

УДК 621.453

**Е.С. Земерев, В.И. Малинин, Р.В. Бульбович**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

**А.В. Шатров**

ООО «Лаборатория эффективных материалов», г. Пермь

**РАЗРАБОТКА УЗЛА ПОДАЧИ ВОДЫ  
В КАМЕРУ СГОРАНИЯ УСТАНОВКИ СИНТЕЗА  
НАНООКСИДА АЛЮМИНИЯ**

Проанализированы основные типы камер сгорания. Рассмотрены основные типы распыливающих устройств. Форсунки необходимы для подачи воды, являющейся окислителем, в камеру сгорания установки синтеза наноксидов. Подобран наиболее подходящий диспергирующий узел, исходя из конструктивных и технологических условий. Требованиям к данному устройству наиболее полно отвечает набор струйных форсунок, представляющий из себя коллектор с отверстиями диаметром примерно равным 1 мм. Проведена термодинамическая оценка необходимого массового расхода воды, подаваемой с помощью диспергирующего узла в камеру сгорания установки. Для охлаждения потока в камере установки до температур 1000 К необходим расход воды 0,55 кг/с. Определены основные параметры устройства подачи воды и критический диаметр сопла камеры сгорания. Рассмотрены различные углы распыливания воды. Проведена оценка скорости и максимального диаметра капель воды в зависимости от отношения массовых расходов воды и порошка алюминия для разных углов истечения воды из форсунки. Показано, что наиболее приемлемым углом распыливания воды по отношению к направлению высокотемпературного потока в камере сгорания является угол 150°. Оценочное значение максимального диаметра капель – 300 мкм.

**Ключевые слова:** наноксид, опытно-промышленная установка синтеза, форкамера, прямоточная и противоточная камеры сгорания, охлаждение, форсунка, диспергирование, соотношение расходов компонентов.

**E.S. Zemerev, V.I. Malinin, R.V. Bulbovich**

Perm National Research Polytechnic University

**A.V. Shatrov**

“Laboratory of Effective Materials” LLC, Perm

## **DEVELOPMENT OF UNIT TO WATER SUPPLY IN THE COMBUSTION CHAMBER OF PLANT FOR SYNTHESIS OF ALUMINIUM NANOOXIDE**

The main types of combustion chambers are analysed. The main types of spray devices are considered. Jet apparatus are needed to water supply, which is oxidizer, in combustion chamber of plant for synthesis of nanooxids. On the basis of constructional and technological conditions the most suitable unit is selected. Requirements to this device is fully satisfied by set of spray injectors (it is collector with orifices by diameter approximately 1 mm). Thermodynamical estimate of a necessary mass rate of water, fed by means of the dispersing unit in combustion chamber of plant is carried out. To cool the flow in combustion chamber up to the temperatures of 1000 K it is needed the mass rate of water equal 0,55 kg/s. The main parameters of device to water supply and throat diameter of nozzle of combustion chamber are defined. Various angles of water dispersion are considered. The estimate of velocity and maximum diameter of water drops depending on the relation of mass rate of water and aluminum powder for various angles of the outflow of water from jet apparatus is carried out. It is shown that the most acceptable angle of water dispersion in relation to the direction of a high-temperature flow in the combustion chamber is the angle of 150 degrees. Estimated value of the maximum diameter of drops is 300 microns.

**Keywords:** nanooxide, experimental-industrial plant of synthesis, prechamber, straight-flow and reverse-flow combustion chambers, cooling, jet apparatus, dispersion, rate components ratio.

Нанодисперсные материалы, например наноксиды алюминия, находят применение в качестве сырья для изготовления уникальной керамики. Спрос на подобное сырье в будущем обещает быть высоким, и требуется разработать дешевые и производительные методы для получения ультрадисперсных оксидов. Перспективным методом их получения является сжигание порошков металлов в потоке воздуха и сепарация образовавшегося продукта в устройствах улавливания конденсированной фазы [1]. Другие известные методы имеют общий недостаток – низкую производительность, низкую экономичность и, как следствие, невозможность применения их в промышленных масштабах.

В ходе научно-исследовательских работ в ОКБ «Темп» при ПНИПУ по исследованию процессов горения в установке получения

дисперсных оксидов алюминия был разработан новый простой и эффективный метод синтеза высокодисперсных оксидов металлов [1–4]. Исследования горения порошков алюминия, распыленных в воздушном потоке, позволили заложить теоретические основы проектирования и расчета технологических процессов синтеза высокодисперсных оксидов путем сжигания исходных порошкообразных продуктов в потоке активных газов. В ОКБ «Темп» была спроектирована и изготовлена установка для получения наноультрадисперсных порошков алюминия. Данная установка состоит из системы подачи, форкамеры (ФК), камеры сгорания, устройства отбора дисперсных продуктов. Основным недостатком экспериментальной установки являлось малое время работы, недостаточная чистота целевого продукта. Для создания опытно-промышленной установки необходимо устранить данные недостатки.

Конструкция опытно-промышленной установки подобна экспериментальной установке, описанной в работах [1–4]. Форкамера необходима для смешения порошка с кислородом и аргоном, воспламенения и первичного горения образовавшейся металлогазовой смеси [5, 6]. Камера сгорания (КС) предназначена для смешения продуктов первичного горения, истекающих из форкамеры, с воздухом, сжигания данной смеси и синтеза оксида с заданными свойствами.

В данной работе предлагается заменить воздух, применяемый в качестве окислителя в КС, дистиллированной водой, не образующей оксиды азота  $\text{NO}_x$ . Данная замена окислителя позволит:

- увеличить чистоту целевого продукта за счет уменьшения примесей в исходных компонентах;
- уменьшить температуру потока продуктов первичного горения;
- уменьшить выбросы  $\text{NO}_x$  (улучшить экологичность установки).

Для решения данной задачи необходимо выполнить конструкторскую разработку узла подачи воды в камеру сгорания опытно-промышленной установки синтеза наноксида алюминия.

КС установки должна удовлетворять следующим требованиям:

- высокая полнота испарения воды (т.е. вся вода, введенная в камеру сгорания, должна испариться);
- надежный и плавный запуск;
- минимальная стоимость конструкции и простота ее обслуживания при эксплуатации;

- совместимость конфигурации камеры сгорания и системы подачи воды;
- большой ресурс;
- наименьшие размеры.

В воздушно-реактивных двигателях применяются КС, по направлению потока делящиеся:

- на прямоточные;
- противоточные.

Прямоточная КС – камера сгорания, в которой направление движения продуктов сгорания одинаково с направлением движения воздуха, входящего в камеру.

Противоточная КС – камера сгорания, в которой направление движения продуктов сгорания обратно направлению входящего в нее воздуха. В таких камерах достигается хорошее смесеобразование, однако они не так распространены из-за больших гидравлических потерь, связанных с поворотом потока на  $180^\circ$ .

Преимущества противоточной КС по сравнению с прямоточной:

- достигается наиболее благоприятное смесеобразование;
- меньшие габариты и масса.

Требованиям к камере сгорания и устройству подачи воды для установки синтеза наноксида алюминия наиболее полно отвечает противоточная камера сгорания (рис. 1). Данный тип КС будет иметь меньшие размеры по сравнению с прямоточной. Благодаря тому, что вода подается навстречу высокоскоростному потоку продуктов сгорания, в такой камере будет происходить дробление частиц воды на более мелкие капли и, соответственно, более быстрое испарение. Ранее подобная схема организации горения в камере сгорания предлагалась в работе [7].

Большое влияние на характеристики камеры сгорания установки будут оказывать процессы распыливания и испарения воды. Для того чтобы обеспечить в основной зоне горения испарение капель воды в количествах, достаточных для окисления паров алюминия и субоксидов алюминия ( $AlO$  и  $Al_2O$ ), истекающих из форкамеры, а также охлаждение высокотемпературного ( $>2500$  К) потока до требуемого значения, необходимо диспергировать подаваемую воду на большое число капель, увеличивая тем самым поверхность испарения. Чем меньше размер капель, тем больше скорость их испарения. Для распыления по-

даваемой в камеру сгорания с помощью форсунок воды могут применяться методы механического и гидравлического распыливания.

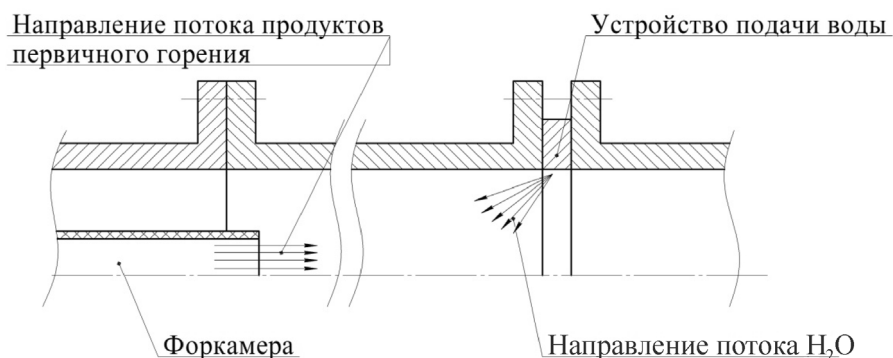


Рис. 1. Противоточная камера сгорания

К форсункам предъявляют следующие требования:

- хорошее распыливание подаваемой жидкости;
- отсутствие склонности к засорению посторонними частицами;
- низкая стоимость, малая масса;
- простота изготовления, монтажа и демонтажа для технического обслуживания;
- слабая чувствительность характеристик к повреждениям конструкции при изготовлении и монтаже.

В центробежных форсунках движущаяся под давлением жидкость закручивается в завихрителе с тангенциально расположенными каналами (ось каналов перпендикулярна или размещена под углом к оси форсунки, но не пересекается с ней) и, интенсивно вращаясь в камере закручивания, поступает в сопло форсунки, на выходе из которого распадается на мелкие капли, приобретая форму полого конуса [8]. Для правильной работы форсунки жидкость в нее подводится под избыточным давлением, величина которого зависит, главным образом, от требуемой дисперсности распыла, физических свойств жидкости и размеров дозирующих элементов. По сравнению со струйными форсунками давление жидкости на входе в центробежные форсунки больше из-за меньшего коэффициента расхода. Размеры сопла и тангенциальных каналов центробежных форсунок обычно находятся в пределах от 0,5 до 3 мм. Угол конуса распыла определяется отношением радиальной и осевой компонент скорости жидкости на выходе из сопла.

Центробежные форсунки не подходят для системы подачи воды данной установки по ряду причин. Во-первых, они отличаются относительной сложностью конструкции. Несмотря на хорошее распыливание жидкости и большой угол распыла, форсунки данного типа обладают низкой дальностью. Для охлаждения высокотемпературного потока, содержащего конденсированную фазу, центробежные форсунки потребуется поместить в эпицентр набегающего потока (рис. 2), что повлечет за собой усложнение конструкции системы подвода воды к форсунке и потребует применения износостойких и жаропрочных материалов для изготовления. Кроме того, такое расположение форсунок может привести к засорению их каналов.

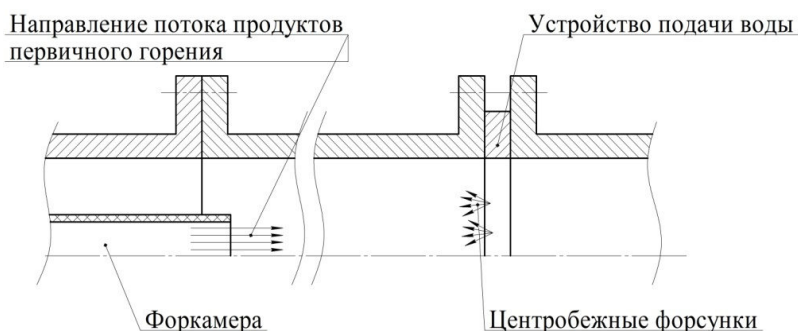


Рис. 2. Расположение центробежных форсунок в камере сгорания

Пневматические форсунки отличаются тем, что жидкость в них распыливается под воздействием подаваемого под давлением воздуха или газа [8]. Диспергируемая жидкость подается при низком перепаде давления на некоторую поверхность, край которой находится в высокоскоростном газовом потоке. Жидкость, стекающая с этого края, распыливается газовым потоком на мелкие капли, которые вносятся потоком в зону горения. Для работы пневматической форсунки кроме подвода воды необходимо будет организовать подвод воздуха, что влечет за собой усложнение конструкции самой форсунки и дополнительные затраты на проектирование и монтаж трубопроводов подвода воздуха.

В струйной форсунке распыливание жидкости осуществляется за счет истечения с большой скоростью через профилированное отверстие и столкновения жидкости с газовым потоком [8]. Струйные форсунки подачи воды в предлагаемой камере сгорания представляют собой коллектор с отверстиями. Большое число малых отверстий позво-

ляет равномерно распределить жидкость в пространстве. В случае струйных форсунок распыливание происходит с образованием жидких нитей, которые затем распадаются на капли. Распад струи улучшается с увеличением скорости потока и аэродинамических сил сопротивления окружающей среды.

Конструкция струйной форсунки является наиболее простым решением в конструкторском и технологическом отношении. Струйные форсунки обладают достаточной дальностью, благодаря чему их можно расположить радиально на стенке камеры сгорания. Также струйные форсунки, представляющие собой коллектор с отверстиями для подачи воды, оптимально впишутся в конфигурацию камеры сгорания. Форсунки, располагаясь радиально на стенке камеры сгорания, будут наименее всего подвержены абразивному воздействию и засорению частицами конденсированной фазы.

Необходимо произвести оценку требуемого массового расхода воды, подаваемой в камеру сгорания установки для охлаждения высокотемпературного потока до необходимых температур. В данной работе применяется многоцелевой программный комплекс «АСТРА.4» [9], предназначенный для определения характеристик равновесия, фазового и химического состава горючих смесей. Для описания смеси как материального объекта необходимо знать лишь содержание образующих ее химических элементов. Исходные данные для оценки:

- расход порошка алюминия  $G_{Al} = 0,1$  кг/с;
- расход кислорода  $G_{O_2} = 0,03$  кг/с;
- расход аргона  $G_{Ar} = 0,05$  кг/с;
- давление в камере сгорания  $p_k = 0,25$  МПа;
- температура в конце камеры сгорания  $T_{сг} = 900 \dots 1200$  К (принята из конструктивных требований, так как ограничена термостойкостью материала сопла).

Массовые расходы компонентов, подаваемых в ФК установки, приняты в соответствии с работой [6].

В табл. 1 приведена расчетная зависимость расходного комплекса  $\beta$ , а на рис. 3 – температуры в камере сгорания  $T_{сг}$  от отношения расходов воды и алюминия  $L$ .

Из графика рис. 3 можно сделать вывод, что наиболее приемлемое значение отношения расходов воды и алюминия для охлаждения высокотемпературного потока до 1000 К – 5...6. При расходе порошка

алюминия 0,1 кг/с соответствующее значение расхода воды  $G_{\text{H}_2\text{O}} = 0,5 \dots 0,6$  кг/с.

Поскольку установка синтеза наноксида алюминия является опытной, то необходимо добиться максимальной вариативности ее параметров. В данном случае необходимо предусмотреть как разное количество отверстий коллектора подачи воды, так и разный диаметр отверстий.

Таблица 1

Результаты термодинамического расчета горения алюминия при постоянном расходе Al, O<sub>2</sub>, Ar и переменном H<sub>2</sub>O

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$L$	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
$\beta$ , м/с	950	1310	1370	1350	1330	1295	1230	1165	1100	1040	980	930	870

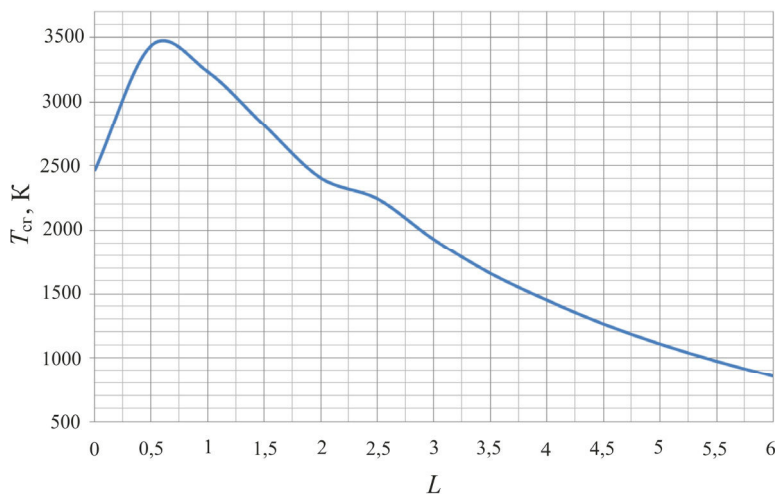


Рис. 3. Зависимость температуры продуктов сгорания от отношения расходов воды и алюминия

### Расход воды через форсунку

$$G_{\text{ф}} = \mu S_0 \sqrt{2\rho \Delta p_{\text{ф}}}$$

где  $\rho$  – плотность воды ( $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>);  $\Delta p_{\text{ф}}$  – перепад давления на форсунке;  $S_0$  – площадь отверстия форсунки;  $\mu$  – коэффициент расхода жидкости, зависящий от формы отверстия форсунки (0,6...0,99).



Значение коэффициента расхода для форсунки принимаем близким к идеальному значению – 0,95.

Согласно формуле, приведенной выше, рассчитываем  $G_{\phi}$  для диапазонов значений диаметра форсунки  $d_{\phi} = 1 \dots 1,5$  мм и перепада давления  $\Delta p_{\phi} = 1 \dots 1,5$  МПа. По найденным значениям расхода через форсунку определяем количество отверстий в коллекторе:

$$n = \frac{G_{H_2O}}{G_{\phi}}.$$

Вариация параметров конструкции коллектора представлена в табл. 2.

Таблица 2

Значения конструктивных параметров коллектора подачи воды при различных технологических параметрах

$d_{\phi}$ , мм	$\Delta p_{\phi}$ , МПа	$G_{отв}$ , кг/с	$n$
1	1,0	0,03	18
	1,5	0,04	14
1,2	1,0	0,05	12
	1,5	0,06	10
1,5	1,0	0,075	7
	1,5	0,09	6

Необходимо обеспечить расход воды в коллектор  $G_{H_2O}$ , равный 0,5...0,6 кг/с. Минимальный диаметр входного отверстия  $D_{вх}^{min}$  в коллектор воды при данном расходе равен 4 мм. Чтобы обеспечить приемлемую скорость движения воды через отверстие, принимаем значение условного диаметра заведомо большим:  $D_{вх} = 6$  мм.

### ***Оценка критического диаметра сопла камеры сгорания***

Ввиду того что технологический процесс синтеза наноксидов алюминия изменился (алюминий сжигается не в воздушном потоке, а в среде кислорода, аргона и воды), изменится площадь критического сечения сопла  $F_{кр}$  и, соответственно, его диаметр  $D_{кр}$ . Площадь критического сечения сопла рассчитывается по формуле [10]

$$F_{кр} = \frac{G_{\Sigma} \beta}{p_k \phi_c},$$

где  $G_{\Sigma}$  – суммарный массовый расход веществ;  $\varphi_c$  – коэффициент расхода сопла (принимается равным 0,98);  $\beta$  – расходный комплекс (см. табл. 1).

Критический диаметр сопла определяется по формуле

$$D_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{4F_{\text{кр}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,76 \cdot 10^{-3}}{\pi}} \approx 5,9 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

### ***Оценка скорости и максимального диаметра капли воды в потоке***

В данном расчете необходимо определить наиболее приемлемое значение максимального диаметра каплей воды, которое позволит обеспечить большую площадь испарения, что гарантирует необходимую скорость испарения, а следовательно, быстрое охлаждение потока и окисление продуктов первичного горения. Для оценки принято значение расхода воды в КС  $G_{\text{H}_2\text{O}}$ , равное 0,55 кг/с (в соответствии с расчетами, приведенными выше).

Принимается упрощающее предположение, что лимитирующим процессом в основной зоне КС является испарение каплей воды (считаем, что испарившаяся вода вступает в реакцию мгновенно). Предположение обосновывается тем, что в камере сгорания капли воды достаточно крупные и испаряются медленно, а алюминий присутствует здесь в парообразном состоянии. В этом случае можно определить параметры потока в каждом сечении КС в рамках расчета термодинамического равновесия. Однако исходным параметром для расчета является не отношение расходов подаваемой в камеру сгорания воды и порошка алюминия  $L$ , а отношение расходов испарившейся в рассчитываемом сечении воды и порошка алюминия.

В табл. 3 приведены термодинамические параметры потока в зависимости от отношения расхода воды, испарившейся в сечении форсунок, и порошка алюминия. Значения  $Z_f$ ,  $R_f$  и  $T_f$  (массовая доля конденсированной фазы, газовая постоянная и температура потока соответственно) от  $L_{\text{исп}}$  (отношения расхода испарившейся воды и порошка алюминия в сечении расположения форсунок) получены в результате выполнения расчетов в программе «АСТРА.4» [9].

Таблица 3

Термодинамические параметры потока

№ п/п	$L_{исп}$	$Z_f$	$T_f, K$	$R_f, Дж/(кг·K)$
1	0	0,08	2465	150
2	0,5	0,6	3435	460
3	1	0,65	3235	665
4	1,5	0,55	2815	580
5	2	0,5	2410	540
6	2,5	0,45	2240	520
7	3	0,4	1925	510
8	3,5	0,35	1660	500
9	4	0,3	1450	500
10	4,5	0,3	1265	495
11	5	0,3	1110	490
12	5,5	0,25	970	490

Перед оценкой максимального диаметра капли необходимо выполнить предварительную оценку скорости движения капель воды в потоке:

$$\vec{U} = \vec{v}_f - \vec{v}_\phi; |U| = \sqrt{U_x^2 + U_y^2},$$

где  $U$  – скорость обдува капли (определяется векторным вычитанием скоростей потока  $\vec{v}_f$  и капли  $\vec{v}_k$ ). Направления скоростей основного потока и скорости капель воды, истекающих из форсунки, представлены на рис. 4. Угол между векторами  $\vec{v}_f$  и  $\vec{v}_k$  обозначен  $\alpha$ . В начальный момент времени скорость капли равна скорости истечения струи из форсунки  $\vec{v}_\phi$ .

Компоненты скорости обдува капли  $U_x$  и  $U_y$  соответственно

$$U_x = v_f - v_{\phi x}; v_{\phi x} = v_\phi \cos \alpha,$$

$$U_y = v_{\phi y}; v_{\phi y} = v_\phi \sin \alpha.$$

Скорость потока определяется по формуле

$$v_f = \frac{G_f}{\rho_f^* S_k},$$

где  $G_f$  – суммарный расход компонентов смеси в сечении форсунок;  $S_k$  – площадь проходного сечения основной зоны камеры сгорания (значение  $S_k = 0,024 \text{ м}^2$  принято в соответствии с [1]);  $\rho_f^*$  – плотность потока с учетом доли к-фазы  $Z_f$ ;  $\rho_f^* = \rho_f(1 - Z_f)$ ;  $\rho_f$  – плотность газа в потоке,  $\rho_f = p_k / (R_f T_f)$ .

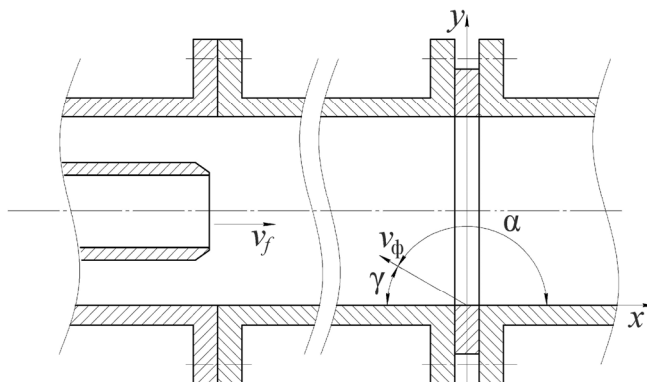


Рис. 4. Направление скоростей основного потока и струи воды из форсунки

Суммарный расход компонентов смеси в сечении форсунок определяется по формуле

$$G_f = G_{\text{Ar}} + G_{\text{O}_2} + G_{\text{Al}} + G_{\text{исп}}; G_{\text{исп}} = L_{\text{исп}} G_{\text{Al}}.$$

Скорость истечения жидкости из форсунки определяется по формуле

$$v_\phi = \phi \sqrt{\frac{2\Delta p_\phi}{\rho}},$$

где  $\Delta p_\phi$  – перепад давления на форсунке, принимаем равным 1 МПа;  $\phi$  – коэффициент скорости, принимаем равным 0,98.

Максимальное время испарения водных капель, образующихся при подаче воды в основную зону камеры сгорания, сильно зависит от их диаметра. Оценка максимального диаметра капель воды  $D_0^{\text{max}}$  производилась по методике, изложенной в работах [11, 12], на основе

сравнения числа Вебера  $We$  с его максимальным критическим значением  $We_{кр}^{max} = 14$ :

$$D_0^{max} = \frac{We_{кр}^{max} \sigma}{U^2 \rho_f^*},$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения воды,  $\sigma = 0,0725$  Н/м.

По вышеприведенной формуле проведены расчеты максимального диаметра капли распыливаемой воды, результаты которых представлены на рис. 5.

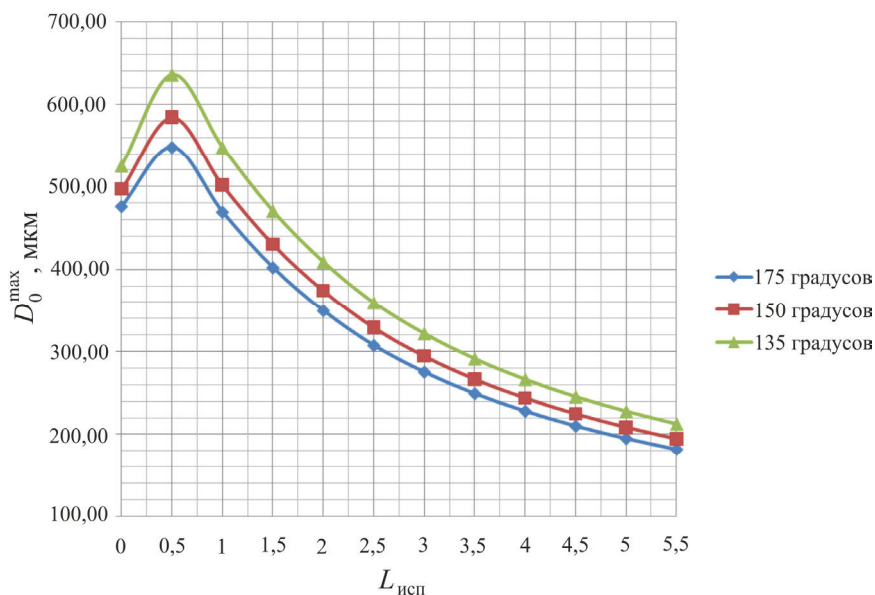


Рис. 5. Максимальный диаметр образующихся капель воды в зависимости от отношения расходов воды и алюминия ( $L$ ) при различных углах направления распыла воды из форсунки

Из представленных на рис. 5 графиков и приведенных рассуждений следует, что наиболее приемлемым углом распыливания воды по отношению к направлению высокотемпературного потока в камере сгорания является угол, равный  $150^\circ$ . Во-первых, выполнить отверстия струйных форсунок под углом  $175^\circ$  технологически трудноосуществимо и трудоемко. Во-вторых, при угле, близком к  $180^\circ$ , капли воды практически не будут попадать в ядро потока.

Для оценки принимаем, что из капель, распыленных против потока в сечении форсунок, испарилось 50 % воды. В этом случае погрешность оценки скорости обдува каплей будет минимальной. Для принятого выше значения отношения расходов дистиллированной воды и алюминия  $5,5 L_{исп}$  составит 2,75. При угле распыливания  $150^\circ$  оценочное значение максимального диаметра капли воды, приведенное на рис. 5, равно примерно 300 мкм.

Таким образом, в данной работе были проанализированы основные типы камер сгорания. Приемлемой в конструкторском и технологическом отношении была выбрана противоточная камера сгорания, обеспечивающая необходимое в технологическом процессе получения наноксида смесеобразование. Сделан вывод, что наиболее подходящим устройством подачи воды в камеру сгорания установки синтеза наноксида алюминия будет являться коллектор с отверстиями, представляющими собой струйные форсунки диаметром  $d_{\phi} = 1 \dots 1,2$  мм в количестве 10–18 штук. Разработанное диспергирующее устройство обеспечивает минимальные габариты, дальнобойность струи и имеет наименьшую сложность в изготовлении.

Технологический процесс синтеза наноксида алюминия планируется проводить при подаче в установку порошка алюминия ( $G_{Al} = 0,1$  кг/с), аргона ( $G_{Ar} = 0,05$  кг/с), кислорода ( $G_{O_2} = 0,03$  кг/с) и воды ( $G_{H_2O} = 0,55$  кг/с). Расчетное значение критического диаметра сопла при этом составляет  $\approx 59$  мм.

Используя разработанный диспергирующий узел при заданных параметрах подачи воды (расход  $G_{H_2O} = 0,55$  кг/с, угол распыливания  $150^\circ$ ), можно добиться приемлемых оценочных значений максимального диаметра капель в камере сгорания ( $D_0^{max} \approx 300$  мкм) и обеспечить необходимую скорость испарения воды, окисление продуктов первичного горения, истекающих из форкамеры, и быстрое охлаждение высокотемпературного потока.

### Библиографический список

1. Малинин В.И. Внутрикамерные процессы в установках на порошкообразных металлических горючих. – Екатеринбург; Пермь: Изд-во УрО РАН, 2006.

2. Реактор горения порошков металлов в активном газе / В.И. Малинин, Е.И. Коломин, И.С. Антипин, А.А. Обросов // Научно-технические разработки в области СВС: справочник / под общ. ред. акад. А.Г. Мержанова; Ин-т структурной макрокинетики и проблем материаловедения. – Черноголовка, 1999. – С. 184–185.

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. Малинин В.И. Получение оксида с заданными свойствами методом сжигания аэрозвеси порошка алюминия: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2003. – 16 с.

5. Русинов Г.В., Земерев Е.С. Устройство форкамеры опытно-промышленной установки синтеза наноультрадисперсного оксида алюминия // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2011: аннотации докл. XIII Всерос. науч.-техн. конф. (15–16 апреля 2011 г., г. Пермь). – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – С. 33–34.

6. Болховских Д.А., Малинин В.И., Бульбович Р.В. Исследование составов металлогазовых смесей для получения нанодисперсного оксида алюминия // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Аэрокосмическая техника. – 2012. – № 33. – С. 109–123.

7. Бербек А.М. Теоретическое обоснование создания ракетного двигателя на порошкообразном металлическом горючем и воде в качестве окислителя: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2012. – 20 с.

8. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД / под ред. В.Е. Дорошенко. – М.: Мир, 1986. – 566 с.

9. Трусов Б.Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1991. – 40 с.

10. Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей. – М.: Машиностроение, 1989. – 464 с.

11. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей / Б.В. Раушенбах, С.А. Белый, И.В. Беспалов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1964. – 526 с.

12. Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами / Л.Е. Стернин, Б.Н. Маслов, А.А. Шрайбер, А.М. Подвысоцкий. – М.: Машиностроение, 1980. – 172 с.

## References

1. Malinin V.I. *Vnutrikamernye protsessy v ustanovkakh na poroshkoobraznykh metallicheskikh goryuchikh* [Intrachamber processes in plants with the powdery metal fuels]. Uralskoe otделение Rossiyskoy akademii nauk. Ekaterinburg, Perm, 2006.

2. Malinin V.I., Kolomin E.I., Antipin I.S., Obrosova A.A. *Reaktor goreniya poroshkov metallov v aktivnom gaze* [The reactor of burning of metal powders in active gas]. *Nauchno-tehnicheskie razrabotki v oblasti SVS*. Institut strukturnoy makrokinetiki i problem materialovedeniya Rossiyskoy akademii nauk. Chernogolovka, 1999, pp. 184-185.

3. Malinin V.I., Kolomin E.I., Antipin I.S. *Vosplamnenie i gorenje aerovzvesi alyuminiya v reaktore vysokotemperaturnogo sinteza poroshkoobraznogo oksida alyuminiya* [Ignition and burning of an aero suspension of aluminum in the reactor of high-temperature synthesis of powdery oxide of aluminum]. *Fizika goreniya i vzryva*, 2002, vol. 38, no. 5, pp. 41-51.

4. Malinin V.I. *Poluchenie oksida s zadannymi svoystvami metodom szhiganiya aerovzvesi poroshka alyuminiya* [Obtaining oxide with the specified properties by method of burning of an aero suspension of aluminum powder]. Permskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2003, 16 p.

5. Rusinov G.V., Zemerev E.S. *Ustroystvo forkamery opytno-promyshlennoy ustanovki sinteza nanoultradispersnogo oksida alyuminiya* [Apparatus of prechamber of experimental-industrial plant for synthesis of nanoultradisperse aluminum oxide]. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii*. Permskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2011, pp. 33-34.

6. Bolkhovskikh D.A., Malinin V.I., Bulbovich R.V. *Issledovanie sostavov metallogazovykh smesey dlya polucheniya nanodispersnogo oksida alyuminiya* [Investigation of compounds of metalgas mixtures for obtaining of nanodisperse oxide of aluminium]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2012, no. 33, pp. 109-123.

7. Berbek A.M. *Teoreticheskoe obosnovanie sozdaniya raketnogo dvigatelya na poroshkoobraznom metallicheskom goryuchem i vode v kachestve okislitelya* [Theoretical justification of creation of the rocket engine on powdery metal fuel and water as an oxidizer]. Permskiy natsionalnyy issledovatel'skiy politekhnicheskiy universitet, 2012, 20 p.



8. Lefevr A. *Protsessy v kamerakh sgoraniya GTD* [Processes in combustion chambers of gas-turbine engines]. Moscow: Mir, 1986, 566 p.

9. Trusov B.G. *Modelirovanie khimicheskikh i fazovykh ravnesiy pri vysokikh temperaturakh* [Modeling of chemical and phase balances in high temperatures]. Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet imeni N.E. Baumana, 1991, 40 p.

10. Alemasov V.E., Dregalin A.F., Tishin A.P. *Teoriya raketnykh dvigateley* [Theory of rocket engines]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 464 p.

11. Raushenbakh B.V., Belyy S.A., Bespalov I.V. [and others]. *Fizicheskie osnovy rabocheho protsessa v kamerakh sgoraniya vozduшно-reaktivnykh dvigateley* [Physical bases of processes in combustion chambers of air-feed jet engines]. Moscow: Mashinostroenie, 1964, 526 p.

12. Sternin L.E., Maslov B.N., Shrayber A.A., Podvysotskiy A.M. *Dvukhfaznye mono- i polidispersnye techeniya gaza s chastitsami* [The two-phase mono- and polydisperse gas flows with particles]. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 172 p.

### Об авторах

**Земерев Евгений Сергеевич** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: zemerev.ewgen@yandex.ru).

**Малинин Владимир Игнатьевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: malininvi@mail.ru).

**Бульбович Роман Васильевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: dekan\_akf@pstu.ru).

**Шатров Алексей Владимирович** (Пермь, Россия) – главный инженер ООО «Лаборатория эффективных материалов» (614000, г. Пермь, ул. Пермская, д. 70, e-mail: alex.shatroff.v@gmail.com).

### About the authors

**Zemerev Evgeniy Sergeevich** (Perm, Russian Federation) – post-graduate student, Department of Rocket and Space Technology, Generating Units, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: zemerev.ewgen@yandex.ru).

**Malinin Vladimir Ignatevich** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Rocket and Space Technology, Generating Units, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: malin-invi@mail.ru).

**Bulbovich Roman Vasilevich** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Rocket and Space Technology, Generating Units, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: dekan\_akf@pstu.ru).

**Shatrov Aleksey Vladimirovich** (Perm, Russian Federation) – chief engineer, “Laboratory of Effective Materials” LLC (70, Permskaya st., Perm, 614000, Russian Federation, e-mail: alex.shatroff.v@gmail.com).

Получено 14.03.2013