

В. В. Курятников¹, Л. Г. Милова²

¹*Одесский государственный экологический университет,*

²*Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова*

Сыпучесть углеродного порошкообразного горючего в системах его подачи в камеру сгорания

Рассмотрены способы повышения эффективности систем подачи углеродного порошкообразного горючего в камеру сгорания генератора плазмы. С одним из них связан способ приготовления углеродного горючего с легкоионизирующейся присадкой, обладающей малой гигроскопичностью и слабой растворимостью в воде. Сыпучесть такого порошкообразного горючего в системах его подачи мало изменяется со временем. Другой способ связан с использованием систем подачи порошка из дозатора под действием механических вибраций. Установлено, что зависимости расхода порошкообразного горючего от частоты вибраций при подаче в камеру сгорания имеют экстремальный характер.

Стабильная и устойчивая работа различных камер сгорания на порошкообразном твердом топливе во многом зависит от организации высококачественной подачи топлива и его распыления в реакционном объеме. Особенности этих процессов связаны с возможностью достижения оптимальных характеристик системы подачи горючего, среди которых — постоянство насыпной плотности подаваемого горючего и стабильность коэффициента скольжения фаз, хорошая текучесть порошкообразного горючего через расходные шайбы в дозаторах, трубопроводах, пуско-отсечной арматуре и форсунках.

При различных способах подачи порошка в камеру сгорания:

- с использованием шнековых и барабанных питателей;
 - давлением газа через гибкую непроницаемую мембрану;
 - сплошным подающим или газопроницаемым поршнем;
 - непосредственно сжатым газом из дозирующей емкости,
- возникают сложности, связанные со свойствами сыпучих материалов. Это свойства, которые приводят к следующим недостаткам в работе систем подачи:
- неравномерности распределения давления в слое порошка;
 - склонности к образованию в системах подачи сводов распора (эффект “арки”) и пробок за счет внутреннего трения и сцепления частиц между собой, а также стенками дозатора и тракта подачи;
 - сильной зависимости текучести порошков от степени их влажности.
- Большинство из перечисленных недостатков устраняются при использо-

вании сжатого газа при подаче порошка в виде квазижидкости, которая может двигаться по трубопроводам и другим элементам системы подачи, а также распыляться форсунками подобно любой обычной жидкости. Так например, при исследованиях процессов высокотемпературного горения угля в камере сгорания импульсных МГД-генераторов [1] хорошо зарекомендовала себя система подачи порошка путем вытеснения его газом под давлением. В этих работах использовались порошки угля с дисперсностью частиц до 100 мкм, в том числе и уголь с добавками алюминиевого порошка АСД-1.

В случае недостаточно сухих порошков при организации подачи и сжигания их в камере сгорания наблюдаются явления брикетирования угля, образования пустот и пробок в элементах системы подачи, что приводит к нарушению равномерности подачи или даже к заклиниванию подающего тракта.

При использовании углеродного горючего в смеси с легкоионизирующейся присадкой поташа (1 — 10 %) влажность усугубляет агломерацию частиц. Образованные агломераты ухудшают текучесть порошков в элементах подачи и препятствуют равномерному распределению горючего по сечению камеры сгорания вследствие своей инерционности. Время их горения больше времени пребывания их в камере сгорания и расчетной приведенной длины последней становится недостаточно для полного сгорания. При этом уменьшается полнота сгорания и ухудшаются электрофизические характеристики плазмы продуктов сгорания.

Показано, что устранение этих недостатков возможно путем изменения технологии приготовления горючего и подбора присадок, обладающих рядом с требуемыми свойствами новыми качествами — малыми скоростью влагопоглощения и гигроскопичностью.

Установлено, что скорость влагопоглощения K и агломерация такого горючего резко замедляется (исследовался уголь марки ОУ-А дисперсностью до 50 мкм и легкоионизирующиеся присадки в виде соединений щелочного металла) по сравнению с соответствующими характеристиками используемого углеродного горючего с присадкой поташа [2].

Для определения скорости влагопоглощения присадок их предварительно высушивали в сушильном шкафу при температуре $T = 393 — 420$ К в течение 1 — 2 часов. После их сушки определяли начальную массу образцов m_0 . Затем образцы присадок выдерживали в открытых чашках Петри в течение времени $t_1 = 3 \div 5$ часов при комнатной температуре и влажности до 60 — 70 %. После этого испытываемые образцы повторно взвешивали, определяли их массу m_1 и по ее изменению массы $\Delta m_1 = m_1 - m_0$ находили скорость влагопоглощения K_1 :

$$K_1 = \frac{\Delta m_1 \cdot 100}{m_0 \cdot t}, \% / \text{час} .$$

В случае, если скорость влагопоглощения K_1 не более 0,5 % в час, осуще-

ствлялась дополнительная выдержка образцов в течение времени $t_2 = 15$ часов и аналогично определялись изменение массы $\Delta m_2 = m_2 - m_1$ и скорость влагопоглощения K_2 :

$$K_2 = \frac{\Delta m_2 \cdot 100}{m_1 \cdot t}, \% / \text{час}$$

Из исследуемых присадок выбирается та, растворимость которой менее 0,1 кг сухого вещества на 1 литр воды, а скорость влагопоглощения при первоначальной выдержке не более 0,5 % в час, а при дополнительной выдержке менее 0,01 % в час. Таким требованиям удовлетворяет, например, марганцевокислый калий. В таблице 1 приведены данные определения скорости влагопоглощения и растворимости порошка марганцевокислого калия в сравнении с аналогичными характеристиками для порошка K_2CO_3 .

Таблица 1

Вещество	m_0 , кг	Δm_1 , кг	t_1 , час	K_1 , %/час	Δm_2 , кг	t_2 , час	K_2 , %/час	Растворимость, кг/л, [3]
$KMnO_4$	0,04	$5,6 \cdot 10^{-4}$	4	0,35	$5 \cdot 10^{-5}$	15	$8 \cdot 10^{-3}$	$6,38 \cdot 10^{-2}$
K_2CO_3	0,038	$65 \cdot 10^{-4}$	4	4,30	$23 \cdot 10^{-3}$	15	3,5	1,12

При смешении $KMnO_4$ с углем указанные выше недостатки устраняются. Становится возможным длительное хранение подготовленного горючего без существенного изменения за время хранения его свойств. Установлено, что влагопоглощение угля W , % с присадкой $KMnO_4$ меньше в 1,5 — 2 раза по сравнению с тем же углем, но с присадкой K_2CO_3 . В таблице 2 представлены данные по влагопоглощению W , % угля ОУ-А с дисперсностью, соответствующей диаметру частиц до 50 мкм. Влагопоглощение W , % угля с присадкой определялось процентным отношением привеса влаги в угле к начальной массе угольного порошка.

Таблица 2

Влагопоглощение W , % угля ОУ-А с присадкой соединений щелочных металлов

Содержание компонент, %	$KMnO_4$			K_2CO_3		
	1	8	16	2	6	10
W_1 , % (за время 168 час.)	11	7	5	13	11	9
W_2 , % (за время 2160 час.)	19	9	6	20	15	12

Горение исследуемых составов осуществлялось в камере сгорания генератора плазмы под давлением в кислородной среде. Сравнение электрофизических (электропроводность продуктов сгорания, энергетический комплекс) и термодинамических характеристик горения в камере сгорания генератора плазмы, соответствующих рассматриваемым составам угольного горючего, показывает, что использование горючего, содержащего в каче-

стве легкоионизирующейся присадки вместо поташа в тех же пропорциях марганцевокислый калий, позволяет сохранить без существенного изменения характеристики плазмы продуктов сгорания (таблица 3). Во всяком случае, всегда несложно подобрать такое количество присадки, чтобы эти характеристики остались неизменными. При этом качество приготовленного горючего не ухудшается с течением времени.

Требованиям малых значений растворимости и влагопоглощения удовлетворяют также такие калийные присадки, как $KBrO_3$, K_2CrO_7 , $K_2S_2O_5$.

Таблица 3

№ п.п	Компоненты горючего	Содержание компонентов в горючем (% по весу)					
		Присадка - K_2CO_3		Присадка - $KMnO_4$			
				Составы с сохранением доли присадки		Составы с сохранением электрофизических характеристик	
1	Углерод (С)	89,0	5,0	89,0	5,0	84,0	3,0
2	Алюминий(Al)	1,0	93,0	1,0	93,0	1,0	93,0
3	Поташ (K_2CO_3)	10,0	2,0	-	-	-	-
4	Марганцевокислый калий ($KMnO_4$)	-	-	10,0	2,0	15,0	4,0
№ п.п	Наименование электрофизических и термодинамических параметров	Величина параметров, соответствующих рассматриваемым составам					
1	Давление в КС, МПа.	3,18	2,80	3,18	2,80	3,18	2,80
2	Число Маха на срезе сопла.	3	3	3	3	3	3
3	Электропроводность продуктов сгорания σ , См/м	65,6	372,4	63,8	353,3	65,8	372,1
4	Энергетический комплекс σv^2 , (См/м)(км/с) ² .	420	1600	407	1554	420	1599
5	Подвижность электронов, л/Тл	1,60	0,71	1,73	0,83	1,56	0,72

Устранение указанных выше недостатков работы систем подачи порошкообразного горючего возможно и другим способом, связанным с использованием вибраторов.

Надежной и стабильной в наших исследованиях показала себя система подачи порошка из цилиндрического дозатора через конусообразное отверстие под действием механических вибраций. В качестве дозаторов использовались прозрачные стеклянные трубки различного диаметра (2 — 15 мм) с конусообразным сужением, заканчивающимся отверстием диаметром 1 — 3 мм. Частота вибраций задавалась с помощью генератора звуковых колебаний. Перед проведением опыта порошок засыпается в дозатор и определяет-

ся необходимый режим подачи, соответствующий требуемому расходу. Установлено, что расход горючего зависит не только от свойств порошкообразного горючего и параметров системы подачи, прежде всего диаметра отверстия в дне дозатора, но и от частоты вибраций. Поэтому регулирование расхода горючего в этом способе удобно производить изменением частоты генератора.

Установлено, что зависимости расхода от частоты имеют экстремальный характер. Насыпная плотность порошка и, соответственно, объем, занимаемый в дозаторе частицами порошка, могут изменяться под действием вибраций. При встряхивании порошка с помощью вибраций звуковых частот объем порошка уменьшается до определенных пределов. Начиная с некоторых значений частоты дальнейшее ее повышение приводит не к уменьшению объема, а к его увеличению. При этом в некоторых случаях происходит разделение порошка по высоте стеклянной трубки дозатора воздушными промежутками на отдельные части (столбики). В соответствии с этим от частоты вибраций зависят и плотность порошка в стеклянной трубке, а также скорость его подачи через тарированное отверстие (расход).

Теоретическое описание таких экспериментальных зависимостей и моделирование этих процессов связано прежде всего с успехами в развитии в настоящее время в рамках задач статистической механики теории гранулированных систем и их динамики.

С целью совершенствования вибрационной подачи порошка и исключения возможности разделения порошка в дозаторе на отдельные слои (столбики) в опытах по изучению воспламенения и горения пылеугольного факела использовался один из подобного типа вибрационных дозаторов, устройство которого состоит в следующем (рисунок 1). Порошок засыпается в сосуд 1 с отверстиями в дне сосуда. Сосуд крепится к корпусу 2 с воронкообразным отверстием, соединенным с трубкой 3, нижний конец которой вводится в отверстие реакционной камеры. Для того чтобы порошок подавался в реакционную камеру в нужном количестве, электромагнитный вибратор 5 воздействует с определенной частотой на сосуд с порошком. Расход порошка зависит как от частоты вибраций, так и от количества открытых отверстий в дне сосуда. Количество последних можно регулировать с помощью перекрывающей их пластины 6. При вращении микровинта 7 пластина 6 движется поступательно между конусообразным отверстием корпуса 2 и дном сосуда 1, перекрывая по очереди оставшиеся отверстия. Таким образом, микровинт 7 позволяет регулировать расход порошка. О количестве открытых отверстий и, таким образом, о расходе порошка при заданной частоте вибраций можно судить по показаниям шкалы 8 на корпусе датчика. Для каждой фракции порошка подбирается такая частота вибраций, которая соответствует максимальному расходу.

Таблица 4

№ фракции	Средний диаметр частиц, мкм	Масса частиц в единице объема взвеси $M \cdot 10^3$, кг/м ³
1	5	4,16
2	19	4,08
3	22	4,16
4	25	4,03
5	29	4,16
6	38	4,18
7	49	4,34

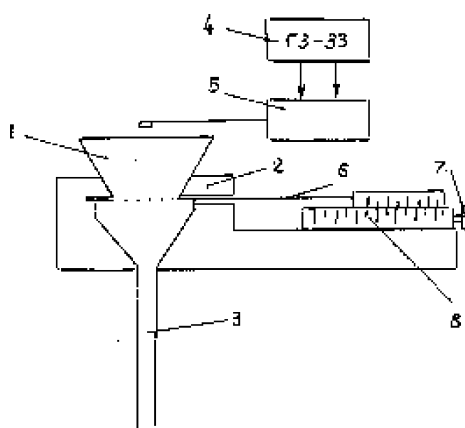


Рис. 1. Устройство вибрационного дозатора

С помощью представленных вибрационных дозаторов установлены условия образования сплошного пламени в дисперсном угле, измерены времена воспламенения и горения угольных частиц в факеле в зависимости от способа измельчения угля и состава вводимых поверхностно-активных, катализирующих или ингибирующих добавок. Например, зная расход порошка в дозаторе, несложно рассчитать массу частиц угля M в единице объема взвеси, которые образуют сплошное пламя. В таблице 4 приведены данные для угля АШ с выходом летучих $V^t=4,9\%$, подаваемого в поток кислорода при температуре 1183 К. Явление практической независимости массы M от размера частиц угля (погрешность расчета M соответствует погрешности определения расходов газа и порошка) указывает на общность механизмов воспламенения взвесей угля и таких металлов, как магний, алюминий и их сплавы, что свидетельствует о существенной роли выхода летучих и их гомогенного горения в процессе стабилизации пламени.

Литература

1. А.с. №1001642 Горючее для магнитогидродинамического генератора, СССР, 1982.
2. А.с. №1717598 Способ приготовления горючего для генератора плазмы, СССР, 1991.
3. Дж. Кэй, Т. Лэби. Таблицы физических и химических постоянных. -М.: Госиздат. физ.-мат. литературы, 1962. — С. 247.

В. В. Курятников, Л. Г. Мілова

Сипкість вуглецевого порошкоподібного пального в системах його подачі в камеру згоряння

АНОТАЦІЯ

Розглянуто способи підвищення ефективності систем подачі вуглецевого порошкоподібного пального в камеру згоряння генератора плазми. З одним з них зв'язаний спосіб готування вуглецевого пального з присадкою, що легко іонізується та має малу гігроскопічність і слабку розчинність у воді. Сипкість такого порошкоподібного пального в системах його подачі мало змінюється за часом. Інший спосіб зв'язаний з використанням систем подачі порошку з дозатора під дією механічних вібрацій. Установлено, що залежності витрати порошкоподібного пального від частоти вібрацій при подачі в камеру згоряння мають екстремальний характер.

Kurjatnikov V. V., Milova L. G.

Friable carbon dispersibilis combustible in systems it of submission in the comdustion chamber

SUMMARY

The methods of increase of efficiency of supply systems carbon dispersibilis combustibile in the combustion chamber of the generator of plasma are considered. The method of preparation carbon combustibile with a dope is connected to one from them by having ability it is easy to be ionized, small hygroscopicity and weak solubility in water. Friable such dispersibilis combustibile in systems it of submission is a little changed in due course. Other method is connected to use of supply systems of a powder from a capacity under an operation of mechanical vibrations. Is established, that of dependence of a cost dispersibilis combustibile from frequency of vibrations for want of to submission in the combustion chamber have an extreme character.