

УДК 536.46

Ю.Н. Власов¹, канд. техн. наук, доц., **Д.А. Ягодников¹,** д-р техн. наук, проф.,
Н.И. Быков^{1,2}, инженер, **К.В. Горячев¹,** инженер, **И.Н. Копытин¹,** инженер
1 – Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана, Россия

2 – РКК «Энергия» имени С.П. Королева, Россия
Тел./Факс: +7 (926) 8209852; E-mail: ollikahnstex@rambler.ru

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОДАЧИ ПОРОШКООБРАЗНОГО АЛЮМИНИЯ В КАМЕРУ АЛЮМОВОДОРОДНОГО ГЕНЕРАТОРА

Проведено расчетно-экспериментальное исследование процесса подачи порошкообразного алюминия в камеру экспериментальной установки, пред назначенной для экспериментальной отработки вытеснительной системы подачи малых расходов металлических порошков (в том числе алюминиевых, марок АСД, ПАП, ПАД) в зону горения камеры алюмоводородного генератора. Определены оптимальные значения массовых расходов несущего газа для псевдоожижения порошков, градуировка узла измерения расхода аэровзвеси частиц металла. Получены экспериментальные зависимости массового расхода порошкообразного алюминия марки АСД-4 от перепада давления на распыливающем элементе.

Ключевые слова: окисление алюминия, порошкообразный металл, псевдоожижение, процессы в камере сгорания, синтез водорода, система подачи, термодинамические расчеты.

1. Введение

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

Широкое внедрение последних достижений военно-промышленного комплекса в гражданские отрасли производства является логически необходимым для поддержания достигнутых нашей страной приоритетов. В последние годы сформировался экономически обоснованный интерес по эффективному использованию в процессе создания технических устройств конструкторского и технологического опыта, накопленного при разработке специальных двигательных установок.

Разработка принципов создания энергоустановок на основе окисления металлов для получения оксидов с минимальным содержанием примесей, проектирование энергетических установок синтеза водорода, применение новых видов топлива, включая использование порошкообразных металлов – наиболее характерные и постоянные тенденции развития энергетического машиностроения [1, 2].

Одним из востребованных направлений развития техники в настоящее время является создание высокоэффективных установок на основе реакции окисления алюминия [3] 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, так как 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 увеличить КПД установки.

© Власов Ю.Н., Ягодников Д.А., Быков Н.И., Горячев К.Ю., Копытин И.С.; 2014

венно увеличивать КПД выработки энергии. Кроме того, использование водорода дает возможность существенно уменьшить выбросы оксида и диоксида углерода в атмосферу.

Для проверки существующих предложений по эффективному использованию алюминия при его взаимодействии с водой или воздухом [2], разработки методик проведения экспериментальных исследований необходимо создание экспериментальной установки, позволяющей определять характеристики рабочего процесса и отрабатывать отдельные его стадии и элементы конструкции.

2. Установка

Пневмогидравлическая схема универсального стенда, позволяющего исследовать процессы в двигательных установках и особенности протекания процесса синтеза водорода, подробно рассмотрена в работе [4].

Стендовая установка на режиме исследования рабочего процесса или получения водорода состоит из следующих узлов:

- Камера сгорания генератора газа, снабженная внутренним охлаждающим трактом с независимым источником подачи охладителя (воды) от внешнего бака.
- Порошковый питатель с отсечным клапаном, который предназначен для подачи порошкообразного металла в камеру сгорания.
- Электроискровая система зажигания, используемая для воспламенения ПМ.
- Сепаратор 1-ой ступени (циклон), улавливающий основную массу конденсированных частиц продуктов сгорания топлива.
- Фильтр тонкой очистки из капроновой ткани, используемый для улавливания ультрадисперсных фракций продуктов сгорания.
- Теплообменник, снижающий температуру продуктов реакции 1-ой зоны до значений, позволяющих обеспечивать работоспособность фильтра тонкой очистки сепаратора 2-ой ступени. Выполнен по принципу «противоток».

В минимальном сечении камеры сгорания установлен сменный сопловой вкладыш значения размеров критического сечения которого для поддержания заданных режимных параметров рассчитываются в зависимости от требуемых значений давления и расхода топлива.

Внешний вид установки представлен на рисунке 1.

При исследовании режимов подачи порошков на холодном газе теплообменник не используется, а вместо него устанавливается системы сбора порошка и определения суммарного объемного расхода газа в реальном масштабе времени. Выходящий газ сбрасывается в атмосферу, при этом равномерность показаний счетчика фиксируется с помощью видеокамеры. Все измеряемые параметры выводятся на измерительно-регистрирующее устройство типа МІС-300М.

Предварительные расчеты показывают, что для решения многих конкретных задач по созданию высокоеффективных установок расходы порошкообразного алюминия должны находиться в диапазоне от 1 до 10 г/с. Для гарантированной работы установки в режиме «заторможенного плотного слоя» [5] при планируемом диапазоне давлений и расходов необходимо использовать дроссельные шайбы с минимальным сечением менее 2 мм (для ПМГ АСД-8 при диаметре подводящего трубопровода 10 мм). В то же время, использование шайб с отверстиями диаметром менее 1 мм приводит к агломерации частиц порошка и облитерации проходного сечения.

В связи с перечисленными факторами принято решение использовать для подачи ПМГ дроссельную шайбу с диаметром проходного сечения 1 мм.

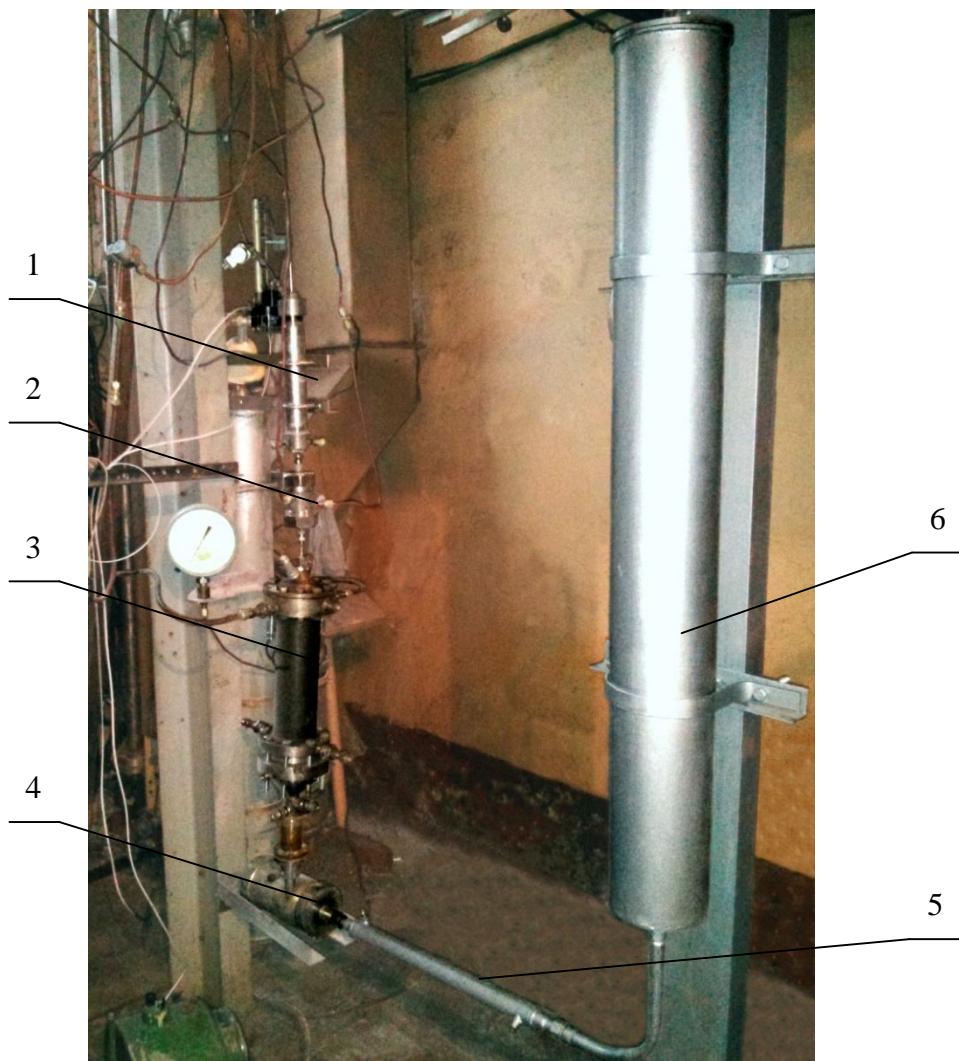


Рис. 1. Внешний вид установки для исследования режимов работы камеры сгорания: 1 – порошковый питатель; 2 – отсечной клапан ПМ; 3 – камера сгорания; 4 – сепаратор; 5 – теплообменник; 6 – фильтр тонкой очистки

3. Расчеты и результаты

Для настройки на заданные режимные параметры и анализа характеристик внутренней баллистики выполнены термодинамические расчеты [6, 7] продуктов сгорания при взаимодействии алюминия с воздухом или водой при различных начальных температурах воды, давлениях p_k и соотношениях компонентов K_m .

Для обеспечения работоспособности камеры сгорания, расчета тепловых потоков и проектирования системы тепловой защиты необходимо знать значения температуры продуктов сгорания и относительной массовой концентрации к-фазы. Их зависимости от соотношения компонентов и давления в камере сгорания при взаимодействии алюминия с воздухом и водой представлены на рисунках 2, 3 и 4, 5 соответственно.

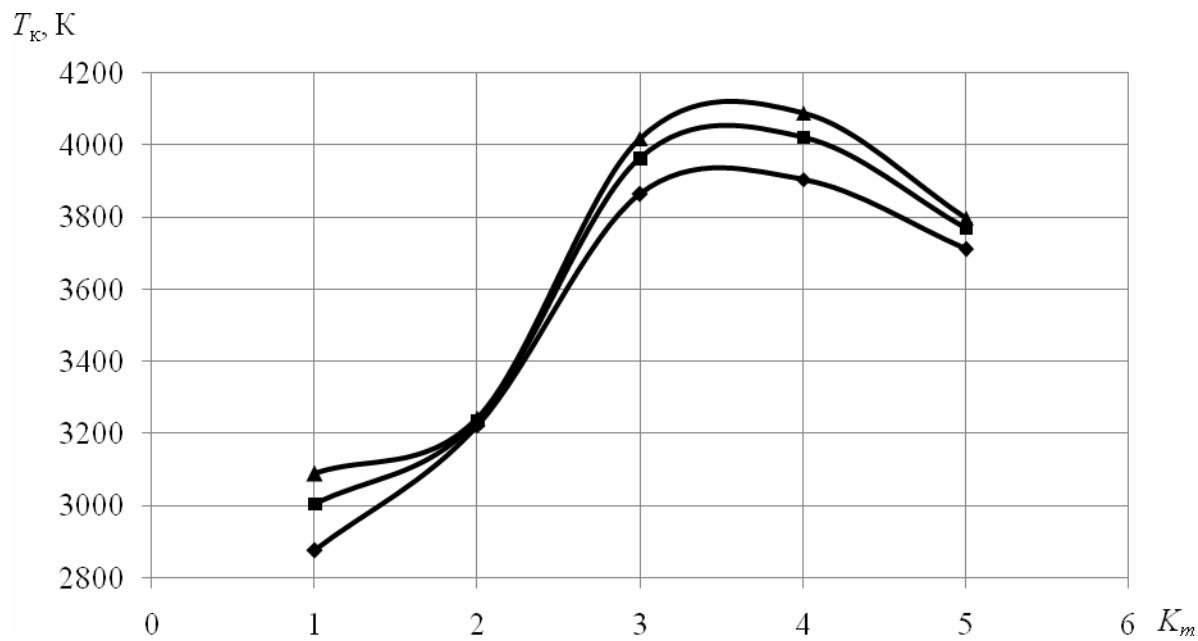


Рис. 2. Залежність температури продуктів сгорання від співвідношення компонентів (алюміній-воздух). Давлення в КС:♦ – 1 МПа; ■ – 2 МПа; ▲ – 3 МПа

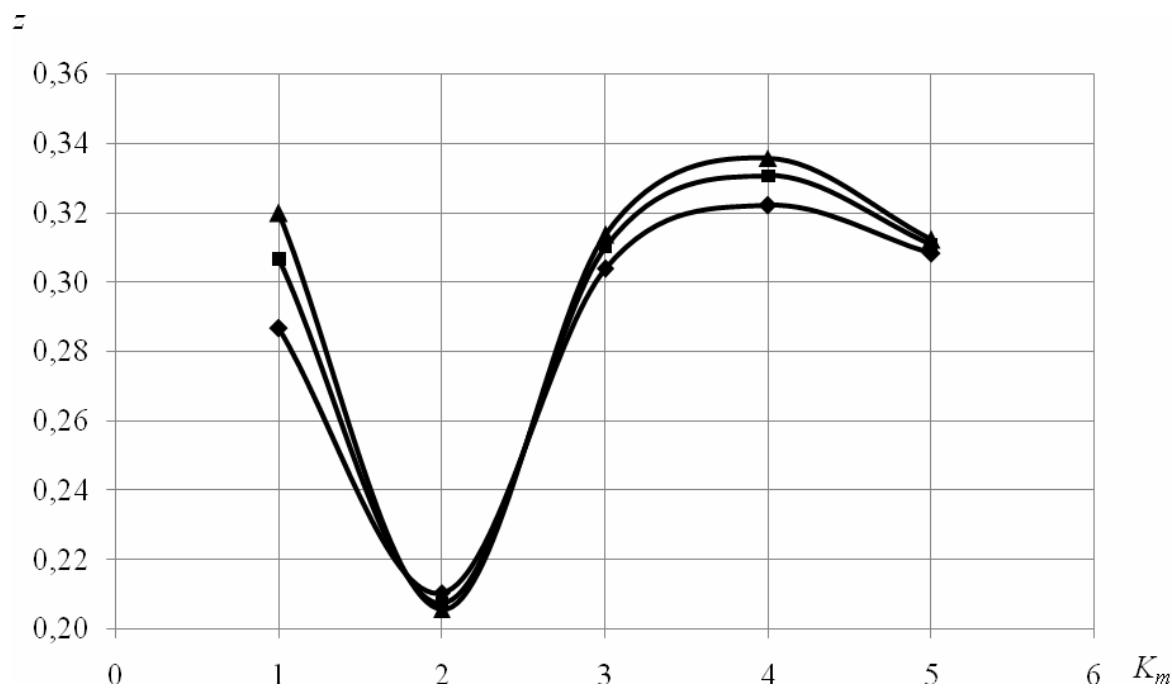


Рис. 3. Залежність відносительної масової концентрації конденсованої фази від співвідношення компонентів (алюміній-воздух). Давлення в КС:♦ – 1 МПа; ■ – 2 МПа; ▲ – 3 МПа

T_K, K

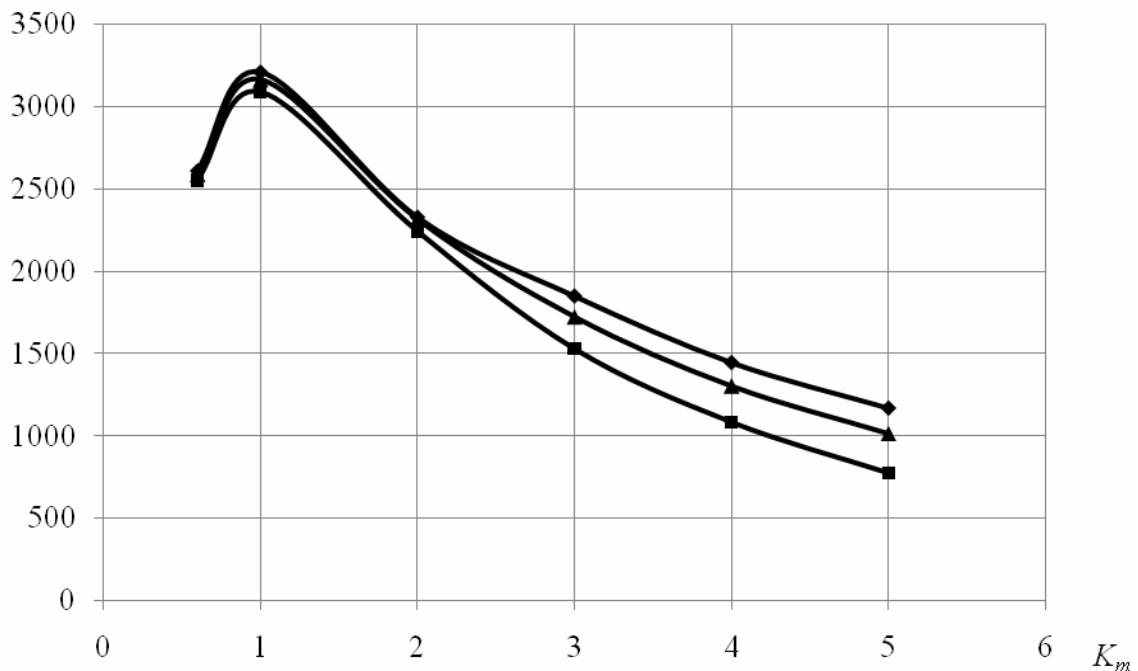


Рис. 4. Залежність температури продуктів сгорання від співвідношення компонентів. Температура води ($p_c = 3 \text{ MPa}$): \diamond – $250^\circ C$; \blacktriangle – $150^\circ C$; \blacksquare – $20^\circ C$

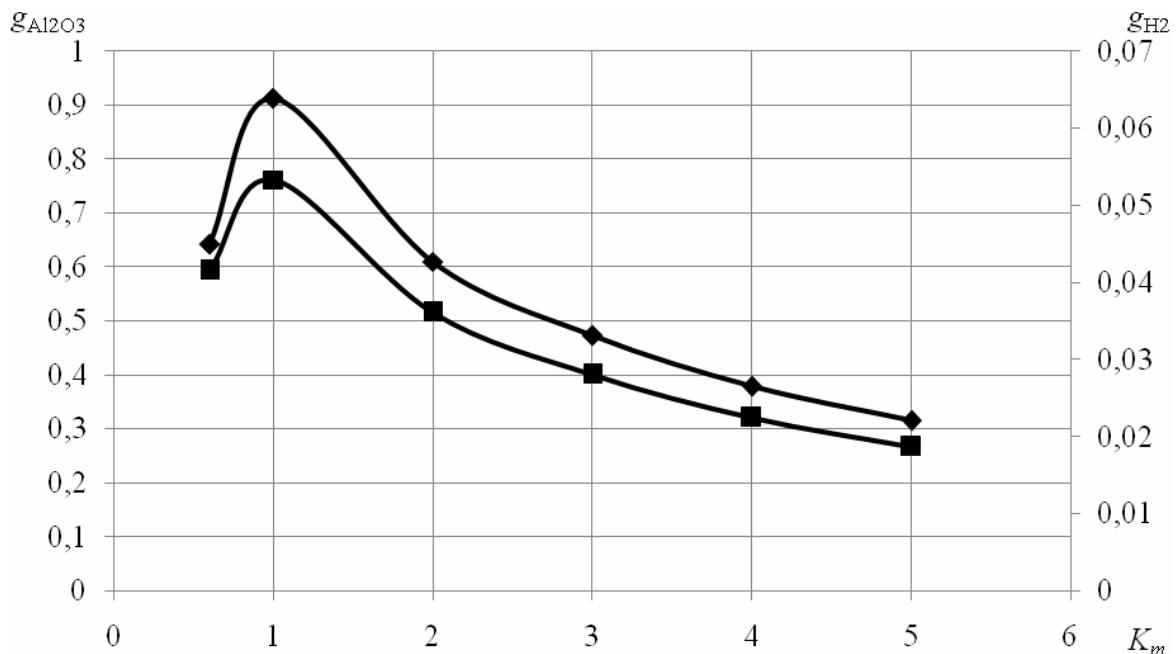


Рис. 5. Залежності відносительних масових концентрацій оксида алюмінію та водороду від співвідношення компонентів (алюміній-вода $150^\circ C, p_c = 3 \text{ MPa}$). Вещества: \diamond – оксид алюмінію; \blacksquare – водород

Определение диаметра критического сечения сопла (в предположении отсутствия потерь в камере установки) проводилось по следующей формуле:

$$d_{kp} = \left(\frac{4 \cdot \beta \cdot \dot{m}_e \cdot (1 + K_m)}{p_k \cdot \pi} \right)^{0.5},$$

где \dot{m}_e – массовый расход ПМ через камеру сгорания, β – расходный комплекс, равновесные значения которого приведены на рисунке 10.

В табл. 1 представлены размеры критического сечения сопл при различных значениях расходов горючего для близких к стехиометрическому соотношению компонентов. При расчетах полнота сгорания принималась равной единице.

Таблица 1. Результаты расчета размеров критического сечения сопел при различных значениях расходов горючего для стехиометрических соотношений компонентов

p_k , МПа	1			2			3			Соотношение компонентов K_m
\dot{m}_e , г/с	1	10	100	1	10	100	1	10	100	
Диаметр критического сечения, мм										
Реакция с воздухом	3,1	9,8	30,8	2,2	6,9	21,8	1,8	5,6	17,8	3,5
Реакция с водой (20 °C)	3,5	11,0	34,7	2,5	7,8	24,5	2,0	6,3	20,0	1

Значения параметра $\beta = (p_k \cdot f_{kp}) / \dot{m}_e$ представлены на рисунке 6.

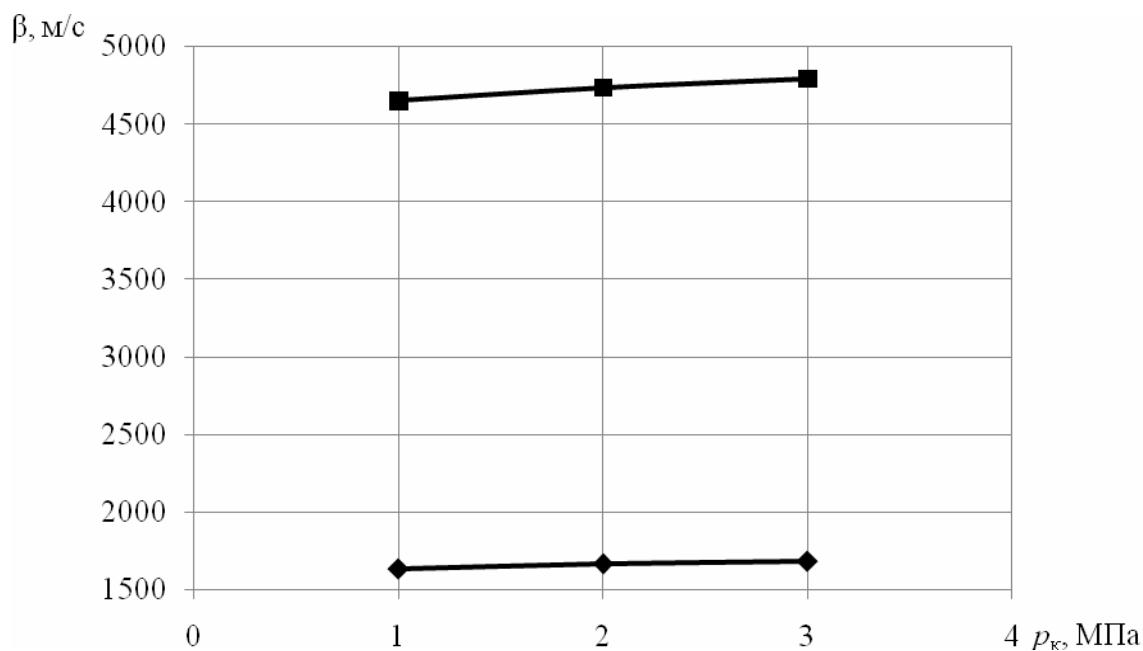


Рис. 6. Зависимость β от давления в камере сгорания: \blacklozenge – взаимодействие с воздухом; \blacksquare – с водой

В процессе автономной 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, результаты которых сведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты отработки системы подачи ПМГ АСД-4 (при противодавлении 0,1 МПа, диаметр дросселя 1 мм)

№ исп.	Время испытания, t	Расход ПМГ, $\dot{m}_{\text{ПМГ}}$, кг/с · 10^{-3}	Расход газа, \dot{m}_r , кг/с · 10^{-3}	Перепад на дросселе, $\Delta p_{\text{др}}$	Отношение расходов газа / ПМГ, %
	с	кг/с · 10^{-3}	кг/с · 10^{-3}	Па · 10^5	—
1	6,8	8,82	0,314	3,41	3,56
2	6,6	9,09	0,365	4,50	4,01
3	3,6	4,90	0,200	1,35	4,08
4	6,8	8,82	0,321	2,45	3,64
5	3,8	5,35	0,207	1,55	3,87
6	3,6	8,33	0,569	2,57	6,83
7	4,7	18,65	0,86	12,2	4,61
8	7,7	21,99	0,36	12,3	1,64
9	10,9	15,69	0,61	7,2	3,89
10	9,8	4,28	0,35	1,8	8,18
11	4,5	15,13	0,65	7,0	4,30
12	13,8	7,07	0,46	5,7	6,51
13	10,1	10,12	0,54	5,2	5,34

По результатам отработки составлены графики, представленные на рис. 7, которые отражают реальную зависимость массовых расходов ПМГ и транспортирующего воздуха от перепада давления на форсунке. По характеру кривых видно, что,

как и при подаче жидкости, массовый расход пропорционален перепаду давления Δp_{Φ} в степени $\sim 0,5$. Получены эмпирические зависимости, позволяющие рассчитывать необходимые значения режимных параметров для оценки ожидаемых значений давления и соотношения компонентов в камере сгорания:

$$\dot{m}_{\text{ПМГ}} = 1,685 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{\Delta p_{\Phi}},$$

$$\dot{m}_e = 2,899 \cdot 10^{-6} \cdot 0,388 \sqrt{\Delta p_{\Phi}},$$

где $\dot{m}_{\text{ПМГ}}$ – массовый расход ПМГ, \dot{m}_e – массовый расход транспортирующего воздуха, Δp_{Φ} – перепад давления на форсунке (при противодавлении 0,1 МПа).

Типичный вид ос-

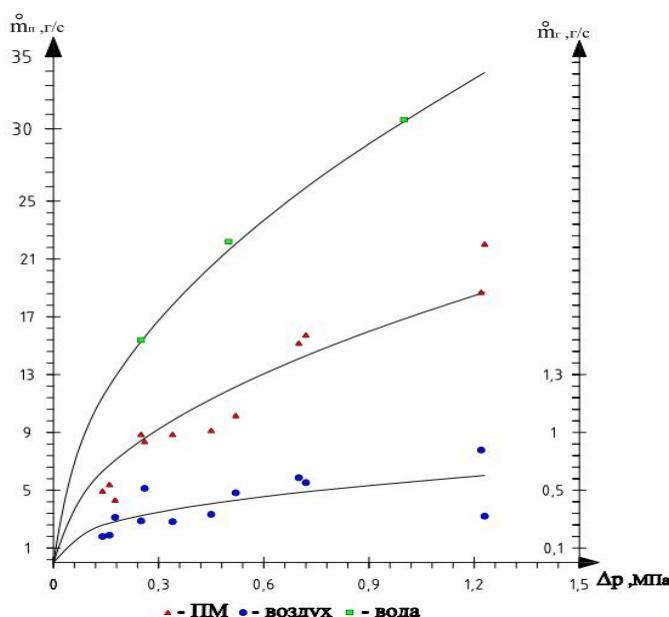


Рис. 7. Зависимость расхода ПМГ АСД-4 и несущего газа от перепада давления на распыливающем элементе при диаметре форсунки равном 1 мм, а также результаты экспериментов на воде

циллографмы записи основных параметров, полученный в пакете вторичной обработки “WinPOS” представлен на рисунке 8.

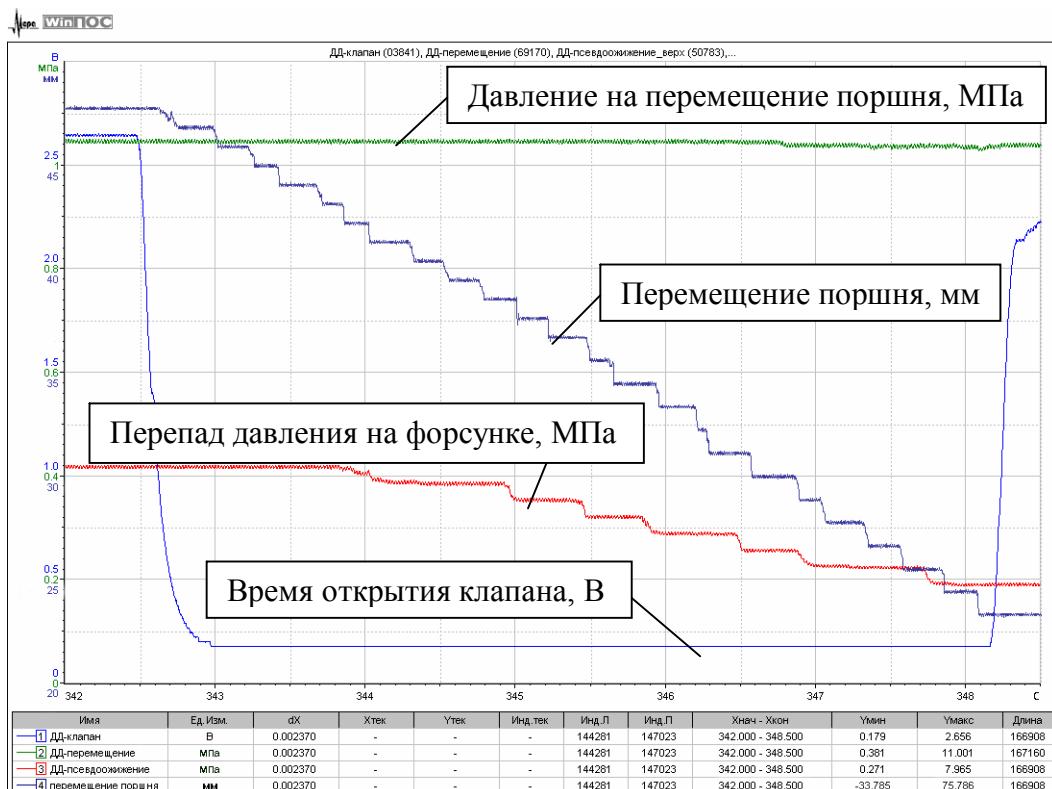


Рис. 8. Типичный вид осциллографмы записи основных параметров

4. Заключение

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 подачи ПМ, выполнить градуировку системы измерения расхода ПМ и минимизировать расход несущего газа для подачи ПМ заданного расхода. В серии предварительных экспериментов подтверждена работоспособность системы подачи ПМ на основе алюминия марки АСД-4 при расходе последнего до 22 г/с и относительной массовой доли несущего воздуха не более 8,5 %.

Список литературы:

1. Власов Ю.Н. Особенности расчета системы подачи псевдоожиженного металлического горючего в режиме заторможенного плотного слоя / Ю.Н. Власов, О.Е. Шацкий // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 4. – URL. <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/708.html> (дата обращения 02.12.2013).
2. Власкин М.С. Реактор гидротермального окисления алюминия непрерывного действия и энергетическая установка на его основе: автореф. дис. на соиск. учен. степ. к.т.н.: специальность 05.14.01 <Энергетические системы и установки> /; [Объед. ин-т высоких температур РАН]. – Москва: 2012. – 26 с.
3. Ягодников Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов / Д.А. Ягодников. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 432 с.
4. Yagodnikov D.A., Vlasov Yu.N., Bykov N.I., Desyatnichenko I.A., Voroz-

heeva O.A..Experimental Development of Low Flow Rate Pressure Feed System and Design of Installation for Analysis of Work Process in Hydrogen Synthesis Power Systems on Powder Aluminium. Science Journal of Energy Engineering. Vol. 1, No. 2, 2013, pp. 5–12. doi: 10.11648/j.sjee.20130102.11

5. Шацкий О.Е. Подача псевдоожиженных порошков в режиме заторможенного плотного слоя / Шацкий О.Е., Щербаков А.А., Власов Ю.Н. // Процессы горения и охрана окружающей среды. – Рыбинск: РАТИ, 1993. – С. 43–47.

6. Гурвич Л.В. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: справочное издание в 4-х т. / Гурвич Л.В., Вейц И.В., Медведев В.А. – М.: Наука, 1978–1982.

7. 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.

Надійшла до редакції 28.01.2014

Ю.М. Власов, Д.О. Ягодніков, М.І. Биков, К.В. Горячев, І.М. Копитін

**РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПОДАЧІ
ПОРОШКОПОДІБНОГО АЛЮМІНІЮ В КАМЕРУ АЛЮМОВОДНЕВОГО ГЕНЕРАТОРА**

Проведено розрахунково-експериментальне дослідження процесу подачі порошкоподібного алюмінію в камеру експериментальної установки, призначеної для експериментального відпрацювання витискної системи подачі малих витрат металевих порошків (у тому числі алюмінієвих, марок АСД, ПАП, ПАД) в зону горіння камери алюмоводневого генератора. Визначено оптимальні значення масових витрат несучого газу для псевдозрідження порошків, градуювання вузла вимірювання витрати аерозависі частинок металу. Отримано експериментальні залежності масової витрати порошкоподібного алюмінію марки АСД- 4 від перепаду тиску на розпилюючому елементі.

Ключові слова: окислення алюмінію, порошкоподібний метал, псевдозрідження, процеси в камері згоряння, синтез водню, система подачі, термодинамічні розрахунки.

Yu.N. Vlasov, D.A. Yagodnikov, N.I. Bykov, K.V. Goryachev, I.N. Kopytin

CALCULATION OF CHARACTERISTICS AND ANALYSIS OF PROCESSES OF ALUMINUM POWDER SUPPLY TO ALUMINUM HYDROGEN GENERATOR COMBUSTION CHAMBER

Calculation and experimental analysis for processes of aluminum powder supply to the test installation chamber, designed for experimental development of pressure feed system of low consumption of powder metal (including aluminum powder brands ASD, PAP, PAD) to combustion zone of aluminum hydrogen generator chamber was made. Optimal values of lift gas mass flow for powder metal fluidization were defined. Experimental dependences of ASD-4 powder aluminum mass flow on pressure difference at the spray element were found.

Keywords: oxidation of aluminum, powder metal, fluidization, processes in the combustion chamber, synthesis of hydrogen, supply system, thermodynamic calculations.