

Исследование массообмена зоны рециркуляции с основным потоком псевдожидкого топлива

Представлены результаты экспериментальных исследований процесса массообмена зоны рециркуляции с основным потоком псевдожидкого топлива в камере сгорания с внезапным расширением. Получены зависимости времени пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции от характерного размера, начальной скорости и турбулентности набегающего потока. Показано, что интенсивность процесса массообмена зоны рециркуляции с основным потоком алюминиево-воздушной смеси с размером частиц $d_{32} = 7,4$ мкм так же, как в случае газовой смеси, можно оценивать безразмерным временем пребывания.

А.Г. ЕГОРОВ,
д-р техн. наук,
А.С. ТИЗИЛОВ,
канд. техн. наук
(ТГУ, Тольятти)
eag@tltsu.ru

Камера с внезапным расширением, аэровзвесь, время пребывания, частицы алюминия, основной поток, массообмен

В газодисперсных потоках на процессы переноса значительно влияет дисперсная фаза. Только в том случае, если частицы очень малы и в силу этого их движение практически ничем не отличается от движения несущих молекул газа, получают равенство коэффициентов турбулентной диффузии частиц и среды [1].

Двухфазные течения при отрыве потока после внезапного расширения трубы исследуются в работах [1–5], где показано, что малоинерционные частицы вовлекаются в циркуляционное движение, тогда как крупные частицы, проходя через область сдвигового течения, не попадают в отрывную зону.

Согласно работе [6] можно предположить, что обмен между зоной рециркуляции и основным газодисперсным потоком, содержащим частицы алюминия со средним диаметром $d_{32} < 10$ мкм, так же, как и в случае газовой смеси, происходит в основном за счет турбулентной диффузии.

При диффузионном обмене время пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции $\tau_{зр}$ можно рассчитать следующим образом:

$$\tau_{зр} = \frac{V_{зр} H}{S_{зр} D_{зр}},$$

где $V_{зр}$, $S_{зр}$ – объем и площадь боковой поверхности зоны рециркуляции; H – характерный размер стабилизатора.

Зная среднее время пребывания и размеры зоны, из данной формулы можно вычислить средний коэффициент диффузии $D_{зр}$.

Согласно исследованиям [6] значение $\tau_{зр}$ пропорционально характерному размеру стабилизатора H и обратно пропорционально скорости набегающего потока u_0 . Тогда время пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции при внезапном расширении канала можно определить из формулы [7]:

$$Z = \frac{\tau_{зр} u_0}{H},$$

где Z – безразмерное время.

В настоящее время считается, что механизм стабилизации в потоке с помощью отрывных течений хорошо изучен [8]. Однако из-за многообразия факторов, влияющих на процесс стабилизации пламени в потоке псевдожидкого топлива, требуются дополнительные исследования. Рециркуляционное течение в зоне отрыва влияет на интенсивность процессов переноса импульса, теплоты и массы и в значительной мере определяет структуру турбулентного двухфазного течения [1]. В связи с этим механизм стабилизации пламени в камере с внезапным расширением прежде всего требует изучения закономерностей процесса массообмена между зоной рециркуляции и основным потоком псевдожидкого топлива.

Экспериментальное оборудование и методика проведения исследований подробно описаны в работе [3].

Известно [9–12], что аэродинамической структурой газодисперсного потока определяется распределение в нем времени пребывания частиц горючего и окислителя. В связи с этим необходимо было прежде всего исследовать структуру течения алюминий-воздушного потока в осесимметричном канале с внезапным расширением.

Было выявлено [3], что концентрация частиц по длине зоны рециркуляции неравномерна. В донном вихревом течении наблюдалась поперечная миграция частиц, из-за чего увеличивалась концентрация наиболее крупных частиц в пристенной области.

Общим параметром, определяющим устойчивость горения в потоке горючей смеси, являются геометрические параметры зоны рециркуляции и температура в ней. Влияние начальной турбулентности потока псевдожидкого топлива на длину зоны рециркуляции определяли сравнением ее длины при наличии турбулизирующей решетки во входном канале и без нее. Турбулизирующая решетка устанавливалась на расстоянии $l_p = 0,02$ м до плоскости внезапного расширения.

В турбулентных двухфазных течениях природа влияния твердых частиц на газообразный поток сложна, и частицы могут являться своеобразными дискретными детурбулизаторами и дестабилизаторами [13]. Влияние начальной турбулентности и характерного параметра H на длину зоны рециркуляции в холодном потоке алюминий-воздушной смеси (частицы алюминия диаметром $d_{32} = 7,4$ мкм) демонстрирует рис. 1.

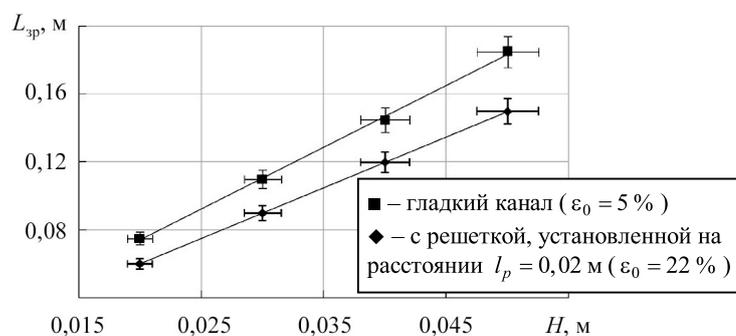


Рис. 1

Как видим (см. рис. 1), с установкой решетки (увеличением начальной турбулентности) длина зоны рециркуляции уменьшается, как и в случае газозвушной смеси [5].

Для представления о турбулентном обмене зоны рециркуляции с основным потоком аэрозвеси частиц алюминия в канале с внезапным расширением необходимо получить зависимости времени пребывания частиц в зоне рециркуляции от размера стабилизатора, скорости и турбулентности основного потока.

На рис. 2 представлена зависимость времени пребывания частиц алюминия диаметром $d_{32} = 7,4$ мкм в зоне рециркуляции от характерного размера стабилизатора H в потоке без горения ($\epsilon_0 = 5\%$, $u_0 = 50$ м/с).

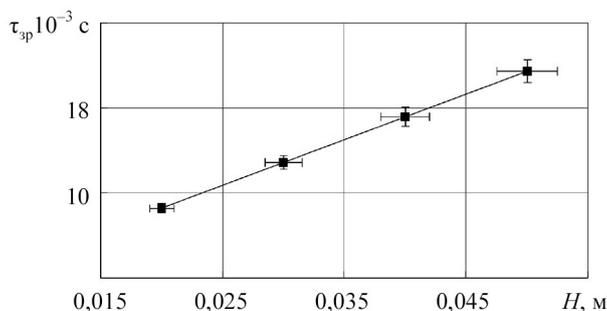


Рис. 2

Как видим (см. рис. 2), время пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции в канале с внезапным расширением, так же, как и газа в зоне за плохообтекаемым телом, пропорционально размеру стабилизатора.

Поскольку размеры зоны рециркуляции со скоростью практически неизменны, время пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции $\tau_{зр}$ должно изменяться обратно пропорционально скорости потока u_0 .

На рис. 3 показано влияние начальной скорости и интенсивности турбулентности основного потока на время пребывания частиц алюминия диаметром $d_{32} = 7,4$ мкм в зоне рециркуляции ($D_{кк} = 0,04$ м).

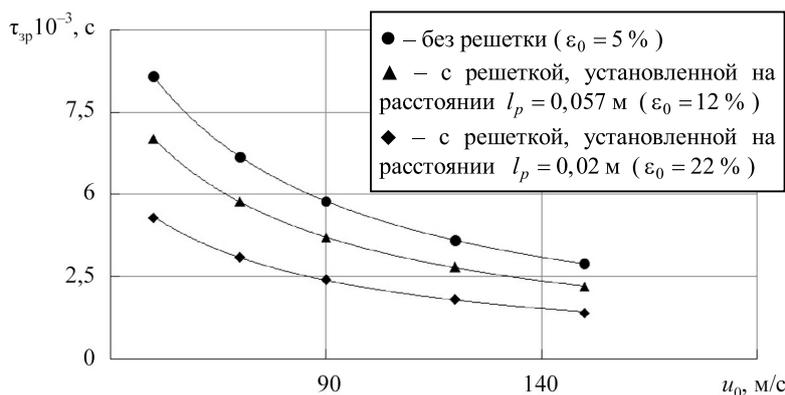


Рис. 3

Как видим (см. рис. 3), с увеличением скорости и ростом начальной интенсивности турбулентности среднее время пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции уменьшается.

Можно предположить, что уменьшение времени пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции при установке решетки связано с уменьшением длины зоны рециркуляции.

Таким образом, была построена зависимость продолжительности нахождения частиц алюминия диаметром $d_{32} = 7,4$ мкм в зоне рециркуляции от параметров H , u_0 , ε_0 . Установлено, что форма полученной кривой качественно совпадает с аналогичным распределением времени пребывания частиц дыма в зоне рециркуляции за плохообтекаемым телом.

Было установлено, что в потоке псевдожидкого топлива при турбулентности ($\varepsilon_0 = 5\%$) время пребывания частиц алюминия диаметром $d_{32} = 7,4$ мкм в зоне рециркуляции можно рассчитать по формуле

$$\tau_{зр} = Z \frac{H}{u_0},$$

где $Z = 21,5$.

В потоке псевдожидкого топлива с повышенной турбулентностью при установке решетки на расстоянии $l_p = 0,02$ м ($\varepsilon_0 = 22\%$) значение безразмерного времени пребывания составило 10,8. При уменьшении значения безразмерного времени пребывания можно говорить об интенсификации процесса массообмена зоны рециркуляции с основным потоком.

В работе [14] отмечено, что с помощью полученных характеристик турбулентного потока в осесимметричном канале с внезапным расширением можно рассчитать время пребывания газа в зоне рециркуляции по формуле

$$\tau_{зр} = 23,8 \frac{H}{u_0}.$$

Учитывая удовлетворительное совпадение значения безразмерного времени пребывания Z , полученного в настоящей работе, со значениями этого параметра для газозвушной смеси, определенного другим методом [14], можно сделать вывод о том, что в холодном потоке при турбулентности $\varepsilon_0 = 5\%$ время пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции может быть определено аналогично газовой среде – по формуле.

Используя полученные по результатам эксперимента значения u_0 , $V_{зр}$, $S_{зр}$ и зная безразмерное время пребывания Z , можно определить средний коэффициент турбулентной диффузии зоны рециркуляции с основным потоком псевдожидкого топлива по формуле

$$D_{зр} = \frac{V_{зр} u_0}{S_{зр} Z}.$$

Согласно опытным данным коэффициент турбулентной диффузии зоны рециркуляции в камере с внезапным расширением можно рассчитать следующим образом:

$$D_{зр} = 0,013 u_0 H.$$

По экспериментальным значениям времени пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции, при постоянном значении скорости потока $u_0 = 50$ м/с и разных размерах стабилизаторов были получены значения среднего коэффициента турбулентной диффузии $D_{зр}$ зоны рециркуляции в потоке без горения с турбулентностью $\varepsilon_0 = 5\%$ (рис. 4).

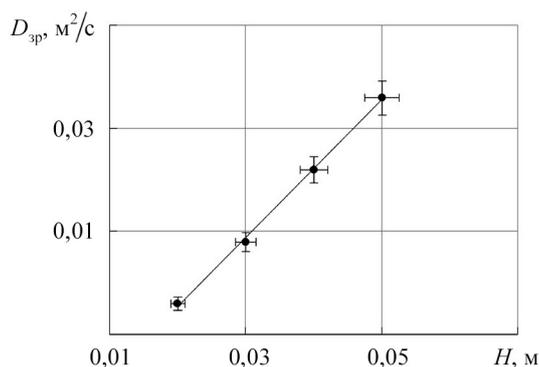


Рис. 4

Параметры зоны рециркуляции при горении и холодных потоках существенно отличаются. Экспериментально было определено время пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции в потоке с горением при $\alpha = 0,2 \div 1,4$. При турбулентности $\varepsilon_0 = 5\%$ время пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции $\tau_{зр}$ составило 25 мс. Увеличение времени пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции с 8,6 до 25 мс по сравнению с холодным потоком объясняется увеличением длины зоны рециркуляции в 1,4 раза и уменьшением общего уровня турбулентности в ней.

Зависимость среднего коэффициента диффузии зоны рециркуляции от характерного размера стабилизатора в потоке аэрозвеси частиц алюминия с горением представлена на рис. 5.

По результатам обработки и анализа данных, полученных при испытаниях с горением, в потоке псевдожидкого топлива с турбулентностью время пребывания частиц алюминия диаметром $d_{32} = 7,4$ мкм в зоне рециркуляции можно определить по формуле

$$\tau_{зр} = 54 \frac{H}{u_0}.$$

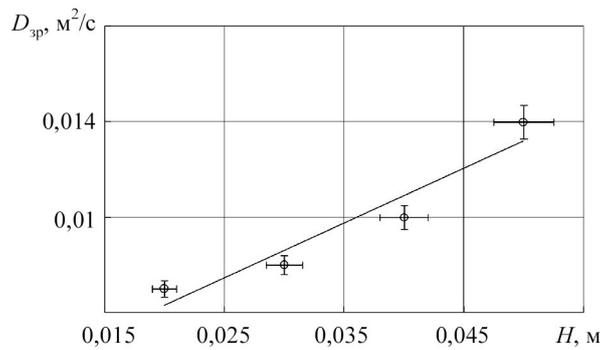


Рис. 5

Анализируя отношение безразмерного времени пребывания в потоках без горения и с горением для газозвушной смеси в двумерном канале с внезапным расширением [15], а также рассматривая аналогичный показатель для потока аэрозвеси частиц алюминия в осесимметричном канале с внезапным расширением, получили значения, равные 2,1 и 2,5. В связи с этим можно предположить, что и в случае горения процессы теплообмена зоны рециркуляции с основным потоком псевдожидкого топлива также можно оценивать безразмерным временем пребывания.

В результате проведенных исследований установлено, что время пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции увеличивается с увеличением характерного размера стабилизатора H и уменьшается с ростом скорости u_0 и интенсивности турбулентности ε_0 основного потока псевдожидкого топлива.

Показано, что интенсивность процесса массообмена зоны рециркуляции с основным потоком псевдожидкого топлива в исследованном диапазоне размеров частиц в холодном потоке и потоке с горением можно оценивать безразмерным временем пребывания.

Используя полученные в настоящей работе значения безразмерного времени пребывания, можно определить скорость срыва, если известны состав, кинетические характеристики псевдожидкого топлива и размеры стабилизатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терехов В.И., Пахомов М.А. Моделирование турбулентного газодисперсного потока при внезапном расширении в трубе // Теплофизика и аэромеханика. 2008. № 4. С. 629–642.
2. Данильченко В.П. и др. Исследование распространения двухкомпонентной закрученной струи в канале // Изв. вузов. Авиационная техника. 1976. № 3. С. 23–27.
3. 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. 69–71.
4. Егоров А.Г., Мигалин К.В., Шайкин А.П. Экспериментальное исследование процессов воспламенения и стабилизации пламени порошкообразного алюминия в камере сгорания с внезапным расширением // Изв. вузов. Авиационная техника. 1989. № 2. С. 85–86.
5. Егоров А.Г. и др. Влияние начальной турбулентности на сгорание мелкодисперсного топлива // Изв. вузов. Авиационная техника. 1991. № 1. С. 97–98.
6. Бовина Т.А. Исследование обмена между зоной рециркуляции за стабилизатором и внешним потоком и некоторые вопросы стабилизации пламени // Горение при пониженных давлениях и некоторые вопросы стабилизации пламени в однофазных и двухфазных системах: Сб. ст. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 58–70.
7. Щетинков Е.С. Физика горения газов. М.: Наука, 1965. 739 с.
8. Мингазов Б.Г., Мухаметгалиев Т.Х. Исследование механизма стабилизации пламени в неоднородных по фазе топливовоздушных смесях // Изв. вузов. Авиационная техника. 2020. № 1. С. 93–96.
9. Ярин Л.П., Сухов Г.С. Основы теории горения двухфазных сред. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 240 с.
10. Шатиль А.А. Сжигание природного газа в камерах сгорания газотурбинных установок. Л.: Недра, 1972. 320 с.
11. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1980. 176 с.
12. Гиринович Т.А. и др. Экспериментальное исследование турбулентной струи, несущей тяжелые примеси // Механика жидкости и газа. 1981. № 5. С. 26–31.
13. Горбис З.Р. Теплообмен и гидродинамика сквозных потоков. М.: Энергия, 1970. 423 с.

14. Левин А.М. Принципы рационального сжигания газа. Л.: Недра. 1977. 247 с.
15. Малая Э.М. Аэродинамика, процессы горения и теплообмена ограниченных струйных течений. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1987. 160 с.

Поступила в редакцию 4.01.25
После доработки 18.02.25
Принята к публикации 20.02.25

Investigation of Mass Transfer in the Recirculation Zone with the Main Flow of Pseudoliquid Fuel

A.G. EGOROV AND A.S. TIZILOV

TSU, Togliatti

The paper presents results of experimental studies on the mass transfer process between the recirculation zone and the main flow of pseudoliquid fuel in a combustion chamber with sudden expansion. Dependencies of the residence time of aluminum particles in the recirculation zone on the characteristic size H , initial velocity u_0 , and turbulence intensity ε_0 of the incoming flow have been obtained. It has been demonstrated that the intensity of the mass transfer process between the recirculation zone and the main flow of an aluminum-air mixture with the particle sizes $d_{32} = 7.4 \mu\text{m}$, as well as for a gas-air mixture, can be estimated using the dimensionless residence time.

Sudden expansion chamber, aerosol suspension, residence time, aluminum particles, main flow, mass transfer