

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ПРОЦЕССЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ, ГОРЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАМЕНИ В ПОТОКЕ ГАЗОВЗВЕСИ

А. Г. Егоров, Д. А. Павлов

Тольяттинский государственный университет, 445667 Тольятти, butch-den@yandex.ru

Исследовано влияние начальной турбулентности потока алюминиево-воздушной смеси и размера частиц алюминия на процессы воспламенения, горения и стабилизации пламени в камере сгорания с внезапным расширением.

Ключевые слова: турбулентность, стабилизация пламени, камера сгорания, воспламенение, газовзвесь.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что увеличение начальной турбулентности набегающего на стабилизатор потока однородной топливовоздушной смеси вызывает задержку воспламенения и сужение диапазона устойчивого горения. При сжигании жидкого топлива, подаваемого в зону циркуляции за плоским или кольцевым плохобтекаемым телом, увеличение начальной турбулентности потока приводит к расширению пределов стабилизации пламени [1]. Известно также, что при повышении начальной турбулентности возрастают равномерность поля температур на выходе из камеры и полнота сгорания, конечно, если не происходит частичного или полного срыва пламени вследствие слишком интенсивной турбулентности [2].

Если вопрос о влиянии начальной турбулентности набегающего потока (ε_0) на пределы срыва гомогенной горючей смеси решается однозначно, то вопрос влияния ε_0 на устойчивость горения гетерогенных смесей остается открытым. Это обусловлено, во-первых, сложной гидродинамикой двухфазного турбулентного потока, во-вторых, различием механизмов срыва пламени гомогенных и гетерогенных топливовоздушных смесей [1].

По сравнению с углеводородными газообразными и жидкими горючими порошки металлов обладают рядом особенностей, затрудняющих их воспламенение и горение. Во-первых, это высокая температура воспламенения частиц металлов ($T_{ign} \geq 1300$ К). Во-вторых, капли металлов характеризуются большой вязкостью и плохо испаряются даже при повышенных температурах (температура, при которой

давление насыщенных паров алюминия существенно, превышает 2000 К). В-третьих, продукты сгорания металлов содержат большую долю конденсированной фазы [3].

Воспламенение и горение частиц металлов в потоке газообразного окислителя по сравнению с облаком газовзвеси отличается рядом особенностей, обусловленных протеканием химических реакций в условиях динамического и теплового взаимодействия реагентов, интенсивного массопереноса при фазовых превращениях, а также зависимостью параметров процесса как от кинетических характеристик горючего, так и от гидродинамических характеристик газодисперсного потока. Изменение характеристик потока газовзвеси металла (концентрации, дисперсности, скорости, турбулентности и др.), а также условий зажигания оказывает существенное влияние на развитие процесса горения. В связи с этим возникают большие сложности при организации эффективного рабочего процесса в камерах сгорания двигателей и энергетических установок, работающих на порошкообразном металлическом горючем [4].

Целью настоящей работы является исследование влияния начальной турбулентности на процессы воспламенения, горения и на стабилизацию фронта пламени в потоке взвеси частиц алюминия в воздухе.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Экспериментальная установка, на которой проводились настоящие испытания, подробно описана в [5]. Модели камер сгорания (рис. 1) представляли собой осесимметричные каналы

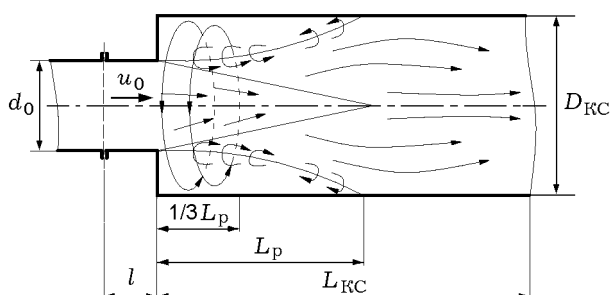


Рис. 1. Схема модели камеры сгорания и структура потока

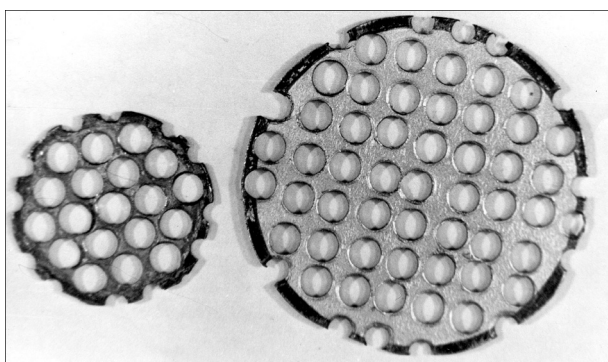


Рис. 2. Турбулизирующие решетки:

слева — для входного канала диаметром 0.02 м (диаметр отверстий $M = 0.0037$ м, толщина перемычек между отверстиями $b = 0.0009$ м), справа — для входного канала диаметром 0.04 м ($M = 0.004$ м, $b = 0.0019$ м)

длиной $L_{КС} = 0.1 \div 0.3$ м и диаметром $D_{КС} = 0.033 \div 0.1$ м. Диаметр входного отверстия d_0 изменялся от 0.013 до 0.04 м, а степень расширения $r^* = R_{КС}/r_0$ варьировалась в диапазоне 2.0 \div 4.5. Относительная длина камер сгорания $L_{КС}/d_0$ составляла 5.5 \div 8.0. Изотермические исследования проводились на моделях, изготовленных из органического стекла, неизотермические — из металла и тугоплавкого стекла «Пирекс».

Исследуемая газозвесь представляла собой взвесь частиц металла в турбулентном потоке воздуха (температура воздуха 293 К). В качестве горючего использовались порошки алюминия и алюминиево-магниевого сплава, выпускаемые отечественной промышленностью и соответствующие отраслевому стандарту и техническим условиям на их дисперсный состав.

Уровень и масштаб турбулентности в по-

токе аэрозвеси на входе в камеру сгорания изменялся с помощью решеток (рис. 2). Решетки представляли собой перфорированные диски диаметром 0.02 и 0.04 м, изготовленные из листового металла толщиной 0.0015 м, которые устанавливались на различных расстояниях l до плоскости внезапного расширения. Измерения скорости и турбулентных характеристик «чистого» (без частиц алюминия) воздушного потока проводились комплектом термоанемометрической аппаратуры DISA-55М. Поскольку турбулентность алюминиево-воздушного потока из-за отсутствия необходимой аппаратуры не измерялась, то далее в тексте значения начальных уровней турбулентности приводятся для «чистого» воздушного потока.

Для исследования структуры холодного алюминиево-воздушного потока, а также потока с горением применялся оптический метод с использованием кинокамеры СКС-1М. Температуру в камере сгорания измеряли вольфрамиевыми термопарами ИС-629. Влияние начальной турбулентности на полноту сгорания оценивалось посредством измерений силы тяги с помощью силоизмерительного датчика ДСТ-0.01.

2. ИЗОТЕРМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ ПОТОКА ГАЗОВЗВЕСИ

Аэродинамика двухфазных турбулентных струй и потоков имеет ряд особенностей, обусловленных воздействием конденсированной примеси на осредненное и пульсационное движение. Характеристики двухфазных течений зависят от концентрации частиц, их массы, аэродинамических свойств, а также от других факторов, учитывающих условия истечения газозвеси. Существенное влияние на структуру двухфазных турбулентных потоков оказывают начальные условия, в частности условия движения газозвеси в соплах и подводящих трубопроводах.

В турбулентных потоках газа с твердыми частицами наблюдается не только воздействие турбулентности несущего потока на движение твердых частиц, но и влияние самих частиц на параметры турбулентности несущего их потока газа. При определенных условиях взвешенные в потоке частицы могут гасить его турбулентность. Увеличение объемной концентрации частиц приводит к тому, что эффекты воз-

действия их на турбулентность несущего потока газа начинают играть заметную роль.

Еще в работе [6] отмечалось, что у исследователей нет единого мнения о влиянии взвешенных частиц на турбулентные характеристики потока. Поведение твердых частиц в турбулентных потоках является сложным физическим процессом, механизм реализации которого зависит как от концентрации частиц в потоке, так и от их размера [7, 8]. В общем случае движение несущей среды и твердых частиц невозможно рассматривать независимо друг от друга. Поэтому экспериментальные исследования гидродинамики и характеристик течения при вдуве турбулентной струи воздуха не отражают действительной картины течения алюминиево-воздушного потока в камере сгорания с внезапным расширением [9].

Первый этап настоящей работы заключался в исследовании структуры течения холодного алюминиево-воздушного потока в камере сгорания с внезапным расширением. Проведенные ранее исследования [5] показали, что в донной области существует вихрь, плоскость вращения которого перпендикулярна оси камеры сгорания и который занимает треть зоны рециркуляции L_p (см. рис. 1). Получено [10] также, что время пребывания частиц алюминия в донной области зоны рециркуляции максимально, а, как известно, этот параметр определяет процессы воспламенения, горения и стабилизации пламени. Поэтому в данных испытаниях особое внимание было уделено изучению структуры течения потока алюминиево-воздушной смеси в области отрыва до точки присоединения потока к стенке камеры сгорания.

На рис. 3 показана картина течения алюминиево-воздушного потока в камере сгорания в отсутствие решетки. На рисунке четко просматриваются основной поток алюминиево-воздушной смеси, зона рециркуляции и контуры вихря в донной области. В результате проведенных испытаний выявлена неравномерность концентрации частиц как по длине зоны рециркуляции, так и по объему камеры сгорания.

Постановка решеток различной геометрии может существенно изменить турбулентную структуру потока. Параметры турбулентности, генерируемые решеткой, зависят не только от ее геометрии, но и от турбулентности набегающего потока и диаметра канала. И в за-

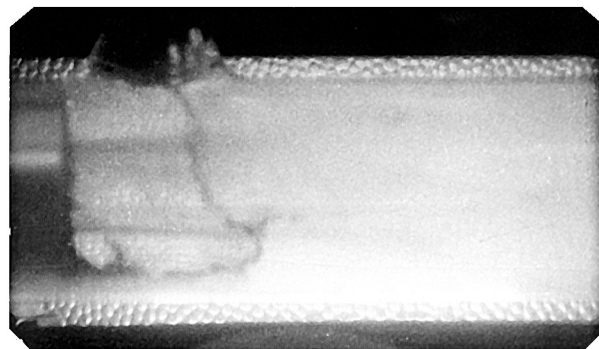


Рис. 3. Картина течения алюминиево-воздушного потока в модели прямоочной камеры сгорания:

$D_{КС} = 0.042$ м, скорость алюминиево-воздушного потока $u_0 = 50$ м/с, горючее АСД-1, скорость съемки 650 кадр/с

висимости от соотношения характерных размеров канала и решетки турбулентность набегающего потока будет усиливаться или, наоборот, гаситься. Постановка перед стабилизатором решетки для интенсификации процесса горения алюминиево-воздушной смеси еще более осложняет задачу по исследованию турбулентной структуры потока. Так как в турбулентных двухфазных течениях природа влияния массы твердых частиц на газообразный поток сложна, частицы могут выступать как своеобразные дискретные детурбулизаторы и дестабилизаторы [6].

Определено влияние расстояния l на размеры донной области зоны рециркуляции, которую определяли сравнением ее длины L_d при наличии и отсутствии решетки во входном канале. Для расчета длины L_d при трубной турбулентности в исследуемых моделях камер сгорания получена формула $L_d = 1.26H$, где $H = D_{КС} - d_0$ — характерный размер стабилизатора. Результаты испытаний в потоках без горения в камерах с разным характерным размером стабилизатора H показали, что при установке решетки на расстоянии $l = 0.057$ м длина донной области зоны рециркуляции увеличивается на 20 % по сравнению с вариантом без решетки, а при установке решетки на расстоянии $l = 0.02$ м — уменьшается на 17 %. В испытаниях с горением характер влияния параметра l на L_d не менялся.

3. ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ЗАЖИГАНИЕ ПОТОКА ГАЗОВЗВЕСИ

Проблема воспламенения частиц алюми-

ния в высокотемпературном высокоскоростном потоке газа за распространяющейся по газозвеси ударной волной изучалась экспериментально и теоретически [11–13].

В работе [14] с помощью метода фоторазвертки исследовано воспламенение и горение порошков алюминия в среде чистого кислорода за отраженной ударной волной (УВ) при $T = 1000 \div 2000$ К. На фоторазвертках отчетливо видны изображения отдельных горящих частиц. Установлено, что воспламенение начинается с мелких частиц. Время горения частицы τ , определяемое по длине яркой части трека, в несколько раз меньше задержки ее воспламенения τ_{ign} . Отмечен широкий спектр значений τ_{ign} и τ для отдельных частиц в каждой фракции, полученной ситовым рассевом; при этом значения τ_{ign} для частиц с одинаковой длительностью горения различаются в несколько раз. При снижении температуры среды растет время задержки воспламенения и уменьшается число воспламенившихся частиц.

В работе [14] установлено, что момент появления свечения при возгорании частиц полидисперсной фракции не зависит от массы навески, поэтому значение τ_{ign} для полидисперсных порошков целесообразно определять именно по моменту появления первых воспламенившихся частиц. При увеличении концентрации частиц время τ_{ign} не изменяется, однако существенно возрастает общее время горения навески, что связано с воспламенением все более крупных частиц данной фракции. Последнее обусловлено поджигающим действием мелких частиц. По полученным в [14] данным задержка воспламенения газозвесей порошков алюминия при низкой концентрации зависит от температуры кислорода за отраженной УВ. Установлено резкое возрастание τ_{ign} при приближении температуры среды к критическому значению $T_{ign} = 1820$ К. Влияния вида порошков на время τ_{ign} не обнаружено, хотя исследуемые образцы отличались как формой частиц (сфероидизированные порошки, алюминиевая пудра), так и составом металла (99.2 % Al; 89.4 % Al + 10.6 % Fe). Наблюдалось удовлетворительное количественное совпадение измеренных значений τ_{ign} с временем прогрева частиц до температуры воспламенения T_{ign} .

В работе [14] выявлено аномальное воспламенение промышленных порошков алюминия АСД-1 и АСД-4 при температурах среды, значительно меньших критической, $T_{ign} \approx$

1820 К. Этот факт пока не получил должного объяснения. Были отмечены характерные особенности воспламенения: малая доля воспламенившихся частиц (≤ 0.001 % по массе порошка); одновременное воспламенение частиц разных размеров, в том числе сравнительно крупных; задержки воспламенения сравнимы со значениями τ_{ign} вблизи $T_{ign} \approx 1820$ К и составляют $0.2 \div 2$ мс; большой разброс значений τ_{ign} при одинаковых условиях опытов; при увеличении концентрации отдельные самовоспламенившиеся частицы оказывают поджигающее действие, что приводит к воспламенению всего облака газозвесей.

Известно [3], что при зажигании алюминиево-воздушной смеси высокотемпературной струей продуктов сгорания воспламенителя определяющее влияние оказывают дисперсность алюминиевого порошка и режим истечения зажигающего газа, более слабое — коэффициент избытка воздуха. Значение энтальпии воспламенения и характер ее зависимости от основных параметров отражают особенности процесса воспламенения аэрозвеси порошков алюминия. Расчеты [3] показали, что энтальпия воспламенения аэрозвеси порошка АСД-4 не может обеспечить одновременное зажигание всей взвеси. Поэтому авторы [3] предположили, что при воспламенении сначала образуется очаг пламени, от которого затем пламя распространяется на весь поток. Зажигание аэрозвеси порошка АСД-1 идет по другому механизму. В [3] экспериментально доказано, что зажигание взвеси АСД-1 осуществляется только при такой энтальпии воспламенения, при которой практически во всем объеме, а не в отдельных очагах выполняются условия воспламенения смеси.

В [5] исследовалось зажигание потока алюминиево-воздушной смеси с помощью зоны рециркуляции. Визуализация процесса горения в зоне рециркуляции показала, что для марок горючего АСД-1 и АСД-4 горение возникает в очаге и от него вначале распространяется по донной области зоны рециркуляции, а затем заполняет весь объем зоны. В настоящей работе исследовано влияние размера частиц алюминия и начальной турбулентности ε_0 на развитие горения в зоне рециркуляции при инициировании процесса электрической свечой СПН-4-ЗТ. С помощью штатной авиационной системы зажигания от свечи СПН-4-ЗТ надежно воспламенялись до состояния самоподдерживающегося

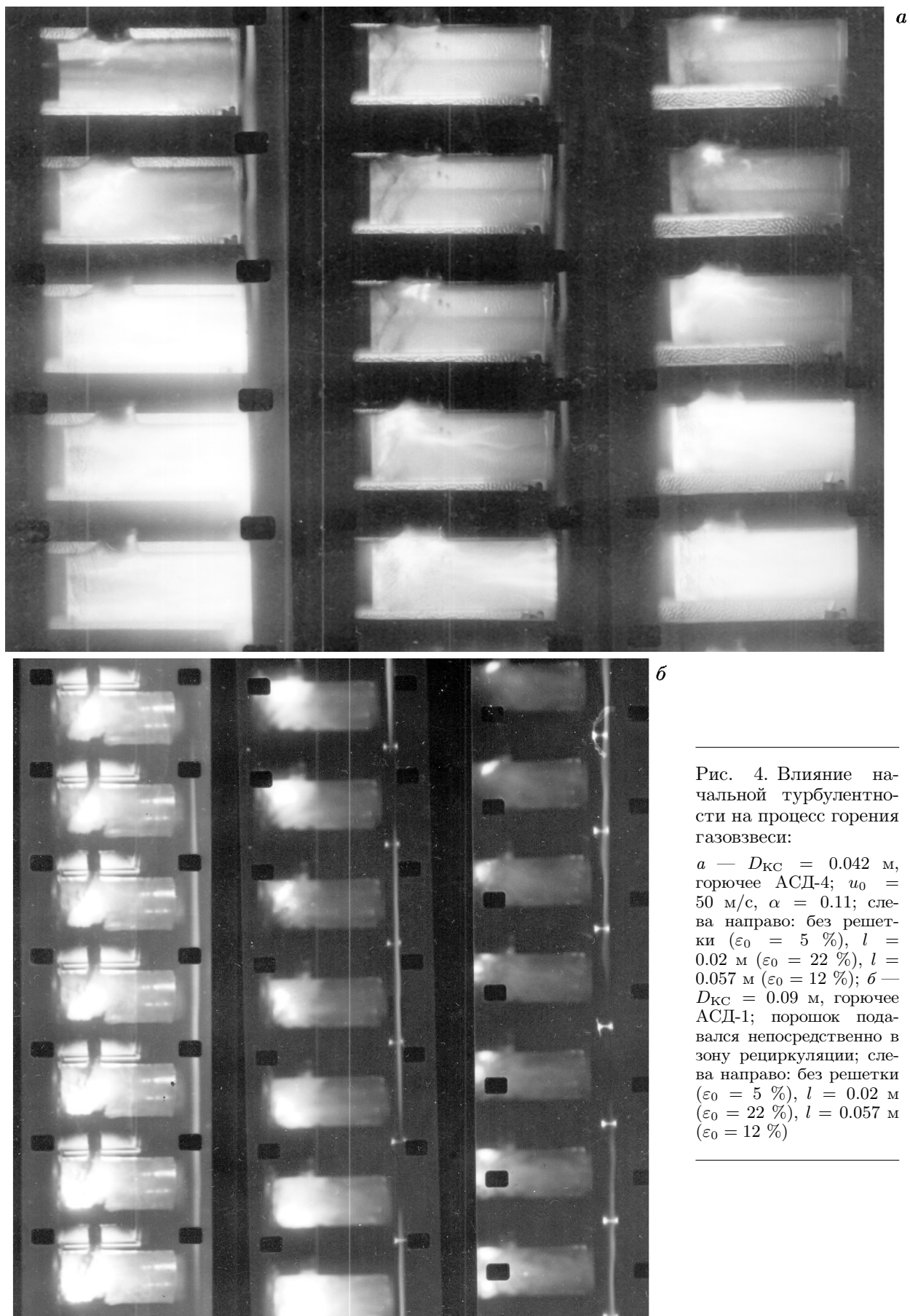


Рис. 4. Влияние начальной турбулентности на процесс горения газовзвеси:

a — $D_{КС} = 0.042$ м, горючее АСД-4; $u_0 = 50$ м/с, $\alpha = 0.11$; слева направо: без решетки ($\varepsilon_0 = 5\%$), $l = 0.02$ м ($\varepsilon_0 = 22\%$), $l = 0.057$ м ($\varepsilon_0 = 12\%$); *б* — $D_{КС} = 0.09$ м, горючее АСД-1; порошок подавался непосредственно в зону рециркуляции; слева направо: без решетки ($\varepsilon_0 = 5\%$), $l = 0.02$ м ($\varepsilon_0 = 22\%$), $l = 0.057$ м ($\varepsilon_0 = 12\%$)

ся горения порошки ПАМ-4, АМД-50, АСД-1, АСД-4, ПА-4, ПА-2, АПС-1П. Грубодисперсные порошки марки ПА-1 и АСД-1П воспламенялись только в смеси с тонкодисперсными порошками. Следовательно, определяющее влияние на воспламенение аэрозвеси частиц алюминия электрической свечой в зоне рециркуляции оказывает дисперсность частиц.

Определены значения характерного размера стабилизатора ($H = 0.007$ м), скорости алюминиево-воздушного потока ($u_0 = 40$ м/с) и расхода горючего ($G_{Al} = 3$ г/с), при меньших значениях которых воспламенение не происходило.

Время задержки воспламенения частиц Al порошков АСД-1 и АСД-4 при зажигании свечой составляет $\tau_{ign} \approx 1.6$ мс (время экспозиции кадра), т. е. находится в диапазоне значений τ_{ign} , полученных за отраженной УВ [14]. Влияние роста начальной турбулентности на время задержки воспламенения частиц Al при данных условиях проведения эксперимента и данном способе регистрации τ_{ign} обнаружено не было.

Влияние начальной турбулентности ε_0 на характер и динамику развития процесса горения порошка АСД-4 в модели камеры диаметром 0.042 м показано на рис. 4, а. С ростом ε_0 время распространения пламени от свечи зажигания по всей зоне рециркуляции увеличивается с 3.3 до 4.9 мс. При трубной турбулентности пламя вначале распространяется практически по всей зоне рециркуляции, а затем перебрасывается в основной поток. В вариантах с решеткой под воздействием более интенсивных турбулентных пульсаций реагирующие объемы вырываются из зоны рециркуляции и сносятся вниз по потоку, тем самым увеличивая время распространения пламени по зоне рециркуляции, вследствие чего затягивается процесс зажигания основного потока алюминиево-воздушной смеси. Время зажигания основного потока аэрозвеси в камере сгорания с ростом ε_0 увеличивается с 4.9 до 6.6 мс. Этот факт можно объяснить различным влиянием турбулентности на первую и вторую стадии развития начального очага воспламенения. Исследование влияния начальной турбулентности на развитие начального очага воспламенения в потоке аэрозвеси, содержащей частицы АСД-4 ($d_{32} = 7.5$ мкм), показали, что при трубной турбулентности на первой стадии развития темпы роста начального очага в течение

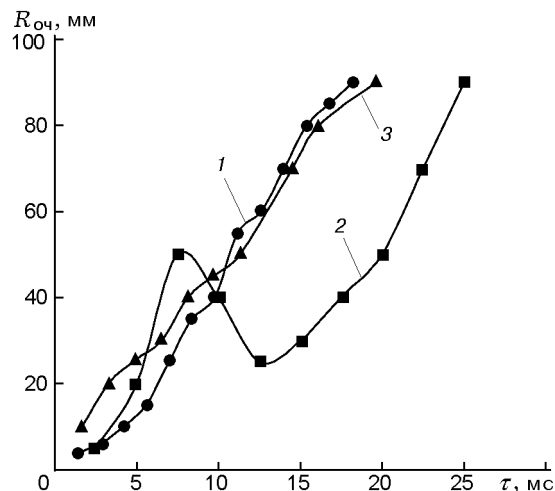


Рис. 5. Влияние начальной турбулентности на динамику роста очага воспламенения при подаче порошка Al непосредственно в зону рециркуляции:

$D_{КС} = 0.09$ м; горючее АСД-1 ($d_{32} = 17.5$ мкм); 1 — без решетки, $\varepsilon_0 = 5\%$, 2 — с решеткой, $l = 0.02$ м, $\varepsilon_0 = 22\%$, 3 — с решеткой, $l = 0.057$ м, $\varepsilon_0 = 12\%$

ние первых 2 мс меньше, чем при повышенной турбулентности, а на второй стадии развития с 2 до 5 мс — выше, чем при повышенной турбулентности.

При повышенной начальной турбулентности (с установкой решетки) воспламенение частиц алюминия в потоке аэрозвеси порошка АСД-1 с $d_{32} = 17.5$ мкм происходило только в камерах сгорания диаметром 0.05 м и больше.

На рис. 4, б показано влияние начальной турбулентности набегающего воздушного потока на процесс горения в камере диаметром 0.09 м при подаче навески порошка АСД-1 непосредственно в зону рециркуляции. На рисунке хорошо просматривается характер влияния начальной турбулентности на динамику процесса в зоне рециркуляции.

Рис. 5 иллюстрирует влияние начальной турбулентности потока воздуха на динамику роста начального очага воспламенения ($R_{оч}$) при отдельной подаче компонентов аэрозвеси в камеру. Видно, что развитие начального очага воспламенения при отдельной подаче компонентов аэрозвеси, так же как и при подаче аэрозвеси через входное отверстие камеры, происходит в две стадии. При трубной турбулентности на первой стадии развития темпы роста начального очага в течение первых ≈ 10 мс меньше, чем при повышенной турбу-

лентности. Первоначально рост турбулентности приводит к увеличению скорости тепло- и массообменных процессов на поверхности частицы, и скорость выделения тепла в процессе химической реакции превосходит скорость теплоотвода. На второй стадии темпы роста очага при трубной турбулентности выше, чем при повышенной турбулентности. Это обусловлено тем, что на данном этапе развития очага скорость теплоотвода в окружающую среду вследствие излучения и турбулентной диффузии начинает превосходить скорость выделения тепла в процессе химической реакции.

Таким образом, результаты испытаний показали, что определяющее влияние на зажигание потока алюминиево-воздушной смеси зоной рециркуляции, так же как и высокотемпературной струей продуктов сгорания воспламенителя, оказывает дисперсность порошка. Однако в случае зажигания с помощью зоны рециркуляции наблюдается очаговое воспламенение и в аэрозвеси порошка АСД-1. В донной области зоны рециркуляции формируются благоприятные условия для существования очагов пламени и последующего воспламенения свежих порций смеси во всем объеме зоны рециркуляции. Поэтому энтальпия воспламенения основного потока алюминиево-воздушной смеси зоной рециркуляции при наличии обратных потоков достаточной интенсивности должна быть намного меньше, чем энтальпия воспламенения струей горячего газа [3].

4. ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ГОРЕНИЕ В ПОТОКЕ АЛЮМИНИЕВО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

В экспериментальных исследованиях разных авторов выявлены основные параметры, определяющие совершенство рабочего процесса в двигательных установках на порошкообразном металлическом горючем, а именно: скорость распространения пламени, температура воспламенения, время и полнота сгорания частиц горючего. Тем не менее, в литературе сведения о полноте и температуре (особенно о температурных полях) горения газозвеси частиц порошкообразного металлического горючего весьма ограничены [15].

В проведенных нами исследованиях измерялись температуры при трубной и повышенной турбулентности по всему объему камеры и температуры в зоне рециркуляции на устой-

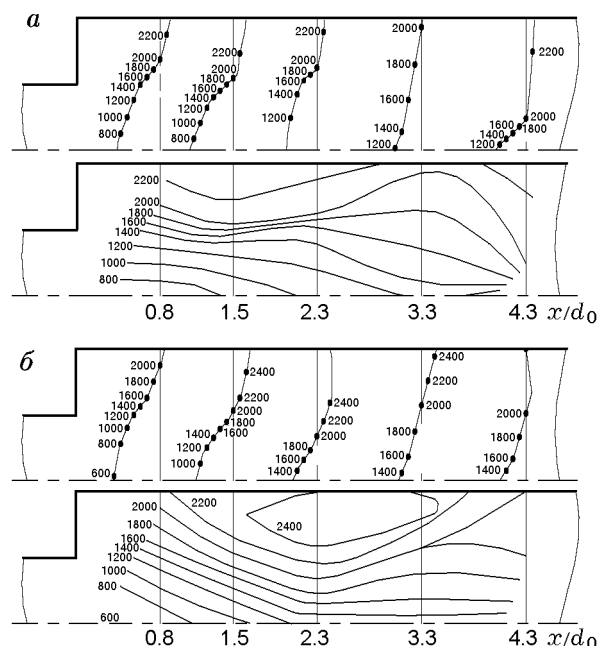


Рис. 6. Профили температур и изотермы (T , К) в прямоточной камере сгорания:

$D_{КС} = 0.08$ м; горючее АМД-50; $\alpha = 0.6$; а — без решетки, $\varepsilon_0 = 5$ %, б — $l = 0.057$ м, $\varepsilon_0 = 22$ %

чивых и предсрывных режимах. По результатам измерений построены профили температур в поперечных сечениях камеры сгорания.

На рис. 6 показано распределение изотерм и профили температур в поперечных сечениях камеры сгорания при трубной и повышенной турбулентности. Видно, что максимальная температура в обоих случаях зафиксирована в зоне рециркуляции. Увеличение начальной турбулентности с 5 до 22 % приводит к росту температуры и заметному увеличению объема камеры сгорания с температурой, превышающей 1300 К, которая необходима для воспламенения частиц алюминиево-магниевого сплава АМД-50. С увеличением начальной турбулентности максимум температуры смещается к оси камеры и удаляется от плоскости внезапного расширения.

Измерения силы тяги показали, что с повышением начальной турбулентности при прочих равных условиях сила тяги увеличивается с 10 до 12 %, что обусловлено ростом температуры и соответственно полноты сгорания.

Установлено, что на устойчивых режимах работы камеры увеличение начальной турбулентности ε_0 в зависимости от диаметра частиц d_{32} неоднозначно влияет на температуру

в зоне рециркуляции. Так, в опытах с АСД-4 ($d_{32} = 7.5$ мкм) с ростом ε_0 наблюдалось снижение температуры в зоне рециркуляции на ≈ 300 К, а для АСД-1 ($d_{32} = 17.5$ мкм) — повышение на ≈ 200 К.

5. ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА СТАБИЛИЗАЦИЮ ПЛАМЕНИ В ПОТОКЕ АЛЮМИНИЕВО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Существует несколько предположений относительно механизма влияния турбулентности на стабилизацию пламени. Одни авторы объясняют это влияние увеличением максимальных значений мгновенной скорости потока, обтекающего стабилизатор, другие — уменьшением длины зоны рециркуляции, третьи — увеличением отвода тепла из зоны рециркуляции в активный поток вследствие различного характера зоны контактирования продуктов сгорания и свежей смеси. Анализ условий стабилизации пламени на основе модели гомогенного реактора [16] показал, что турбулентность увеличивает скорость подачи вещества в реактор, и это приближает срыв процесса.

В работе [17] отмечалось сужение пределов горения за стержнями с увеличением интенсивности турбулентности с 0.4 до 2.7 % и масштаба турбулентности с 0.3 до 1.5 мм. Аналогичные результаты были получены в [18], где влияние турбулентности на срывные пределы горения объясняется изменением среднего значения локальной скорости на кромках стабилизатора.

Результаты проведенных нами исследований влияния начальной турбулентности ε_0 и масштаба турбулентности l_0 на стабилизацию фронта пламени в потоке алюминий-воздушной смеси представлены на рис. 7. Характеристики стабилизации пламени были определены в серии испытаний по методике, представленной в [5]. Из рисунка видно, что для порошка марки АСД-1 с размером частиц алюминия $d_{32} = 17.5$ мкм увеличение ε_0 с 12 до 22 % и l_0 с 0.01 до 0.07 мм приводит к расширению диапазона устойчивого горения как по скорости потока, так и по составу смеси.

В результате многочисленных экспериментов установлено [5, 19], что с увеличением ε_0 в зависимости от диаметра частиц алюминия d_{32} границы устойчивого горения по скорости набегающего потока и составу смеси могут как расширяться, так и сужаться. В пото-

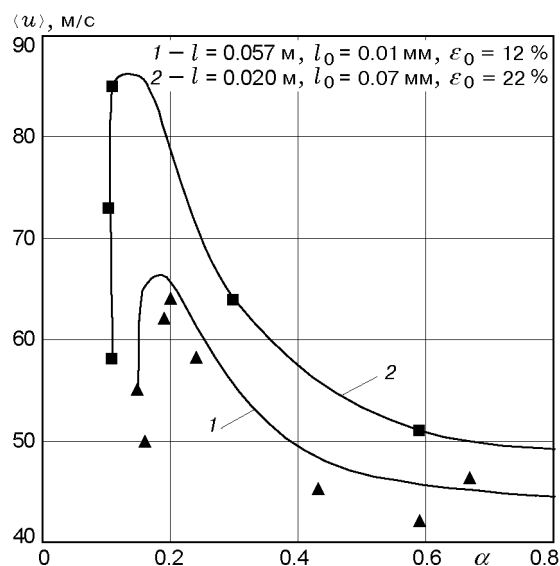


Рис. 7. Влияние начальной турбулентности и масштаба турбулентности на диапазон устойчивого горения:

$D_{КС} = 0.06$ м, горючее АСД-1

ке алюминий-воздушной смеси в исследованных моделях камер сгорания увеличение ε_0 с 5 до 22 % приводит к сужению границы устойчивого горения для горючего марки АСД-4 с $d_{32} = 7.5$ мкм и к расширению для горючего марки АСД-1 с $d_{32} = 17.5$ мкм. Таким образом, алюминий-воздушная смесь в зависимости от размера частиц может проявлять свойства как однородной, так и неоднородной топливовоздушной смеси.

Измерения температуры в зоне рециркуляции на режимах, близких к срыву, показали, что с ростом ε_0 средняя температура зоны рециркуляции уменьшается с 1970 до 1700 К для АСД-4 и увеличивается с 1890 до 2030 К для АСД-1. Это обусловлено тем, что при горении распыленного порошкообразного металлического горючего в газообразном потоке окислителя основную роль играют гетерогенные реакции на поверхности частиц. Для порошка марки АСД-4 с размером частиц $d_{32} = 7.5$ мкм эти реакции определяются непосредственно скоростью химических реакций и рост турбулентности ведет только к уменьшению времени пребывания металлического горючего в зоне рециркуляции [20], увеличению локального значения коэффициента избытка топлива α и соответственно к снижению температуры в зоне рециркуляции. Для порошка АСД-1 с $d_{32} = 17.5$ мкм рост турбулентности (установ-

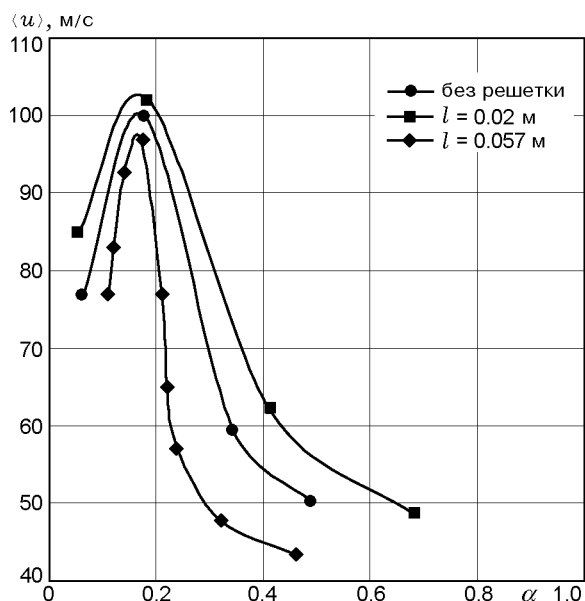


Рис. 8. Влияние расстояния, на котором устанавливается решетка, на диапазон устойчивого горения:

$D_{КС} = 0.07$ м, горючее АСД-1

ка решетки) ведет к увеличению времени пребывания горючего в зоне рециркуляции и росту относительных скоростей частиц алюминия и воздуха [20], а поскольку гетерогенные реакции определяются массопереносом кислорода воздуха к реагирующей поверхности частицы, интенсивность которого увеличивается с ростом их относительных скоростей, все это в конечном итоге и обуславливает рост температуры в зоне рециркуляции.

Было выявлено, что для одного и того же порошка неоднозначное влияние на границу срыва оказывает расстояние установки решетки до плоскости внезапного расширения (рис. 8). Такое влияние этого параметра на границу срыва обусловлено воздействием его на размеры донной области зоны рециркуляции и на время пребывания частиц алюминия в ней за счет изменения масштаба турбулентности и времени контакта частиц алюминия с высокотемпературными продуктами горения зоны рециркуляции [20].

С точки зрения теории стабилизации пламени, основанной на соотношении характерных времен, влияние начальной турбулентности на устойчивость горения порошкообразного алюминия, с одной стороны, объясняется уменьшением размера зоны рециркуляции с ростом пульсаций скорости, а следовательно, уменьше-

нием времени контакта частиц с зоной рециркуляции. С другой стороны, турбулентность интенсифицирует тепло- и массообменные процессы между основным потоком алюминиево-воздушной смеси и зоной рециркуляции, тем самым воздействуя на локальное соотношение компонентов в зоне, от которого, в свою очередь, зависят как температура горения, так и скорость распространения пламени [14].

Поскольку в настоящей работе начальная турбулентность алюминиево-воздушного потока принималась равной турбулентности чистого воздушного потока (влияние частиц на турбулентность несущего воздушного потока не учитывалось), а градиенты средних скоростей при наличии пламени изменялись, то, как следствие, менялась турбулентная структура потока. Поэтому соотношения между основными характеристиками горения и параметрами турбулентности, измеренными в холодном воздушном потоке, нельзя считать вполне корректными. Только огромные трудности в методике измерения параметров турбулентности как в холодном алюминиево-воздушном потоке, так и при горении заставляют идти на использование этих соотношений, содержащих не поддающиеся оценке погрешности.

ВЫВОДЫ

Анализ и обработка полученных экспериментальных данных показали, что для обеспечения надежного процесса зажигания турбулентного потока аэрозвеси частиц алюминия в прямоточной камере сгорания необходимо создать условия для возникновения начального очага около свечи, переброса пламени в зону рециркуляции и воспламенения в ней алюминиево-воздушной смеси.

Возникновение начального очага зависит от двух конкурирующих процессов: разогрев очага за счет химической реакции и его охлаждение за счет теплопроводности.

Увеличение начальной турбулентности потока газозвеси оказывает положительное влияние на размеры начального очага воспламенения на первой стадии развития и отрицательное — на второй.

При трубной турбулентности время задержки воспламенения частиц Al промышленных порошков АСД-1 и АСД-4 от свечи зажигания СПН-4-3Т в прямоточной камере составляет ≈ 1.6 мс, что соответствует времени

задержки воспламенения частиц Al в высокотемпературном высокоскоростном потоке газа за распространяющейся по газозвеси ударной волной ($0.2 \div 2$ мс).

Температура горения аэрозвеси частиц Al в камере увеличивается с ростом начальной турбулентности потока.

С ростом начальной турбулентности (при установке турбулизирующей решетки) границы устойчивого горения в потоке аэрозвеси частиц Al могут как сужаться, так и расширяться.

ЛИТЕРАТУРА

1. Токарев В. В., Шайкин А. П. О влиянии турбулентности на процесс стабилизации диффузионного пламени // Изв. вузов. Авиационная техника. 1978. № 2. С. 124–125.
2. Сполдинг Д. Б. Основы теории горения. М.: Гос. науч.-техн. изд-во энергет. лит., 1959.
3. Малинин В. И., Коломин Е. И., Антипин И. С. Воспламенение и горение аэрозвеси алюминия в реакторе высокотемпературного синтеза порошкообразного оксида алюминия // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 5. С. 41–51.
4. Алемасов В. Е., Дрегаллин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1980.
5. Егоров А. Г., Кальней Е. Д., Шайкин А. П. Стабилизация пламени порошкообразного металлического горючего в турбулентном потоке воздуха // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 5. С. 28–35.
6. Горбис З. Р. Тепломассообмен и гидродинамика сквозных потоков. М.: Энергия, 1970.
7. Медников Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1980.
8. Теверовский Е. Н., Дмитриев Е. С. Перенос аэрозольных частиц турбулентными потоками. М.: Энергоатомиздат, 1988.
9. Егоров А. Г. Стабилизация пламени псевдожидкого топлива в камере сгорания с внезапным расширением: Дис. ... канд. техн. наук. Казань, 1993.
10. Егоров А. Г., Русаков М. М., Шайкин А. П. Определение времени пребывания гетерогенного топлива в зоне обратных токов // Изв. вузов. Авиационная техника. 1999. № 2. С. 69.
11. Медведев А. Е., Федоров А. В., Фомин В. М. Математическое моделирование воспламенения частиц металла в высокотемпературном потоке за ударной волной // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 3. С. 5–9.
12. Медведев А. Е., Федоров А. В., Фомин В. М. Математическое моделирование процесса воспламенения аэродисперсных систем // Докл. 3 Междунар. шк. промышленных взрывов пыли. Турава, Польша, 1982. С. 65–79.
13. Бойко В. М., Лотов В. В., Папырин А. Н. Воспламенение газозвесей металлических порошков в отраженных УВ // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 2. С. 67–74.
14. Фомин В. М., Федоров А. В., Бойко В. М. и др. Волновая динамика реагирующих и не реагирующих газозвесей // Теплофизика и аэродинамика. 1977. Т. 4, № 2. С. 129–157.
15. Ягодников Д. Я. Организация процессов воспламенения и горения порошкообразных металлов в камерах сгорания реактивных двигательных установок: Автореф. ... дис. д-ра техн. наук. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998.
16. Талантов А. В. Горение в потоке. М.: Машиностроение, 1978.
17. Scurlock A. C. Meteor Report 19. Fuels Res. Lab. MIT, 1948.
18. Williams G. G., Hottel N. C., Scurlock A. C. Third Symposium on Combustion, Flame, and Explosion Phenomena. Baltimore. 1949. P. 21.
19. Егоров А. Г. Стабилизация пламени в турбулентном двухфазном потоке // Хим. физика. 2003. Т. 22, № 4. С. 70–79.
20. Егоров А. Г. Время пребывания частиц алюминия в камерах сгорания с внезапным расширением // Хим. физика. 2003. Т. 22, № 11. С. 54–63.

*Поступила в редакцию 10/VII 2002 г.,
в окончательном варианте — 16/II 2005 г.*