

УДК 536.46

**Экспериментальный стенд для исследования рабочего процесса в
ракетных двигателях и энергетических установках синтеза водорода на
порошкообразном алюминии**

Н.И. Быков, студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Ракетные двигатели»*

И.А. Десятниченко, студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Ракетные двигатели»*

Научные руководители: Д.А. Ягодников, д.т.н.

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Ракетные двигатели»*

Ю.Н. Власов, к.т.н., доцент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Ракетные двигатели»*

daj@bmstu.ru

В течение последних десятилетий постоянно расширяется область практического использования порошкообразных металлов (ПМ), с помощью которых представляется возможным повысить энергетические и эксплуатационные характеристики двигательных установок, а также разработать технологические процессы высокого уровня.

Одним из востребованных направлений развития техники в настоящее время является создание высокоэффективных установок на основе реакции окисления алюминия [4] в воздухе или парах воды для совершенствования характеристик рабочего процесса как в двигательных установках, так и в энергетических установках синтеза водорода, который считается топливом будущего. Его преобразование в тепловую и электрическую энергию в тепловых машинах позволяет получать более высокие температуры парогазовых смесей, чем при сжигании природного газа и, тем самым, существенно

увеличивать КПД выработки энергии. Кроме того, использование водорода существенно снижает выбросы оксида и диоксида углерода в атмосферу.

Для проверки существующих предложений по эффективному использованию алюминия при его взаимодействии с водой или воздухом, разработки методик проведения экспериментальных исследований необходимо создание экспериментальной установки, позволяющей определять характеристики рабочего процесса и отрабатывать отдельные его стадии и элементы конструкции.

Пневмогидравлическая схема универсального стенда, позволяющего исследовать процессы в двигательных установках и особенности протекания процесса синтеза водорода, представлена на рисунке 1.

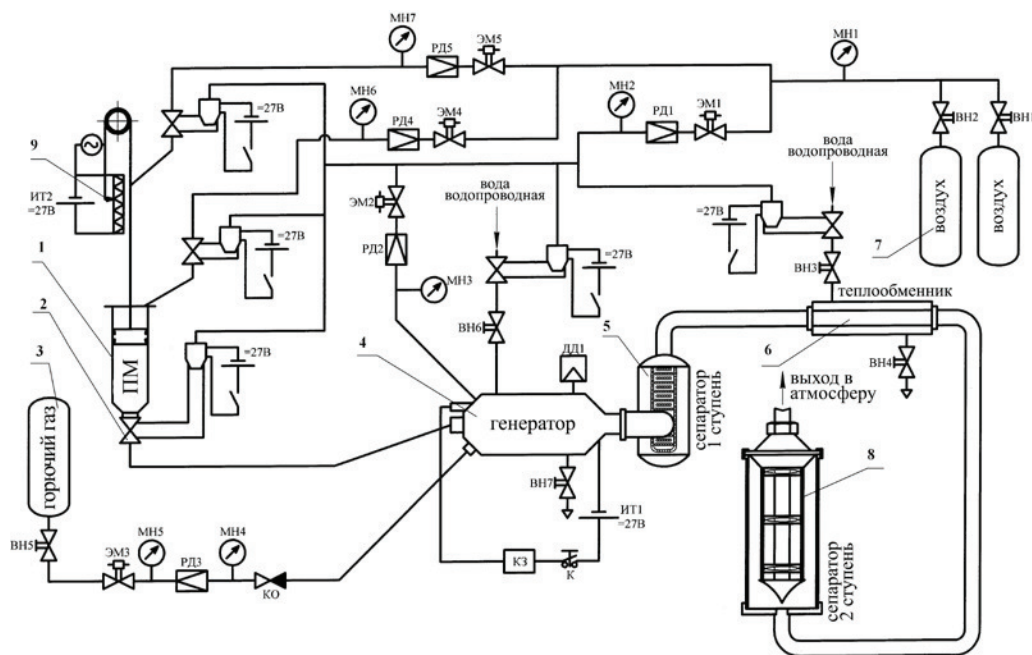


Рис. 1. Пневмогидросхема установки для исследования характеристик рабочего процесса в камере сгорания

1 – расходная ёмкость ПМ; 2 – клапан отсечной; 3 – ёмкость с газом для «факела сопровождения»; 4 – камера сгорания генератора; 5 – сепаратор 1-ой ступени; 6 – теплообменник; 7 – ёмкость с воздухом; 8 – сепаратор 2-ой ступени; 9 – устройство замера расхода ПМ

Установка состоит из порошкового питателя 1, который необходим для хранения и подачи через отсечной клапан 2 порошкообразного металла в газогенератор 4, камера сгорания которого предназначена для организации процесса горения ПМ с воздухом, подаваемым из баллонов 7, или водой, подаваемой через отсечной клапан и вентиль ВН6 из магистрали подачи. При отработке рабочего процесса горения ПМ с водой предусмотрен при необходимости высокотемпературный «факел сопровождения»

являющийся продуктами сгорания воздуха и горючего газа (пропана), находящегося в баллонах 3. Получаемые в камере сгорания продукты реакции поступают в циклонный сепаратор 1-ой ступени 5, где происходит отделение частиц конденсированной фазы крупных размеров. С помощью двух ступеней очистки предусматривается разделение газовой и конденсированной составляющих потока продуктов сгорания. Так как во второй ступени сепарации используются капроновые фильтры, то предусматривается охлаждение продуктов сгорания в теплообменнике 6, установленном после первой ступени очистки. После охлаждения отсепарированных продуктов реакции в теплообменнике они поступают на сепаратор 2-ой ступени 8, где с помощью фильтров производится разделение ультрадисперсных фракций конденсированной фазы и водорода, который на выходе утилизируется.

Универсальный стенд позволяет обрабатывать как режимы подачи порошков, для чего стенд оборудован системами замера расходов ПМ 9 и газа в реальном масштабе времени, так и режимы воспламенения и горения ПМ как с воздухом (кислородом) так и с водой. Пневмогидросхема стенда позволяет изменять в широком диапазоне соотношения компонентов и их расходы в газогенераторе.

При исследовании режимов подачи порошков на холодном газе теплообменник не используется, а вместо него устанавливается системы сбора порошка и определения суммарного объёмного расхода газа. Сбор порошка и газа осуществляется в специальную разборную ёмкость многократного использования, оборудованную прозрачным окном из оргстекла, позволяющим проводить фото- и видеосъёмку истекающей из форсунки струи. Ёмкость для сбора порошка (замкнутая труба диаметром 100 мм и длиной 700 мм) оборудована системой очистки и измерения расхода транспортирующего газа, состоящей из многослойного фильтра порошка и барабанного счётчика газа типа ГСБ-400. Расход собранного в процессе испытания порошка определяется весовым методом, равномерность расхода – с помощью датчика перемещения поршня, которым оборудована расходная ёмкость ПМ. Внешний вид рабочего участка установки представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Внешний вид рабочего участка установки в варианте определения расходов
ПМ

Видеосъёмка распыла струи порошка (рисунок 3) осуществляется с помощью цифрового фотоаппарата со скоростью съёмки – 15 кадров в секунду. Для обеспечения необходимой контрастности изображения с противоположной стороны ёмкости устанавливается источник света, а в самой ёмкости выполнено окно из оргстекла, которое матируется для устранения бликов на записи. Также производится видеосъёмка показаний газового счётчика с помощью фотокамеры со скоростью – 30 кадров в секунду. Для синхронизации времени срабатывания отсечного клапана и времени замера расхода газа используется светодиодная лампа, включаемая при подаче питания на открытие клапана и выключаемая при его закрытии.

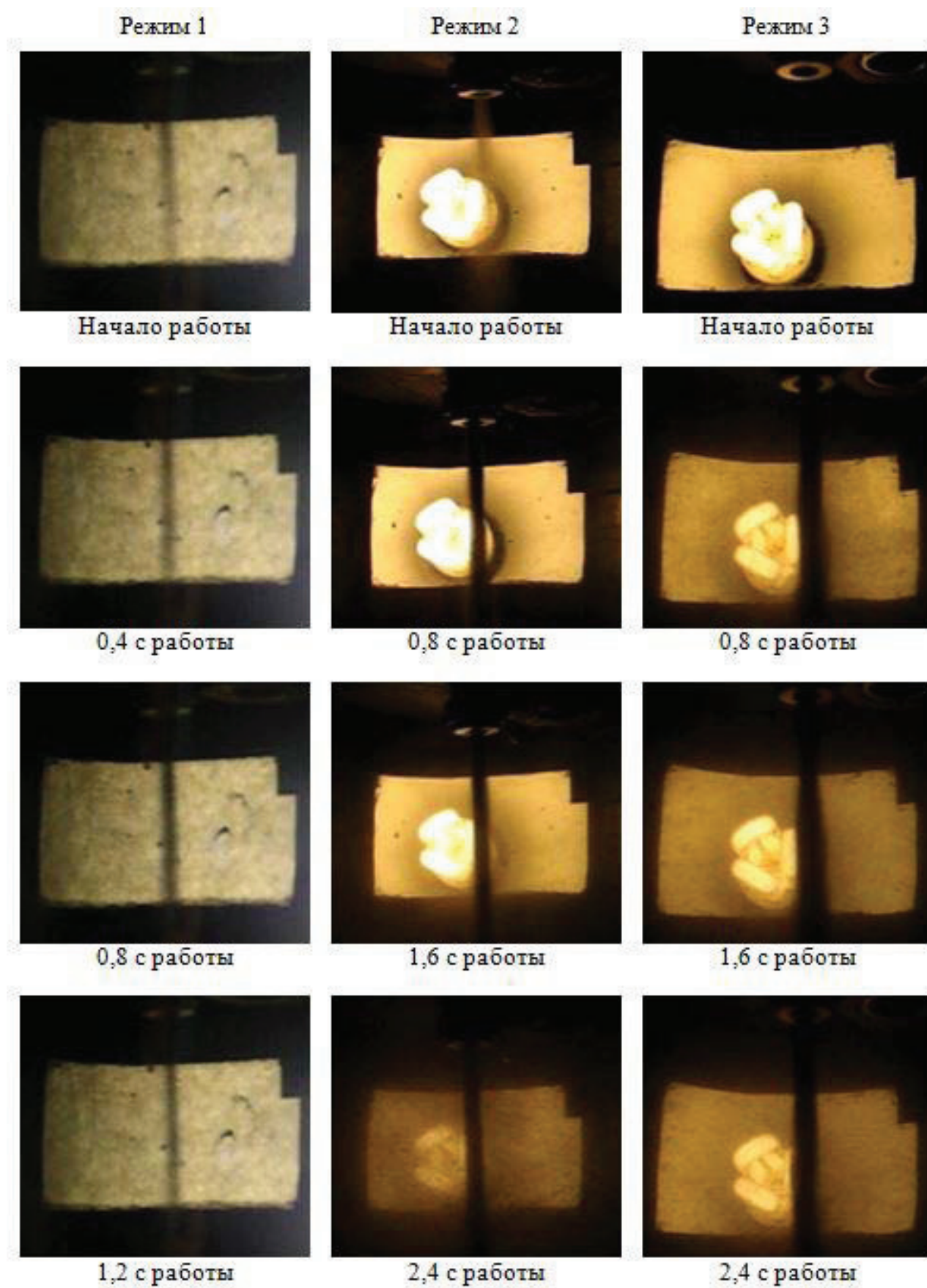


Рис. 3. Кинограмма течения порошка через распыливающий элемент. Перепад давления на дросселирующем элементе, МПа: Режим 1 – 0,20; Режим 2 – 0,43; Режим 3 – 0,77

При работе стенда на режиме исследования рабочего процесса или получения водорода ёмкость для сбора газа и порошка отстыковывается и между ступенями очистки продуктов сгорания подключается теплообменник, снижающий температуру продуктов реакции 1-ой зоны до значений, позволяющих обеспечивать работоспособность фильтра тонкой очистки сепаратора 2-ой ступени. Выходящий газ сбрасывается в атмосферу, при этом равномерность показаний счетчика фиксировалась с помощью видеокамеры.

Порошковый питатель предназначен для подачи порошкообразного металла в камеру сгорания. Он включает в себя расходную ёмкость ПМ (рисунок 4), которая состоит из цилиндрического корпуса 5, рассчитанного на рабочее давление до 15 МПа и снабженного поршнем 8, нижним 3 и верхним 11 днищами.

Ёмкость оборудована уплотнительно-запорной арматурой, системами подачи газа на псевдоожижение порошка и, через отсечной клапан 17, устройством дросселирования псевдоожиженного ПМ в зону газогенератора.

Газ на псевдоожижение подается через трубопровод 13, одновременно используемый для контроля равномерности перемещения поршня, для чего он через кулису связан с потенциометром. В предпоршневое пространство по магистрали 15 подводится газ для перемещения поршня с величиной давления, на 0,5 МПа превышающей величину давление в порошкообразном материале, подаваемом в камеру сгорания. Потребные давления газов устанавливаются с помощью независимых редукторов РД1-РД4 (рисунок 1). Для снижения расхода порошка через сопло форсунки к выходной конической части расходной ёмкости через трубопровод 4 с отдельным редуктором предусмотрен подвод дополнительного количества газа.

В структуру измерительной системы стенда введен цифровой регистратор-анализатор для динамических процессов *МИС-300М* (рисунок 5), некоторые характеристики которого представлены в таблице 1. При этом время работы установки определяется от момента открытия клапана на подачу ПМ до его закрытия, для чего в рабочую полость отсечного клапана установлен датчик давления, по показаниям которого вычисляется время пуска.

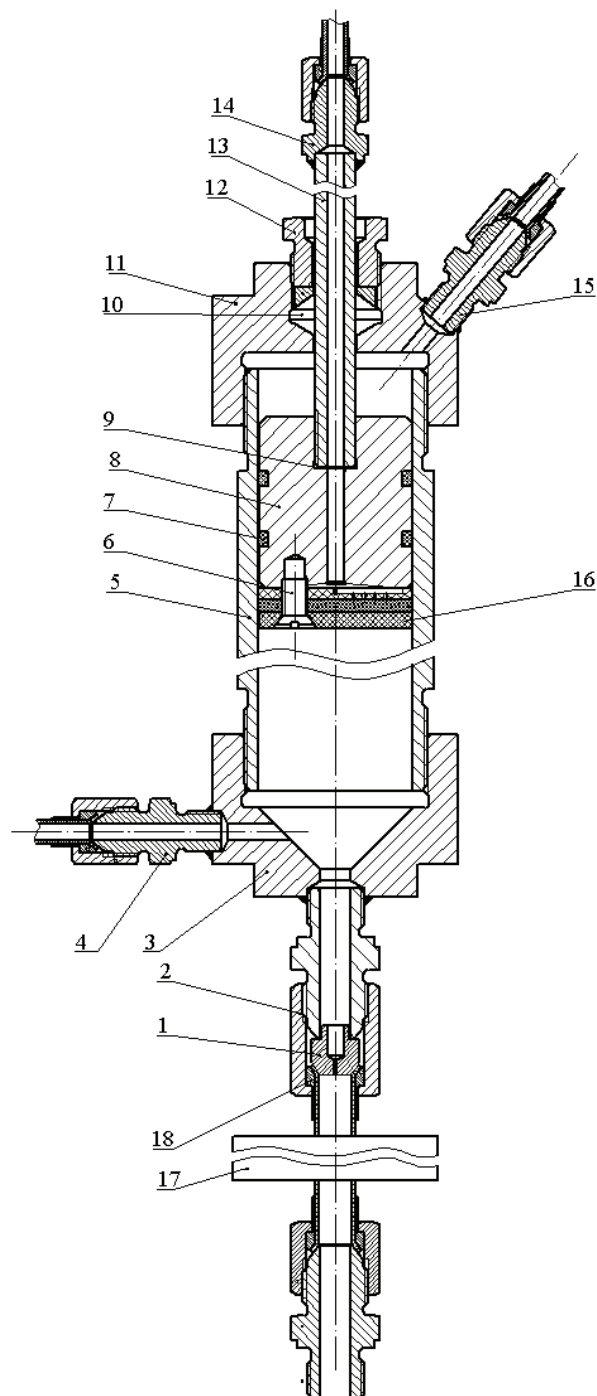


Рис 4. Питатель порошкообразного металла с отсечным клапаном:

1 – дроссель; 2 – штуцер; 3 – днище питателя нижнее; 4 – подвод газа псевдоожижения нижний; 5 – корпус питателя; 6 – винт крепления фильтра распределителя газа; 7 – уплотнение поршня; 8 – поршень; 9 – уплотнение трубки подвода газа в поршне; 10 – уплотнение подвижной трубки подвода газа; 11 – днище питателя верхнее; 12 – гайка регулировки затяжки уплотнения; 13 – трубка подвода газа псевдоожижения; 14 – штуцер подвода газа псевдоожижения; 15 – штуцер подвода газа на перемещение поршня; 16 – фильтр; 17 – клапан отсечной; 18 – гайка крепления дросселя



Рис. 5. Внешний вид регистратора MIC-300M

Таблица 1

Технические характеристики регистратора MIC-300M

Параметр	Значение
Число входных аналоговых дифференциальных каналов	8, 16, 24
Количество слотов	3
Амплитудный диапазон измерений, В	± 12
Частота дискретизации, кГц/канал	0,422–216
Разрядность АЦП (индивидуальные на каждый канал), бит	24
Дисплей, дюймы (")	10,4
Номинальная потребляемая мощность, не более, Вт	120
Средний срок службы, не менее, лет	7
Наработка на отказ, не менее, ч	10000
Масса, кг	14
Габариты, мм	340 x 320 x 205

Предварительные расчёты [1, 5] показывают, что для решения многих конкретных задач по созданию высокоэффективных установок расходы порошкообразного алюминия должны находиться в диапазоне от 1 до 10 г/с. Достаточно отработанные режимы подачи порошков с помощью псевдоожижения в режиме «заторможенного плотного слоя» (ЗПС) [2], т.е. при определенных соотношениях диаметров подводящего трубопровода и дроссельного элемента, для реализации малых расходов требуют размеры отверстий сопла форсунки менее 0,5 мм даже при незначительных (до 0,1 МПа) перепадах давления, что вызывает дополнительные сложности при реализации процесса стабильной подачи порошкообразных горючих.

В процессе отработки стенда проведены предварительные эксперименты по определению расходов порошкообразного алюминия марки АСД-4 и несущего газа при различных значениях перепада давления на поршне и форсуночном блоке.

Типичный вид осциллограммы записи основных параметров, полученный в пакете вторичной обработки «WinПОС» представлен на рисунке 6.

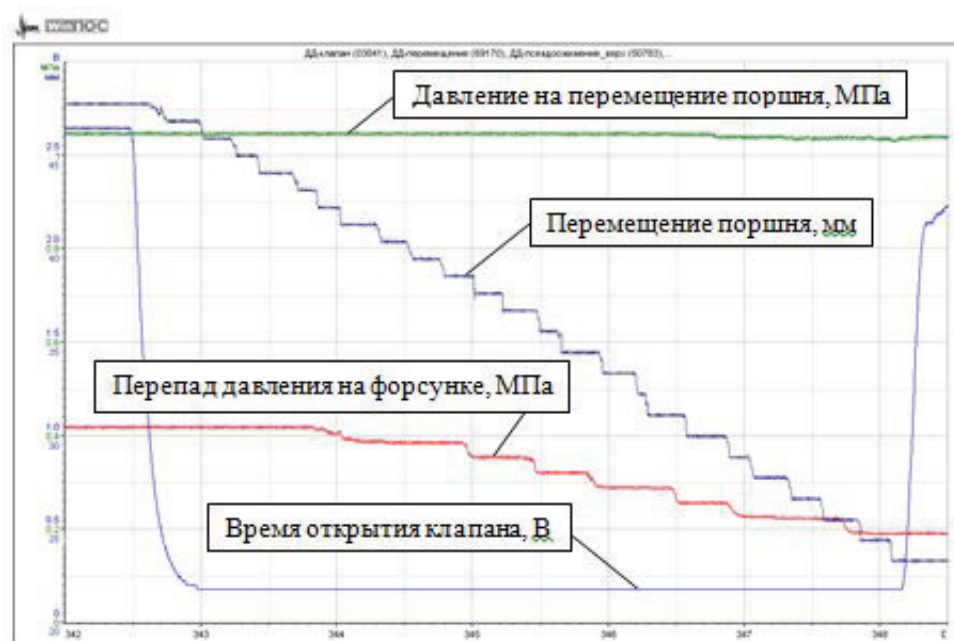


Рис. 6. Типичный вид осциллограммы записи основных параметров

На рисунке 7 представлены зависимости расхода ПМ от перепада давления на дросселе диаметром 0,5 и 1 мм. Приведенные зависимости свидетельствуют, что, как и при подаче жидкости, массовый расход пропорционален перепаду давления $\Delta p_{др}$ в степени $\sim 1/2$.

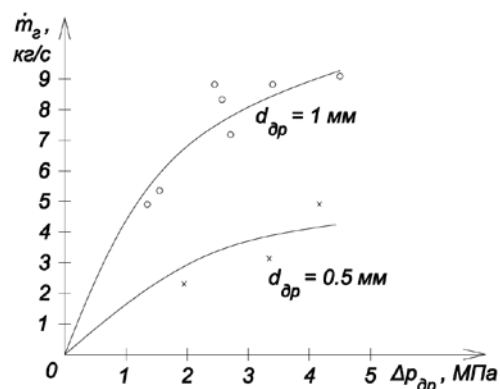


Рис. 7. Зависимость расхода ПМГ АСД-4 от перепада давления на распыливающем элементе при различных диаметрах форсунки

Установлено, что в диапазоне давлений транспортирующего газа до 1 МПа относительная массовая доля газа (воздуха) при диаметре дросселя 0,75 мм, не превышает 6–7 % от расхода ПМ. В процессе дальнейшей отработки установки указанная величина потребного расхода газа может быть оптимизирована.

Таким образом, представленная установка позволяет экспериментально отрабатывать параметры вытеснительной системы подачи металлических, в том числе алюминиевых, порошков марок АСД, ПАП, ПАД в камеру сгорания, выбрать оптимальный несущий газ для псевдоожижения и подачи ПМ, выполнить градуировку системы измерения расхода ПМ и минимизировать расход несущего газа для подачи ПМ заданного расхода. Данные с видеозаписей позволяют делать выводы о стабильности подачи порошка, а также определять угол распыла и его зависимость от параметров пуска, а также позволяют оценить равномерность расхода газа и определить суммарный расход газа за время испытания. При изменении режимов работы на кинограмме пуска видно увеличение угла распыла струи, а также рост массового расхода порошка (струя заметно утолщается и становится оптически менее прозрачной) при увеличении перепада давления на дросселирующем элементе. В серии предварительных экспериментов подтверждена работоспособность системы подачи ПМ на основе алюминия марки АСД-4 при расходе последнего до 15 г/с и относительной массовой доли несущего воздуха не более 6 %.

Список литературы

1. Трусов Б.Г. Компьютерное моделирование фазовых и химических равновесий // Электронный научно-технический журнал «Инженерный вестник». Август 2012. URL. <http://engbul.bmstu.ru/doc/483186.html> (дата обращения 22.12.2012).
2. Шацкий О.Е., Щербakov А.А., Власов Ю.Н. Подача псевдоожиженных порошков в режиме заторможенного плотного слоя // Процессы горения и охрана окружающей среды.– Рыбинск: РАТИ, 1993. С. 43-47.
3. Шацкий О.Е. Регулятор давления прямого действия для подачи псевдоожиженного металлического горючего (ПМГ) в газогенератор // Электронный научно-технический журнал «Инженерный вестник». Октябрь 2012. URL. <http://engbul.bmstu.ru/doc/482664.html> (дата обращения 24.12.2012).
4. Ягодников Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов.– М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.– 432 с.
5. Trusov B.G. Program system TERRA for simulation phase and thermal chemical equilibrium // Proc. XIV Intern. Symp. on Chemical Thermodynamics. – St-Petersburg, Russia, 2002. – P. 483–484.