне обратных токов в газовой фазе, не превышает 10 %. Все отрицательные факторы, отмеченные выше, присутствуют в экспериментах [16, 17]. Поэтому длительное и эффективное функционирование описанных там установок проблематично.

Воспламенение и горение металлогазовой смеси в технологическом реакторе синтеза новых порошковых материалов должно осуществляться с высокой эффективностью в течение длительного промежутка времени, в широком диапазоне значений основных параметров, характеризующих условия горения (для изменения свойств целевого продукта необходимо в широких пределах изменять давление, температуру, концентрацию дисперсной фазы).

Таким образом, возникают большие сложности по эффективной организации рабочего процесса в камере сгорания технологического реактора высокотемпературного синтеза оксидов, нитридов и карбидов металлов.

## 1. ОРГАНИЗАЦИЯ ГОРЕНИЯ МЕТАЛЛОГАЗОВОЙ СМЕСИ

Новый подход к организации рабочего процесса в камере сгорания металловоздушной смеси следует искать в особенностях процессов

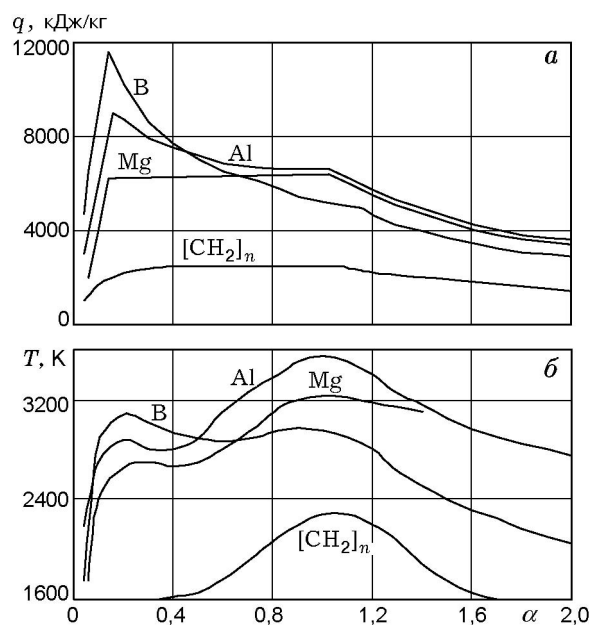


Рис. 1. Влияние коэффициента избытка воздуха на тепловыделение (а) и термодинамическую температуру продуктов сгорания (б) аэрозвесей:

$$T_0 = 300 \text{ K}, p = 0,1 \text{ МПа}$$

воспламенения и горения металлических горючих. На основе их анализа авторами был разработан способ стабилизации пламени в потоке аэрозвеси металлических порошков [18], который, с одной стороны, не требует наличия в потоке плохообтекаемых тел (или внезапного расширения потока), а с другой — обеспечивает необходимую устойчивость пламени. Суть этого метода состоит в следующем.

Поток воздуха делится на первичный поток (меньшая часть) и вторичный поток (большая часть). В первичный поток подается все горючее, смешивается с ним, воспламеняется и частично сгорает, затем смешивается со вторичным потоком и догорает. В первичном потоке  $\alpha_1 < 1$ , во вторичном —  $\alpha_2 \geq 1$ . При уменьшении доли первичного потока до минимально необходимой обеспечивается низкоскоростное течение металловоздушной смеси с естественной стабилизацией пламени. Здесь возникает опасение, что при значительном уменьшении доли первичного потока значение  $\alpha_1$  может уменьшиться настолько, что распространение пламени будет исключено (по углеводородным смесям при  $\alpha < 0,3$  пламя не распространяется [15]). Однако металлические горючие обладают уникальной способностью — гореть при

очень низких значениях коэффициента избытка воздуха [19]. В этом можно убедиться уже на уровне термохимического анализа реагирования металлов с воздухом. Из данных рис. 1, а следует, что тепловыделение в реакции металлов с воздухом (на единицу массы продуктов сгорания) при  $\alpha = 1$  в 2–3 раза, а при  $\alpha < 0,3$  в 4–6 раз выше, чем в реакции углеводородов с воздухом. Повышенное тепловыделение при низких коэффициентах избытка воздуха (расчитанных по кислороду) обусловлено специфической для металлов экзотермической реакцией азотирования [19, 20].

Термодинамический анализ горения металлов в воздухе указывает на высокие температуры продуктов сгорания при низких значениях  $\alpha$  (рис. 1, б), что можно было ожидать по результатам термохимического анализа. Факты реализации реакции азотирования металлов сообщают авторы работ [19, 21, 22]. Экзотермическая реакция азотирования характерна только для металлических или металлосодержащих горючих. Для углеводородных горючих такая реакция отсутствует, что и обуславливает сравнительно малое тепловыделение в процессе реакции этих горючих с воздухом при низких значениях  $\alpha$ . При этом термодинамическая температура горения углеводородов существенно ниже, чем металлов ( $T < 1600$  К при  $\alpha < 0,3$ , см. рис. 1, б). В связи с этим пламя по углеводородовоздушным смесям при таких значениях  $\alpha$  не распространяется.

Для стабилизации пламени в потоке горючей смеси очень важна зависимость скорости распространения пламени  $U_f$  от коэффициента избытка окислителя. В гомогенных смесях горючих газов с воздухом максимальное значение  $U_f$  наблюдается при коэффициентах избытка воздуха, близких к единице [23]. В аэрозвесьях капель углеводородов эта закономерность сохраняется ( $U_f = U_f^{\max}$  при  $\alpha = 0,7 \div 0,9$  [14, 15]). Эти экспериментальные данные соответствуют теоретическим представлениям, согласно которым при  $\alpha = 1$  в указанных смесях тепловыделение, температура и нормальная скорость распространения пламени принимают максимальные значения [24]. Однако в металлвоздушных смесях физико-химическая ситуация иная и  $U_f \rightarrow U_f^{\max}$  при  $\alpha \ll 1$ . В экспериментах [19, 25–27] скорость распространения пламени в аэрозвесьях порошков алюминия и магния возрастает по мере уменьшения коэффициента избытка воздуха (вплоть до

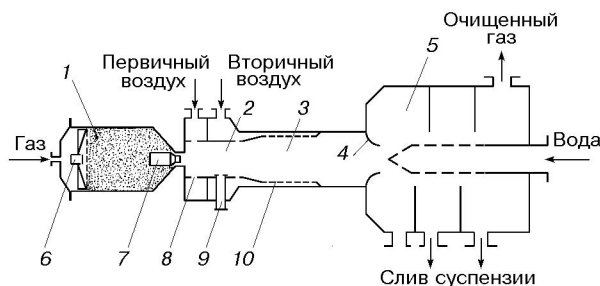


Рис. 2. Схема экспериментального реактора:

1 — система подачи порошков металлов, 2 — форкамера, 3 — камера сгорания с соплом 4, 5 — устройство отбора дисперсных оксидов из двухфазного высокотемпературного потока, 6 — перепадный клапан поршня, 7 — запорно-регулирующий клапан, 8 — распределитель первичного воздуха, 9 — воспламенитель, 10 — распределитель вторичного воздуха

$\alpha = 0,1 \div 0,2$ ). Смещение максимума функции  $U_f(\alpha)$  в сторону очень низких значений  $\alpha$  может объясняться отмеченной выше экзотермической реакцией азотирования металлов и особенностями процессов тепло- и массообмена в богатых металлвоздушных смесях [19]. Кроме того, с уменьшением  $\alpha$  увеличивается искривление фронта пламени, что приводит к увеличению его поверхности и, следовательно, скорости горения [27]. Смещение максимума зависимости  $U_f(\alpha)$  в сторону переобогащенной аэрозвеси согласуется также с результатами теоретических исследований [28, 29]. Таким образом, изложенные выше особенности горения переобогащенных металлвоздушных смесей позволяют реализовать горение при низких скоростях первичного потока и практически любой дозвуковой скорости основного потока и тем самым обеспечить надежную стабилизацию пламени в широких диапазонах значений параметров.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Для исследования процессов высокотемпературного синтеза порошков оксидов металлов создан экспериментальный реактор технологического горения аэрозвеси металлов [1–3]. На рис. 2 представлена схема экспериментального реактора, включающего систему подачи порошков металлов, форкамеру, камеру сгорания (синтеза) с соплом, устройство отбора дисперсных оксидов из двухфазного высокотемпературного потока.

Система подачи предназначена для подачи в форкамеру порошков металлов с заданным

расходом и состоит из бака с порошком, проникаемого для газа поршня с перепадным клапаном и запорно-регулирующего клапана с приводом. В бак через проникаемый поршень подается газ, переводящий порошок в псевдооживленное состояние. Затем газ подается в привод, перемещением запорно-регулирующего клапана открывается выпускное отверстие в баке и порошково-газовая смесь истекает из отверстия. В качестве транспортирующего порошок газа использовался азот. При давлении азота в баке перед отверстием, не превышающем 3,5 МПа, его массовый расход не превышал 1,5 % расхода порошка.

Расход порошка металла  $G_p$  регулируется перемещением запорно-регулирующего клапана. Экспериментальная зависимость  $G_p$  от параметров выпускного отверстия и режимов подачи с погрешностью не более 1 % аппроксимируется формулой

$$G_p = k F_{ex} \sqrt{p_{ex}}, \quad 2,5 \leq p_{ex} \leq 3,5 \text{ МПа}, \quad (1)$$

где  $F_{ex}$  — площадь проходного сечения выпускного отверстия (пропорциональна перемещению клапана),  $p_{ex}$  — давление газа в баке перед выпускным отверстием,  $k$  — коэффициент пропорциональности. Устойчивость расхода порошка, его постоянство или надежность регулирования по заданному закону подтверждены большим количеством испытаний.

**Форкамера** предназначена для смешения порошка (истекающего из выпускного отверстия системы подачи) с первичным воздухом (поступающим из баллонной ramпы), воспламенения и первичного горения образованной металловоздушной смеси. Форкамера состоит из узла распыла, распределителя первичного воздуха, воспламенителя и корпуса. Распыление порошкообразного металла осуществляется следующим образом. Поток порошка, проходя через запорно-регулирующий клапан, разделяется на несколько равных потоков, которые ускоряются независимо друг от друга. Затем потоки порошка получают необходимое направление и сталкиваются в точке, лежащей на продольной оси форкамеры. При этом происходит торможение частиц металла и увеличивается угол раскрытия результирующей струи. Необходимые скорость частиц после их торможения и угол раскрытия результирующего потока можно получить подбором угла между направлениями отдельных потоков порошка. Конструкция узла распыла обеспечивает

низкую скорость частиц металла ( $< 10$  м/с) и их равномерную концентрацию в поперечном сечении форкамеры, что подтверждено измерением скорости частиц специальным датчиком и результатами пробоотбора. Корпус форкамеры изнутри облицован оргстеклом.

**Камера сгорания (синтеза)** предназначена для смешения воспламенившейся металловоздушной смеси (истекающей из форкамеры) с вторичным воздухом (поступающим из баллонной ramпы), сжигания образованной вторичной смеси и синтеза оксида с заданными свойствами. Камера сгорания состоит из корпуса, сопла и распределителя вторичного воздуха. Конструкция распределителя обеспечивает ввод вторичного воздуха как в одном, так и в двух и более сечениях по длине камеры в зависимости от требований технологического процесса. Корпус камеры и сопло изнутри облицованы графитом.

**Устройство отбора** предназначено для выделения конденсированного оксида металла из двухфазного высокотемпературного потока (истекающего из сопла) и состоит из корпуса, узла подвода и распыла воды, перегородок и патрубков для отвода очищенного газа и слива суспензии. Через узел подвода и распыла подается вода, которая распыляется перпендикулярно и вдоль продольной оси реактора (навстречу двухфазному потоку). Поток, проходя сквозь распыленную воду, тормозится, охлаждается и очищается от конденсированной фазы. Очищенный газ выходит из устройства через верхний патрубок в атмосферу. Образовавшаяся суспензия (смесь воды и дисперсного оксида металла) сливается через нижние патрубки в специальные емкости. Эффективность отбора оксида металла увеличивается при установке перегородок, перпендикулярных продольной оси устройства.

**Система измерения** обеспечивает измерение и непрерывную запись параметров реактора во время испытания. Измеряемые параметры дают возможность определить расходы воздуха, перемещение запорно-регулирующего клапана, параметры газа на входе в реактор, перед выпускным отверстием системы подачи, в воспламенителе, форкамере, камере сгорания и устройстве отбора оксида. По перемещению клапана и параметрам газа перед выпускным отверстием по формуле (1) определяется расход порошка. По давлению в камере воспламенителя и известной площади критического

сечения определяются расход воспламенителя и его тепловая мощность. Система измерения позволяет регистрировать давление в рабочей части реактора и в воздушных магистралях с предельной погрешностью 1,5 %, массовые расходы воздуха и порошка металла — с точностью  $\leq 3$  %, а расход воспламенителя — не более 10 %.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На экспериментальном реакторе исследовались процессы воспламенения и горения взвесей порошков алюминия с отбором конденсированной фазы из потока продуктов сгорания. В экспериментах определяли область надежного зажигания первичного потока горючей смеси, область стабилизации пламени и устойчивого горения первичного и вторичного потоков смеси, коэффициент камеры сгорания [30] в зависимости от параметров процесса горения, химический, фазовый и дисперсный составы конденсированных продуктов, выделенных из двухфазного потока в устройстве отбора. Использовались порошки алюминия промышленных марок АСД-1 и АСД-4, существенно отличающиеся размером частиц [31].

Параметры реактора варьировались в широких пределах: расход порошка алюминия —  $0,1 \div 2,0$  кг/с, расход воздуха —  $1 \div 10$  кг/с, давление в камере сгорания —  $0,1 \div 1,5$  МПа, коэффициент избытка первичного воздуха —  $0,04 \div 1,8$ , коэффициент избытка вторичного воздуха —  $1 \div 10$ , температура в камере сгорания —  $1000 \div 3500$  К, скорость холодного потока (начальная скорость) воздуха в форкамере —  $1 \div 50$  м/с, скорость высокотемпературного потока в камере сгорания —  $50 \div 500$  м/с. Коэффициент избытка воздуха рассчитывали по отношению измеренных расходов компонентов, а скорость потока в камере — как среднюю скорость в поперечном сечении (с учетом измеренной или рассчитанной температуры потока).

Испытание проводилось следующим образом. Предварительно в бак с металлическим порошком подается газ (см. рис. 2). По команде «пуск» включается подача первичного и вторичного воздуха. После выхода воздушного потока в камере на установившийся режим включается система зажигания (воспламенитель) и открывается запорно-регулирующий клапан системы подачи металлического порошка, одновременно подается вода в устройство отбо-

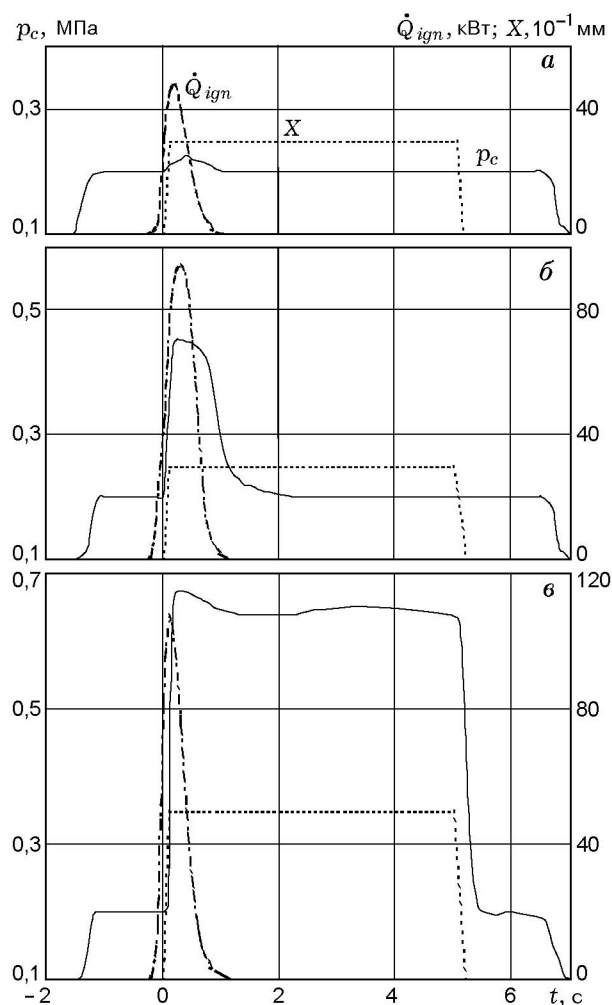


Рис. 3. Осциллограмма пуска экспериментального реактора:

*а* — зажигания нет, *б* — зажигание есть, срыв пламени, *в* — зажигание и устойчивое горение

ра конденсированных продуктов. Порошок поступает в камеру воспламенения, смешивается с первичным воздухом и образует первичную горючую смесь, которая воспламеняется. После появления основного пламени через заданный промежуток времени ( $0,2 \div 2$  с) система зажигания отключается. В дальнейшем происходит самовоспламенение смеси. Испытание прекращается закрытием запорно-регулирующего клапана и отключением подачи (через некоторый промежуток времени) первичного, вторичного воздуха и воды в устройстве отбора.

Факт зажигания смеси, распространение пламени и устойчивость горения устанавливаются по характеру изменения давления в камере сгорания  $p_c$ . Типичные осциллограм-

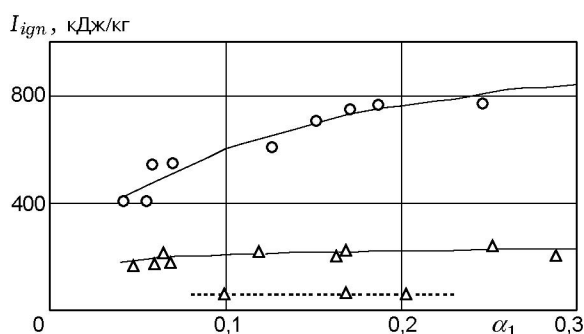


Рис. 4. Минимальная удельная энтальпия, необходимая для воспламенения первичной смеси, в зависимости от коэффициента избытка воздуха:

○ — АСД-1, △ — АСД-4; сплошные линии — критическое, пунктирная — докритическое истечение зажигающего газа,  $p_{c,1} = 0,15 \div 0,3$  МПа,  $V_{0,1} = 5 \div 25$  м/с (АСД-1),  $5 \div 50$  м/с (АСД-4),  $V_{0,2} = 50 \div 100$  м/с

мы пуска реактора представлены на рис. 3 (здесь  $\dot{Q}_{ign}$  — тепловая мощность системы зажигания,  $X$  — перемещение запорно-регулирующего клапана).

### 3.1. Зажигание

В камере воспламенения технологического реактора может быть использовано два способа зажигания металловоздушной смеси: электрической дугой и факелом высокотемпературных продуктов сгорания воспламенителя. В данной работе применен второй способ. В качестве воспламеняющего состава брали заряд смесового топлива. Варьированием поверхности горения заряда и его формы в широких пределах изменялись расход воспламенителя (более чем в 10 раз) и соответственно его тепловая мощность. Продукты сгорания с температурой более 3000 К истекали из воспламенителя (как в критическом, так и в докритическом режиме) перпендикулярно первичному потоку.

Исследовалась зависимость минимального значения удельной энтальпии, необходимой для воспламенения аэровзвеси алюминиевых порошков ( $I_{ign}$ , далее называем просто энтальпией воспламенения), от основных параметров первичного потока: давления  $p_{c,1}$ , коэффициента избытка воздуха  $\alpha_1$  и начальной скорости  $V_{0,1}$ . Оказалось, что энтальпия воспламенения в интервале значений  $p_{c,1} = 0,15 \div 0,4$  МПа,  $\alpha_1 = 0,04 \div 0,30$ ,  $V_{0,1} = 5 \div 20$  м/с (АСД-1) и  $V_{0,1} = 10 \div 50$  м/с (АСД-4) практически не за-

висит от давления и начальной скорости потока. Определяющее влияние на воспламенение алюминиево-воздушной смеси оказывает дисперсность алюминиевого порошка и режим истечения зажигающего газа, более слабое — коэффициент избытка воздуха (рис. 4). Энтальпия воспламенения взвеси мелкодисперсного порошка АСД-4 в 2,5 ÷ 4 раза меньше, чем крупнодисперсного порошка АСД-1. При докритическом режиме истечения энтальпия воспламенения взвеси АСД-4 в четыре раза меньше, чем при критическом. Взвесь АСД-1 при докритическом режиме не воспламенялась. Увеличить мощность воспламенителя и добиться воспламенения АСД-1 при докритическом режиме не удалось из-за конструктивных ограничений.

Значения энтальпии воспламенения и характер ее зависимости от основных параметров отражают особенности процесса воспламенения аэровзвеси порошков алюминия. Оценки показывают, что энтальпия воспламенения аэровзвеси порошка АСД-4 не может обеспечить одновременное зажигание всей взвеси, так как температура взвеси ( $< 1000$  К) ниже температуры воспламенения ( $\geq 1000$  К [32]). Очевидно, при воспламенении сначала образуется очаг пламени, от которого затем пламя распространяется на весь поток. При критическом истечении зажигающего газа за счет сильной турбулизации потока тепло интенсивно распределяется по всему объему, что затрудняет образование очагов пламени. При докритическом истечении горячего газа распределение тепла по объему идет медленнее, условия для образования очагов более благоприятны и на это требуется гораздо меньше тепла. Поэтому энтальпия воспламенения взвеси АСД-4 при докритическом режиме намного меньше, чем при критическом (см. рис. 4).

Зажигание аэровзвеси порошка АСД-1 идет по другому механизму. Нормальная скорость пламени во взвеси АСД-1 намного меньше, чем в АСД-4 [26, 28]. Поэтому пламя из отдельных очагов за время пребывания в форкамере не успевает распространиться на весь объем. Очаги пламени, которые не гаснут в форкамере, попадают в камеру сгорания, где скорость потока на порядок выше и тем более нет условий для воспламенения смеси. Экспериментальные данные показывают, что зажигание взвеси АСД-1 осуществляется только при такой энтальпии воспламенения (см. рис. 4), при которой практически во всем объ-

еме, а не в отдельных очагах выполняется условие воспламенения смеси. Оценочные расчеты показывают, что температура газа во всей взвеси при равномерном распределении подведенного тепла по объему достигает  $1500 \div 2000$  К. Такая температура намного превышает предельную для воспламенения мелких частиц (размером не больше 6 мкм,  $T_{ign} < 1500$  К [33]). Воспламенившаяся фракция мелких частиц успевает сгореть (суммарное время задержки воспламенения и горения  $< 1$  мс) и нагреть до воспламенения всю взвесь (время пребывания крупных частиц в форкамере  $> 10$  мс, время воспламенения  $< 5$  мс) [5, 34]. Таким образом, определяющим процессом при зажигании взвеси порошка АСД-4 является перенос тепла от одного элемента объема к другому, а при зажигании АСД-1 — от более мелкой фракции частиц к более крупной.

В случае стабилизации пламени традиционными методами (за счет образования зоны обратных токов) может наблюдаться очаговое воспламенение и во взвеси АСД-1. В зоне обратных токов формируются благоприятные условия для существования очагов пламени и последующего воспламенения свежих порций смеси. Поэтому энтальпия воспламенения при наличии обратных токов достаточной интенсивности должна быть намного меньше, чем при их отсутствии.

### 3.2. Стабилизация пламени. Устойчивость горения

В испытаниях экспериментального реактора была достигнута стабилизация пламени в потоке алюминиево-воздушной смеси в широком диапазоне изменения параметров форкамеры. Изменение давления в интервале  $p_{c,1} = 0,1 \div 0,3$  МПа не оказывало существенного влияния на скорость срыва пламени. По результатам испытаний в координатах  $\alpha_1 - V_{0,1}$  построены области стабилизации пламени в первичном потоке аэровзвеси порошков АСД-1 и АСД-4 (рис. 5). Достаточно строго была определена граница области только для порошка АСД-1 (при  $\alpha_1 > 0,06$ ), для которого построена зависимость скорости срыва пламени от коэффициента избытка воздуха ( $U_f^*(\alpha_1)$ ). Область под кривой (сплошная линия) соответствует устойчивому процессу горения, над кривой — срыву пламени. Для взвеси АСД-4 (и АСД-1 при  $\alpha_1 < 0,06$ ) границы области строго не определены, так как в испытаниях не удалось полу-

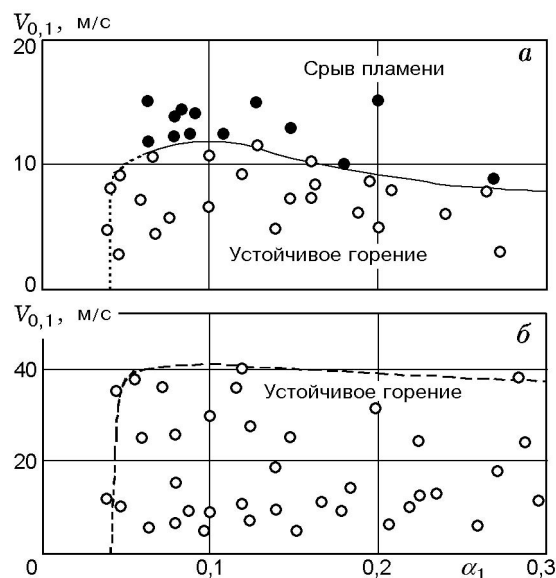


Рис. 5. Область устойчивого горения первичного потока аэровзвеси порошков АСД-1 (а) и АСД-4 (б):

$p_{c,1} = 0,1 \div 0,3$  МПа,  $V_{0,2} = 50 \div 500$  м/с,  $\circ$  — устойчивое горение,  $\bullet$  — срыв пламени

чить срыва пламени. Поэтому граница, проведенная штриховой линией, соответствует максимальным достигнутым в испытаниях значениям скорости первичного потока, при которых наблюдается устойчивое горение. Реальное значение скорости срыва пламени  $U_f^*$  может быть и выше.

Из анализа рис. 5 следует, что пламя устойчиво существует в аэровзвеси порошков АСД-1 и АСД-4 вплоть до значения  $\alpha_1 = 0,04$ . Для АСД-1 зависимость  $U_f^*(\alpha_1)$  имеет максимум в интервале значений  $\alpha_1 = 0,08 \div 0,12$ . Срыв пламени во взвеси АСД-4 должен наступать при скорости потока, по крайней мере, в 3–4 раза большей скорости срыва пламени во взвеси АСД-1. Результаты испытаний по стабилизации пламени хорошо согласуются с результатами по зажиганию. Дисперсность порошков влияет на их воспламенение, так же как она влияет на стабилизацию пламени.

Сравнение результатов испытаний по закономерности распространения пламени с литературными данными [25–28] показывает их качественное совпадение. С уменьшением коэффициента избытка воздуха вплоть до значений  $\alpha_1 \approx 0,1$  скорость  $U_f$  существенно возрастает [25–27]. С увеличением давления в интервале  $p_{c,1} = 0,1 \div 0,3$  МПа скорость  $U_f$  возрастает

ет незначительно (на 8 % или 25 % [28]). В работе [28] расчетами установлено, что уменьшение размера частиц алюминия от 25 мкм (средний размер АСД-1) до 9 мкм (АСД-4) [31] приводит к увеличению скорости распространения пламени в четыре раза.

Исследовалось влияние параметров камеры сгорания на устойчивость горения алюминиево-воздушной смеси. В испытаниях экспериментального реактора изменялись в широких пределах параметры вторичного потока: коэффициент избытка воздуха ( $\alpha_2 = 1 \div 10$ ), режим подвода вторичного воздуха (критический, докритический), скорость высокотемпературного вторичного потока ( $V_{0,2} = 50 \div 500$  м/с), давление ( $p_c = 0,15 \div 1,5$  МПа). Во всех испытаниях наблюдалось устойчивое горение взвеси порошков АСД-1 и АСД-4. Изменение давления в камере соответствовало изменению расходов компонентов (алюминия и воздуха). Время непрерывной работы реактора в некоторых испытаниях превысило 100 с. При этом элементы конструкции форкамеры и камеры сгорания сохранили свою работоспособность.

Таким образом, испытания показали, что устойчивость горения алюминиево-воздушной смеси в экспериментальном реакторе полностью определяется устойчивостью процессов в форкамере, зависит от параметров первичного потока ( $\alpha_1, V_{0,1}$ ) и не зависит от параметров вторичного ( $\alpha_2, V_{0,2}, p_c$ ). Также испытания подтвердили возможность длительного функционирования реактора в широком диапазоне внутрикамерных параметров.

### 3.3. Эффективность горения

В данной работе в качестве оценки эффективности процесса горения используется коэффициент камеры [28, 31]:

$$\varphi_c = p_{t,0}^* F_{\min} / G_{\Sigma} \beta,$$

где  $p_{t,0}^*$ ,  $G_{\Sigma}$  — осредненное по времени давление торможения потока на входе в сопло и суммарный массовый расход компонентов в основном режиме;  $F_{\min}$  — площадь критического сечения сопла;  $\beta$  — теоретическое значение расходного комплекса топливной системы алюминий — воздух. Значение  $\beta$  (рис. 6) определялось термодинамическими расчетами по стандартной программе. В вышеприведенной формуле учтено существенное отличие динамического полного давления  $p_{t,0}^*$  от статического  $p_{t,0}$

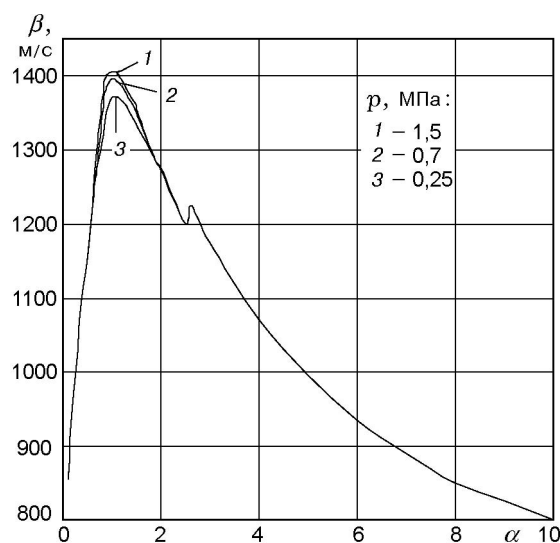


Рис. 6. Зависимость расходного комплекса алюминиево-воздушной смеси от коэффициента избытка воздуха и давления

при больших скоростях потока на входе в сопло ( $> 100$  м/с). В испытаниях непосредственно измерялось значение  $p_{t,0}$ , а  $p_{t,0}^*$  рассчитывалось по газодинамическим функциям.

Результаты испытаний иллюстрирует рис. 7, на котором представлены зависимости коэффициента камеры от давления в камере сгорания, дисперсности порошков и режима подвода вторичного воздуха (критический, соответствующий приведенной скорости воздуха  $\lambda_2 = 1$ , и докритический — при  $\lambda_2 \ll 1$ ) в воспламенившийся поток. Давление в камере при больших скоростях значительно изменяется вдоль потока, поэтому под значением  $p_c$  понимается среднее значение давления в камере:

$$p_c \approx (p_{c,0} + p_{t,0})/2,$$

где  $p_{c,0}$  — давление в начале камеры.

Из анализа рис. 7 следует, что значение  $\varphi_c$  при  $p_c \leq 0,7$  МПа (порошок АСД-1) и  $p_c \leq 0,3$  МПа (АСД-4) увеличивается с ростом давления, а при  $p_c > 0,7$  МПа (АСД-1) и  $p_c > 0,3$  МПа (АСД-4) изменяется мало; коэффициент  $\varphi_c$  больше при критическом подводе вторичного воздуха, чем при докритическом; значение  $\varphi_c$  уменьшается при уменьшении дисперсности горючего.

Увеличение коэффициента камеры (соответственно коэффициента полноты сгорания



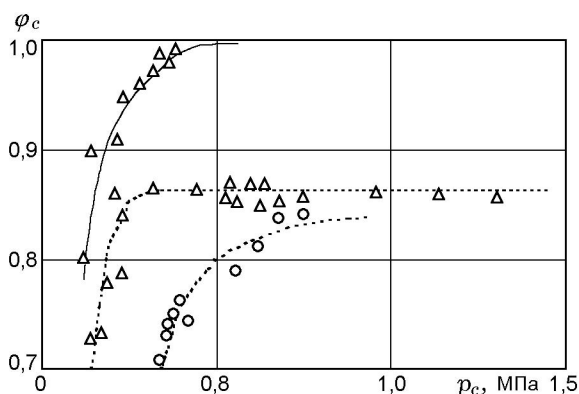


Рис. 7. Зависимость коэффициента камеры сгорания экспериментального реактора от давления:

○ — АСД-1, △ — АСД-4, сплошная линия — критический режим подвода вторичного воздуха,  $\lambda_2 = 1$ , пунктирные — докритический,  $\lambda_2 \ll 1$ ,  $\alpha_1 = 0,1 \div 0,2$ ,  $\alpha_2 = 2,4 \div 4,8$ ,  $V_{0,1} = 1 \div 5$  м/с,  $V_{0,2} = 50 \div 500$  м/с,  $L_c = 0,9$  м

аэрозвеси частиц алюминия) с ростом давления и уменьшением размера частиц алюминиевых порошков согласуется с результатами экспериментов [31] и хорошо объясняется увеличением скорости горения частиц алюминия при увеличении давления и уменьшении их размера [5, 34]. Увеличение  $\varphi_c$  при критическом подводе вторичного воздуха вызвано лучшим перемешиванием потоков при критическом истечении газа.

Дисперсность выделенных в устройстве отбора продуктов сгорания определялась по методике [6, 7]. Были получены крупнодисперсная ( $d \geq 4$  мкм) и мелкодисперсная ( $d < 4$  мкм) фракции [1, 3]. Размер практически всех исходных частиц порошков алюминия (АСД-1 и АСД-4) больше 4 мкм. При горении в среде с содержанием кислорода  $m_{ox} > 10$  % (среднее значение  $m_{ox}$  в камере сгорания равно  $15 \div 18$  %) размер частиц меняется незначительно [34] и все несгоревшие частицы алюминия попадают в крупнодисперсные продукты. Поэтому массовая доля крупнодисперсной фракции ( $\sigma$ ) дает верхнюю оценку несгоревшей доли алюминия.

Значения полноты сгорания ( $\varphi_{com}$ ) аэрозвеси порошка АСД-1 при докритическом подводе воздуха и АСД-4 при критическом подводе, полученные расчетом по коэффициенту камеры ( $\varphi_{com} \sim \varphi_c^n$ ,  $n = 2 \div 3$ ), согласуются с результатами химического, рентгеноструктурного и дисперсного анализа (таблица). Неожиданным

оказалось сравнение значений  $\varphi_{com}$  с результатами химического, рентгеноструктурного и дисперсного анализа для горения взвеси АСД-4 при докритическом подводе воздуха. Все виды анализа показали малое количество свободного алюминия в продуктах сгорания ( $m_{Al} < 1$  % массы по результатам химического анализа и  $m_{Al} < 3$  % по результатам дисперсного и рентгеноструктурного анализа), хотя по результатам определения коэффициента камеры  $\varphi_c$  его доля должна быть больше 30 %. Отсюда следует вывод: отличие значений  $\varphi_c$  от единицы в этом случае связано не с недогоранием частиц алюминия (они полностью сгорели), а с большой температурной и химической неравновесностью в потоке. При докритическом подводе вторичного воздуха из-за плохого перемешивания компонентов в потоке в зоне горения частиц образуется среда с высокой температурой, низким содержанием кислорода и высоким содержанием ( $> 30$  % исходной массы алюминия) продуктов испарения (Al, Al<sub>2</sub>O, AlO), которые за время пребывания в камере сгорания так и не успевают перемешаться с воздухом и вступить в реакцию с кислородом. Этот вывод подтверждается также результатами работы [10], где показано, что оксид с низким содержанием крупнодисперсной фракции ( $< 5$  %) образуется только при горении частиц алюминия в высокотемпературной среде ( $T > 3000$  К) с низким содержанием кислорода ( $m_{ox} < 1$  %).

## ВЫВОДЫ

1. Особенности горения переобогащенных металловоздушных смесей позволяют организовать надежное воспламенение и устойчивое горение в широком интервале параметров камеры сгорания металлических горючих (коэффициента избытка воздуха, давления, скорости потока) без применения специальных, стабилизирующих пламя устройств.

2. С учетом особенностей горения металловоздушных смесей создан экспериментальный реактор, в котором можно исследовать в широком интервале параметров воспламенение и горение металлических порошков и синтез порошкообразных оксидов металлов.

3. Испытания экспериментального реактора с использованием алюминиевых порошков (АСД-1 и АСД-4) подтвердили возможность длительного функционирования установки, надежное воспламенение и устойчивое горение

Порошок	$p_c$ , МПа	$\lambda_2$	Результаты анализа				
			Дисперсный	Химический	Термодинамический	Рентгеноструктурный	
			$\sigma$ , %	$m_{Al}$ , %	$\varphi_{com}$ , %	Крупнодисперсная фракция	Мелкодисперсная фракция
АСД-1	0,2 ÷ 0,7	$\ll 1$	45 ÷ 65	30 ÷ 50	40 ÷ 60	Al и $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
АСД-4	0,2 ÷ 0,6	$\ll 1$	2 ÷ 3	< 1	65 ÷ 70	$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
АСД-4	0,2 ÷ 0,3	1	12 ÷ 14	1 ÷ 10	80 ÷ 95	Al и $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
АСД-4	0,3 ÷ 0,4	1	5 ÷ 33	$\approx 1$	95 ÷ 99	$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

алюминиево-воздушной смеси в широком диапазоне параметров: давление — 0,1 ÷ 1,5 МПа, скорость вторичного потока — 50 ÷ 500 м/с, коэффициент избытка воздуха — 1 ÷ 10.

4. Испытания показали, что устойчивость горения алюминиево-воздушной смеси полностью определяется устойчивостью процессов в форкамере, зависит от параметров первичного потока ( $\alpha_1$ ,  $V_{0,1}$ ) и не зависит от параметров вторичного потока ( $\alpha_2$ ,  $V_{0,2}$ ).

5. Устойчивое пламя в первичной смеси получено при  $\alpha_1 = 0,04 \div 0,3$  и скоростях потока аэрозвеси порошков алюминия 1 ÷ 12 м/с (АСД-1) и 1 ÷ 40 м/с (АСД-4).

6. Эффективность сжигания алюминиево-воздушной смеси возрастает с увеличением давления в камере сгорания, уменьшением размера частиц и увеличением скорости подвода вторичного воздуха в поток горячей аэрозвеси.

7. При неудовлетворительном смешении вторичного воздуха с горячей аэрозвесью порошка АСД-4 истекающие из сопла реактора продукты сгорания содержат большое количество (> 30 % массы исходного алюминия) продуктов испарения частиц и малое количество (< 3 % массы всего оксида) крупнодисперсной конденсированной фазы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kolomin E. I., Malinin V. I., Obrosov A. A. High-temperature synthesis of alumina powder in a reactor for technological combustion of air/aluminium mixture // Intern. Conf. on Combustion (ICOC-93). Moscow — St-Petersburg, Russia, 21–26 June 1993. Izhevsk, 1996. P. 86–90.
2. Малинин В. И., Коломин Е. И., Антипин И. С., Обросов А. А. Получение СВС-оксидов и нитридов в газе // Научно-технические разработки в области СВС: Спра-

вочник / Под общей ред. акад. А. Г. Мержанова. Черноголовка: ИСМАН, 1999. С. 149–151.

3. Коломин Е. И., Малинин В. И., Обросов А. А. Влияние условий смешения и горения аэрозвеси алюминия на дисперсный состав продуктов сгорания: Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем // Международная школа-семинар, С.-Петербург. 20–24 июня 1995: Сб. материалов. С.-Петербург, 1995. С. 136–141.
4. Zolotko A. N., Vovchuk J. I., Poleyev N. I., et al. Combustion synthesis of nano-disperse oxides on two-phase laminar flames // Intern. Conf. on Combustion: Abstract. Moscow — St-Petersburg, 21–26 June 1993. Izhevsk, 1996. P. 13.
5. Горение порошкообразных металлов в активных средах / П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев, Ю. В. Фролов и др. М.: Наука, 1972.
6. Гусаченко Е. И., Стесик Л. Н., Фурсов В. П., Шевцов В. И. Исследование конденсированных продуктов горения магниевых порошков. I. Зависимость от давления // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 4. С. 548–554.
7. Гусаченко Е. И., Стесик Л. Н., Фурсов В. П., Шевцов В. И. Исследование конденсированных продуктов горения магниевых порошков. II. Зависимость от размера частиц // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 5. С. 669–676.
8. Лукин А. Я., Степанов А. М. Расчет дисперсности продуктов сгорания металлической частицы // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 3. С. 41–50.
9. 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.
10. Малинин В. И., Коломин Е. И., Антипин И. С. Влияние параметров окисляющей среды на процесс накопления оксида на поверхности горящих частиц алюминия // Международная конференция по внутрикамерным про-

- цессам и горению: Проблемы конверсии и экологии энергетических материалов (ИСОС-96). Россия, С.-Петербург, 3–7 июня 1996: Сб. материалов. Ижевск: ИПМ УрО РАН, 1997. Ч. 1. С. 33–39.
11. **Физические** величины: Справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др. / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова М.: Энергоатомиздат, 1991.
  12. **Справочник** металлурга по цветным металлам. Производство алюминия. М.: Металлургия, 1971.
  13. **Термодинамические** свойства индивидуальных веществ / Под ред. В. П. Глушко М.: Наука, 1981. Т. 3, кн. 2.
  14. **Талантов А. В.** Горение в потоке. М.: Машиностроение, 1978.
  15. **Физические** основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей / Б. В. Раушенбах, С. А. Белый, И. В. Беспалов и др. М.: Машиностроение, 1964.
  16. **Егоров А. Г., Мигалин К. В., Ниязов В. Я. и др.** Сжигание мелкодисперсного порошка алюминия в потоке воздуха // Хим. физика. 1990. Т. 9, № 12. С. 1633–1635.
  17. **Ягодников Д. А., Сухов А. В.** Визуализация и анализ изображений турбулентного горения аэрозвеси алюминия // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение: Тез. докл. X Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. Черноголовка, 1992. С. 99–100.
  18. **Малинин В. И., Коломин Е. И., Антипин И. С.** Организация воспламенения и горения металлических порошков в потоке активных газов // Российская межвузовская и межотраслевая научно-техническая конференция «Ракетно-космические двигательные установки»: Тез. выступлений (октябрь 1998 г., Москва). М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. С. 29.
  19. **Ягодников Д. А., Сухов А. В., Малинин В. И., Кирьянов И. М.** Роль реакции азотирования в распространении пламени по переобогащенным металловоздушным смесям // Вестн. МГТУ. Сер. Машиностроение. 1990. № 1. С. 121–124.
  20. **Хайлов В. М.** О возможности использования в воздушно-реактивных двигателях химической энергии соединения металлов с азотом воздуха // Ф. А. Пандер и современная космонавтика. М.: Наука, 1976. С. 87–94.
  21. **Попов Е. И., Великанова В. П.** Воспламенение алюминиево-магниевого порошков в азоте // Физика аэродисперсных систем. Киев; Одесса: Вища шк., 1982. Вып. 24. С. 48–50.
  22. **Алексеев А. Г., Судакова И. В., Циделко Т. И.** Экспериментальные исследования динамики взаимодействия кислорода с металлами при взрывах аэрозвесей металлических порошков // Физика аэродисперсных систем. Киев; Одесса: Вища шк., 1986. Вып. 30. С. 20–24.
  23. **Бахман Н. Н., Беляев А. Ф.** Горение гетерогенных конденсированных систем. М.: Наука, 1967.
  24. **Франк-Каменецкий Д. А.** Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987.
  25. **Алексеев А. Г., Судакова И. В.** Скорость распространения пламени в аэрозвесах металлических порошков // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 5. С. 34–36.
  26. **Кудрявцев В. М., Сухов А. В., Воронежский А. В. и др.** Распространение фронта химической реакции в двухфазном потоке // Высокотемпературные газовые потоки, их получение и диагностика. Харьков: ХАИ, 1986. Вып. 4. С. 66–69.
  27. **Ягодников Д. А., Воронежский А. В., Лапицкий В. И.** Распространение пламени по аэрозвеси алюминия при пониженных давлениях // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 5. С. 23–31.
  28. **Ягодников Д. А., Воронежский А. В.** Влияние скоростной неравномерности на особенности распространения ламинарного пламени в аэродисперсной среде // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 5. С. 38–44.
  29. **Андреев М. А., Степанов А. М.** Моделирование распространения нестационарного турбулентного пламени по аэрозвеси металлических частиц // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 6. С. 37–46.
  30. **Васильев А. П., Кудрявцев В. М., Кузнецов В. А. и др.** Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. М.: Высш. шк., 1983.
  31. **Бобров А. Н., Ягодников Д. А., Попов И. В.** Воспламенение и горение двухкомпонентной газозвеси порошкообразного горючего и окислителя // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 5. С. 3–7.
  32. **Афанасьев С. Н., Жарков В. Ю., Озеров Е. С.** Воспламенение и горение газозвеси частиц алюминия // Физика аэродисперсных систем. Киев, 1985. Вып. 27. С. 39–42.
  33. **Гуревич М. А., Лапкина К. И., Озеров Е. С.** Предельные условия воспламенения частицы алюминия // Физика горения и взрыва. 1970. Т. 6, № 2. С. 172–176.
  34. **Малинин В. И., Коломин Е. И., Антипин И. С.** Особенности горения частицы алюминия в потоке активных газов // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 1. С. 41–47.