

УДК 621.453

**П.И. Федоровцев, Е.С. Земерев,  
В.И. Малинин, А.В. Шатров**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

## **РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ОТБОРА ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ УСТАНОВКИ СИНТЕЗА НАНООКСИДА АЛЮМИНИЯ**

Описаны конструктивные решения, принятые для устранения основных недостатков существующего устройства отбора конденсированных продуктов сгорания установки синтеза дисперсных оксидов металлов. Основными изменениями являются введение в конструкцию устройства улавливания винтового шнека, замкнутого контура циркуляции охлаждающей воды, теплообменника и устройств подпитки и слива суспензии. Изменения конструкции связаны с увеличением продолжительности времени непрерывной работы устройства и повышением его эффективности. Разработана технологическая схема процесса улавливания дисперсных продуктов сгорания установки синтеза. Описан технологический процесс отбора. Проведен тепловой и газодинамический расчет устройства улавливания. Определены основные параметры узла диспергирования воды. Установлены тепловые и газодинамические параметры двухфазного потока в устройстве отбора. Аналитически определены расход водяного пара и скорость движения газового потока. На основании оценочных расчетов сделан вывод о целесообразности включения в конструкцию устройства отбора конденсированных продуктов сгорания винтового шнека.

**Ключевые слова:** наноксид, охлаждение, форсунка, рециркуляция, винтовой шнек, барботирование, отбор, продукты сгорания, теплообменник, расчет тепловых и газодинамических параметров.

**P.I. Fedorovtsev, E.S. Zemerev,  
V.I. Malinin, A.V. Shatrov**

Perm National Research Polytechnic University

## **DEVELOPMENT OF THE DEVICE FOR SELECTION OF DISPERSE COMBUSTION PRODUCTS OF A PLANT FOR ALUMINIUM NANOOXIDE SYNTHESIS**

In this work it is considered the description of the constructive decisions made for elimination of the main shortcomings of the existing device for selection of condensed combustion products of plant for synthesis of disperse oxides of metals. The main changes are the insertion in design of the catching device the screw auger, the closed contour for circulation of cooling water, the heat exchanger and devices of feed and draining of suspension. Changes in construction are caused by increasing the duration of device continuous operation time and device efficiency. Technological process to select the disperse products has been described. The thermal and gasdynamic calculation of the device for selection has been performed. Thermal and gasdynamic parameters of two-phase flow in the device for selection

has been defined. Mass rate and velocity of gas flow has been defined analytically. On the basis of calculations the conclusion about reasonability of inclusion the screw auger in construction of device for selection of condensed combustion products has been made.

**Keywords:** nanooxide, cooling, jet, recirculation, screw auger, barbotage, selection, combustion products, heat exchanger, calculation of thermal and gasdynamic parameters.

В ходе научно-исследовательских работ в ОКБ «Темп» при ПНИПУ по исследованию процессов горения металловоздушных смесей был разработан новый простой и эффективный метод синтеза высокодисперсных оксидов металлов. Для исследования процесса сжигания аэрозвесей металлических порошков и синтеза дисперсных оксидов была разработана экспериментальная установка [1]. Данная установка состоит из системы подачи, форкамеры (ФК), камеры сгорания (КС), устройства отбора дисперсных продуктов.

Одним из ключевых узлов установки синтеза является устройство отбора дисперсных продуктов, которое предназначено для выделения конденсированных продуктов сгорания из высокотемпературного потока, истекающего из сопла.

Из недостатков применяемого устройства, описанного в работе [1], можно выделить следующие:

- устройство не обеспечивает продолжительного цикла работы;
- испытания показали, что коэффициент улавливания (т.е. отношение массы синтезированного продукта, к массе уловленного) составляет менее 50 %, большое количество частиц оксида выносятся вместе с паром в атмосферу;
- низкий уровень экологической безопасности.

Эти недостатки призвано устранить существенно переработанное устройство отбора конденсированной фазы, описанное в данной работе. На рис. 1 представлена схема устройства, включающего в себя следующие узлы: винтовой шнек 2, узел диспергирования воды 3, охладитель 5, циркуляционный насос 6, линии подпитки чистой воды 10 и слива суспензии 12.

Основным отличием представленного устройства от описанного в монографии [1] является наличие винтового шнека внутри и поддерживаемого уровня воды.

В передней зоне устройства улавливания преобладают процессы испарения подаваемой воды за счет тепла, поступающего с продуктами сгорания. По мере движения потока продуктов сгорания внутри устройства и смешивания его с испаряющейся водой температура смеси

падает до температуры конденсации воды. Конденсация воды начинается прежде всего на частицах к-фазы, даже очень малого размера, на чем и основан механизм улавливания. При достаточной концентрации водяного пара в газовой среде и существенном времени пребывания частиц в устройстве капли вырастают до большого размера, при этом действующие на них со стороны газового потока аэродинамические силы становятся меньше сил инерции. Поскольку траектория движения потока в устройстве винтовая, капли неминуемо отбрасываются на внешнюю стенку улавливателя и под действием силы тяжести стекают в его нижнюю часть. Из заднего конуса устройства улавливания истекает охлажденный, очищенный от конденсированной фазы газ.

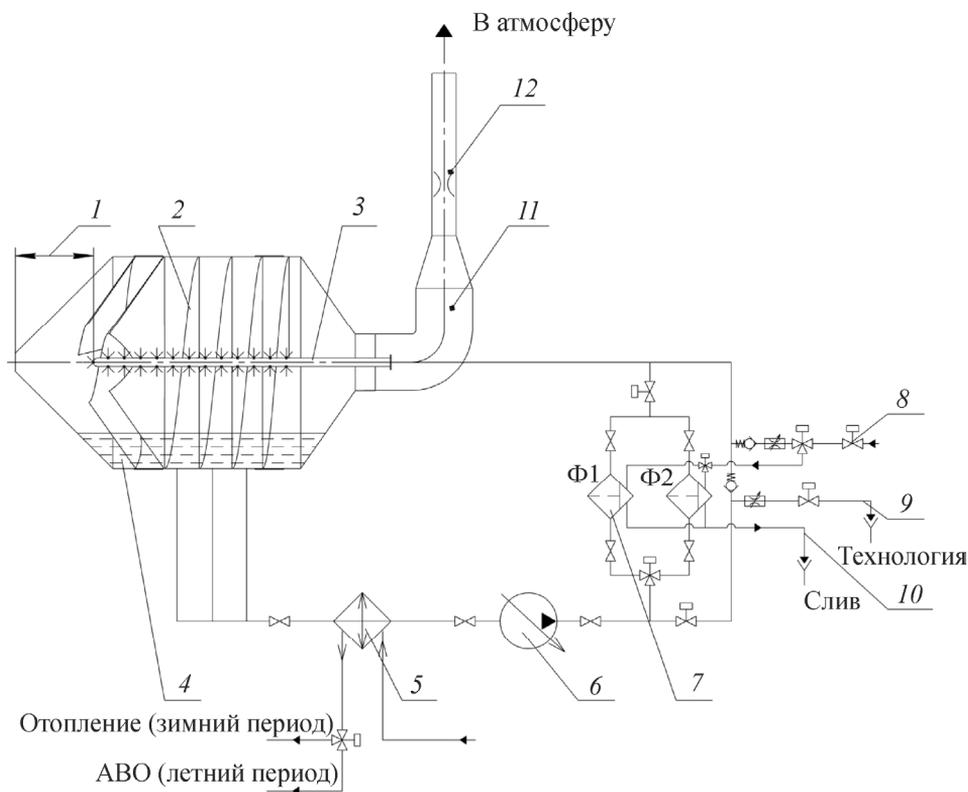


Рис. 1. Схема процесса отбора конденсированной фазы: 1 – варьируемое расстояние; 2 – винтовой шнек; 3 – узел диспергирования воды; 4 – поддерживаемый уровень воды; 5 – охладитель; 6 – циркуляционный насос; 7 – блок фильтров; 8 – линия подпитки чистой воды; 9 – линия отбора суспензии; 10 – линия слива отфильтрованных частиц; 11 – труба выхода пара от улавливателя; 12 – расходная шайба

Для эффективной работы устройства улавливания требуется, таким образом, увеличение времени пребывания в нем продуктов сгорания, истекающих из установки сжигания металлических порошков, что реализовано за счет:

– аэродинамического торможения потока газа на большом количестве водяных капель, поступающих в устройство улавливания через форсунки узла диспергирования воды 3;

– торможения потока при резком снижении его температуры при охлаждении испаряющихся водяных капель;

– движения потока по винтовой траектории благодаря введению в конструкцию винтового шнека 2.

Поток, проходя сквозь распыленную воду, тормозится, охлаждается за счет испарения воды и очищается от конденсированной фазы. Проходя через винтовой шнек 2 внутри устройства поток двухфазной смеси несколько раз проходит через воду 4, и таким образом происходит процесс интенсивного барботирования [2, 3, 4] и перемешивания двухфазного потока и воды. Частицы конденсированной фазы в результате смешивания с водой образуют суспензию.

Диспергирующий узел 3 отличается от описанного в статье [5] тем, что конструкция является цельной и представляет из себя трубу с отверстиями и струйную форсунку. Диаметры отверстий составляют порядка 1,5–2,5 мм, что создает необходимое распыливание капель воды. Узел диспергирования допускает варьирование размера 1.

Поскольку водяной пар, конденсируясь, выделяет большое количество теплоты, во избежание перегрева циркулирующей жидкости предусмотрен охладитель 5. Суспензия, проходя через данный теплообменник, отдает излишнюю теплоту вторичному контуру технологической воды, тем самым охлаждаясь до требуемой температуры. Технологическая вода, нагреваясь в теплообменнике 5, переносит тепловую энергию на отопление помещения технологической установки в зимний период, а в летний период рассеивается в аппарате воздушного охлаждения (АВО). Таким образом, теплообменник 5 выполняет две функции: охлаждает циркулирующую дистиллированную воду в контуре улавливателя и нагревает вторичный контур технической воды, тем самым отапливая помещение установки синтеза нанопорошка.

Во избежание засорения уплотнений и абразивного износа рабочего колеса насоса 6 и арматуры крупными частицами несгоревшего

алюминия в контуре улавливателя предусмотрен блок фильтров 7 с возможностью очищения фильтрующих элементов. На каждом фильтре установлено реле перепада давления. При увеличении перепада давления на фильтре Ф1 выше установленного система автоматически открывает резервную линию, и процесс циркуляции продолжается через фильтр Ф2. В то же самое время фильтр Ф1 промывается подпиточной водой через линию 8 и сливается посредством линии 10. Таким образом реализуется автоматический непрерывный цикл фильтрации дистиллированной воды от крупных твердых частиц ( $>10$  мкм) оксида алюминия и несгоревшего алюминия.

Посредством введения в устройство отбора линий слива суспензии 9 и подпитки чистой воды 8 осуществляется поддержание заданной концентрации дисперсной фазы в воде, которая не должна превышать 3 % (по объему), чтобы избежать значительного увеличения износа насоса и арматуры, а также увеличения вязкости циркулирующей суспензии.

Обеспечение замкнутого цикла работы осуществляется за счет циркуляционного насоса 6. Жидкость из устройства отбора попадает в насос, где нагнетается и снова попадает в узел диспергирования. Таким образом осуществляется процесс рециркуляции жидкости, что позволит сэкономить дистиллированную воду и значительно увеличит время работы устройства. Циркуляционный насос допускает регулирование расхода воды, что позволяет определить наиболее оптимальный перепад давления и расход дистиллированной воды.

В процессе охлаждения продуктов, поступающих из камеры сгорания установки синтеза, образуется значительное количество водяного пара. Основное его количество конденсируется в устройстве улавливания, но часть пара, не конденсируясь, выходит из улавливателя. Вместе с паром из устройства улавливания выносятся частицы целевого оксида алюминия. Для предотвращения этого процесса предусмотрена труба выхода пара 11 и расходная шайба 12, установленная в данной трубе. Пар, поднимаясь по трубе и проходя через расходную шайбу, ускоряется, охлаждается и конденсируется на стенках трубы. Данное техническое решение обеспечит увеличение коэффициента улавливания, повышение давления в устройстве улавливания до требуемого значения и вывод неконденсированного пара и водорода, образовавшегося в камере сгорания, за пределы помещения установки.

Внешний вид устройства отбора дисперсных продуктов сгорания представлен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид устройства отбора конденсированной фазы

### ***Тепловой оценочный расчет устройства улавливания***

Цель теплового расчета – определить условия и параметры, необходимые для охлаждения двухфазного потока, истекающего из камеры сгорания установки синтеза до температуры  $T^{yO}$ , при которой начинается процесс конденсации воды на поверхности дисперсных продуктов.

Внутрикамерные процессы горения в установке синтеза описаны в работе [1].

$$Q_{ст} = \Delta H_{O_2} + \Delta H_{H_2O}, \quad (1)$$

$$\Delta H_{O_2} = q_{O_2} \cdot G_{Al}^{O_2}, \quad \Delta H_{H_2O} = q_{H_2O} \cdot G_{Al}^{H_2O}, \quad (2)$$

где  $q_{O_2}$  и  $q_{H_2O}$  – теплота сгорания алюминия в среде кислорода и в парах воды соответственно,  $q_{O_2} = 31$  МДж/кг,  $q_{H_2O} = 15,4$  МДж/кг [6].

Количество алюминия, вступившее в реакцию с кислородом в форкамере, определяется по формуле

$$G_{Al}^{O_2} = \frac{G_{O_2}}{\nu_{O_2}} = 0,033 \text{ кг/с}, \quad (3)$$

где  $\nu_{O_2}$  – стехиометрическое отношение для реакции кислорода с алюминием,  $\nu_{O_2} = 0,889$ ;  $G_{Al}$  – расход порошка алюминия поданного в ФК,  $G_{Al} = 0,1$  кг/с;  $G_{O_2}$  – расход кислорода поданного в ФК,  $G_{O_2} = 0,03$  кг/с.  $G_{Al}$  и  $G_{O_2}$  приняты в соответствии с работой [7]. Полнота сгорания алюминия принята равной 1.

Количество воды  $G_{Al}^{H_2O}$ , вступившее в реакцию с алюминием в камере сгорания установки синтеза, определяется по формуле

$$G_{Al}^{H_2O} = \nu_{H_2O} (G_{Al} - G_{Al}^{O_2}) = 0,067 \text{ кг/с}, \quad (4)$$

где  $\nu_{H_2O}$  – стехиометрическое отношение для реакции воды с алюминием (равно 1).

Решая совместно уравнения (1)–(4), получаем

$$Q_{ст} = 2 \text{ МВт.}$$

Запишем уравнение теплового баланса для системы установка синтеза – улавливатель. Данная система замкнутая. Тепло, выделившееся в результате экзотермической реакции окисления алюминия, примерно равняется теплу, затраченному на нагрев воды до установившейся температуры в устройстве улавливания. При больших расходах воды, поданной в узел диспергирования в устройстве улавливания (больше 10 л/с), на первом этапе можно пренебречь теплом, забираемым парами воды, водородом, аргоном и оксидом алюминия на выходе из устройства. Их расходы незначительны по сравнению с расходом воды (примерно равны 0,01; 0,01; 0,05 и 0,2 кг/с соответственно). Практически все тепло, полученное из камеры сгорания, забирает вода. Для расчета установившейся температуры в устройстве улавливания ( $T^{yO}$ ) составляем уравнения:

$$Q_{ст} = Q_{охл}, \quad (5)$$

$$Q_{охл} = G_{H_2O(охл)}^{KC} \cdot \Delta H_{H_2O} + G_{H_2O}^{yO} \cdot \Delta H_{H_2O}, \quad (6)$$

где  $G_{H_2O(охл)}^{KC}$  – расход воды, поданной в камеру сгорания, за исключением вступившей в реакцию с алюминием,  $G_{H_2O(охл)}^{KC} = G_{H_2O}^{KC} - G_{Al}^{H_2O} =$

$= 0,483$  кг/с;  $G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{КС}}$  – общий расход воды, поданной в КС (принято в соответствии с конструктивными требованиями к камере сгорания),  $G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{КС}} = 0,55$  кг/с;  $G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{УО}}$  – расход воды, поданной в устройство улавливания (принимается равным 15 кг/с);  $\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}$  – увеличение энтальпии воды,

$$\Delta H_{\text{H}_2\text{O}} = \int_{T_0}^{T^{\text{УО}}} C_P^{\text{H}_2\text{O}} dT, \quad (7)$$

где  $C_P^{\text{H}_2\text{O}}$  – теплоемкость воды [6],  $C_P^{\text{H}_2\text{O}} = 4174$  Дж/(кг·К);  $T_0$  – температура воды, подаваемой в устройство улавливания для охлаждения двухфазового потока,  $T_0 = 298$  К.

Решая совместно уравнения (5)–(7), получаем  $T^{\text{УО}} = 330$  К.

### *Газодинамический оценочный расчет устройства улавливания*

Определим расход газа на входе в устройство улавливания. Расход будет складываться из газообразных компонентов, образующихся в форкамере и камере сгорания в результате химических реакций, и из инертного аргона, не вступившего в реакцию с алюминием:

$$G_{\Sigma}^{\text{Г}} = G_{\text{Ar}} + G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{пар}} + G_{\text{H}_2}, \quad (8)$$

где  $G_{\text{Ar}}$  – расход аргона, поданного в ФК (в соответствии с [7]),  $G_{\text{Ar}} = 0,05$  кг/с;  $G_{\text{H}_2}$  – количество водорода, образовавшегося в результате реакции окисления алюминия с парами воды;  $G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{пар}}$  – количество образовавшегося пара в устройстве улавливания (оценочно принимаем равным 0,01 кг/с).

Расход водорода

$$G_{\text{H}_2} = \frac{\mu_{\text{H}_2}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot G_{\text{Al}}^{\text{H}_2\text{O}} = 0,007 \text{ кг/с},$$

где  $\mu_{\text{H}_2}$  и  $\mu_{\text{H}_2\text{O}}$  – молярная масса водорода и воды соответственно,  $\mu_{\text{H}_2} = 0,002$  кг/моль,  $\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 0,018$  кг/моль.

Суммарный расход всех газообразных компонентов в устройстве улавливания

$$G_{\Sigma}^r = 0,067 \text{ кг/с}.$$

Плотность газовой смеси рассчитывается следующим образом:

$$\rho_{\text{см}} = \frac{p^{yO}}{R_{\text{см}} \cdot T^{yO}}, \quad (9)$$

где  $p^{yO}$  – давление в устройстве улавливания,  $p^{yO} = 0,13$  МПа принято с целью исключения возможности кавитационных явлений в рабочем колесе насоса;  $R_{\text{см}}$  – газовая постоянная смеси,  $R_{\text{см}}$  определяется по формуле

$$R_{\text{см}} = \frac{R_0}{\mu_{\text{см}}}, \quad (10)$$

где  $R_0$  – универсальная газовая постоянная,  $R_0 = 8,31$  Дж/(моль·К);  $\mu_{\text{см}}$  – молярная масса газовой смеси, которая рассчитывается по формуле

$$\mu_{\text{см}} = \frac{1}{g_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{пар}}/\mu_{\text{H}_2\text{O}} + g_{\text{H}_2}/\mu_{\text{H}_2} + g_{\text{Ar}}/\mu_{\text{Ar}}}, \quad (11)$$

где  $\mu_{\text{Ar}}$  – молярная масса аргона,  $\mu_{\text{Ar}} = 0,04$  кг/моль;  $g_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{пар}}$ ,  $g_{\text{H}_2}$ ,  $g_{\text{Ar}}$  – массовые доли пара воды, водорода и аргона в смеси соответственно.

Решая совместно уравнения (10)–(11), получим

$$\rho_{\text{см}} = 0,65 \text{ кг/м}^3.$$

Как показано в ходе экспериментов, проведенных с экспериментальной установкой, при условии образования в устройстве насыщенного водяного пара (подаче достаточного количества воды) все частицы аккумулируют на себе конденсат и образуют водяные капли, которые при разворотах газового потока сливаются вместе. При этом определяющим фактором, влияющим на коэффициент улавливания, является среднеобъемная скорость газового потока в устройстве. По данным экспериментов при скорости потока в газовом тракте не выше 10 м/с коэффициент будет равен или выше 0,9. Если же скорость превышает 10 м/с, образовавшиеся на конденсированных частицах капли воды начинают выноситься из устройства в окружающую среду. Для соблюдения условия обеспечения барботажа скорость в устройстве

должна быть 4–6 м/с [8, 9]. Оценим среднеобъемную скорость газового потока в устройстве улавливания по следующей формуле:

$$\vartheta = \frac{G_{\Sigma}^{\Gamma}}{\rho_{\text{см}} \cdot F}, \quad (12)$$

где  $F$  – минимальное проходное сечение между спиралями улавливателя,  $F = 0,134 \text{ м}^2$  (принято в соответствии с проектным чертежом), тогда

$$\vartheta = 0,8 \text{ м/с.}$$

Оценочное значение скорости газового потока подтверждает правильность выбора геометрии устройства улавливания конденсированной фазы.

### ***Определение диаметра расходной шайбы трубы выхода пара из улавливателя***

Для обеспечения заданного давления в устройстве улавливания  $p^{\text{YO}}$  рассчитаем диаметр отверстия расходной шайбы 12, устанавливаемой в трубу выхода пара из устройства улавливания:

$$S_{\text{кр}} = \frac{G_{\Sigma}^{\Gamma}}{\mu \sqrt{2 \cdot \rho_{\text{см}} \cdot \Delta p}} = 0,0006 \text{ м}^2,$$

$$D_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{\text{кр}}}{\pi}} = 0,025 \text{ м,}$$

где  $\Delta p$  – разница давления между устройством улавливания и окружающей атмосферой,  $\Delta p = 0,03 \text{ МПа}$ ;  $\mu$  – коэффициент расхода газа, зависящий от формы отверстия (принимается равным 0,6).

### ***Тепловой расчет устройства улавливания***

На втором этапе проведем более точный тепловой расчет устройства улавливания, опираясь на предыдущий оценочный. Запишем общее уравнение теплового баланса

$$\begin{aligned} Q_{\text{охл}} = & G_{\text{H}_2\text{O}(\text{охл})}^{\text{кк}} \cdot \Delta H_{\text{H}_2\text{O}} + G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{YO}} \cdot \Delta H_{\text{H}_2\text{O}} + G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{пар}} \cdot q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{пар}} + \\ & + G_{\text{H}_2} \cdot \Delta H_{\text{H}_2} + G_{\text{Ar}} \cdot \Delta H_{\text{Ar}} + G_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot \Delta H_{\text{Al}_2\text{O}_3}, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $\Delta H_{H_2}$ ,  $\Delta H_{Ar}$ ,  $\Delta H_{Al_2O_3}$  – увеличение энтальпии водорода, аргона, оксида алюминия соответственно;  $q_{H_2O}^{пар}$  – теплота парообразования воды. Значения этих параметров приняты в соответствии со справочником [6].

Количество образовавшегося пара  $G_{H_2O}^{пар}$  определяется по следующим формулам:

$$G_{H_2O}^{пар} = g_{H_2O}^{пар} \cdot G_{\Sigma}^r, \quad (14)$$

$$g_{H_2O}^{пар} = \left( \frac{p_{пар}^H}{p^{yO}} \right) \cdot \frac{\mu_{H_2O}}{\mu_{см}}, \quad (15)$$

где  $p_{пар}^H$  – давление насыщенных паров воды, которое определяется по формуле [10]

$$p_{пар}^H = f(p) \cdot e\omega(t) = 0,02 \text{ МПа},$$

где  $e\omega(t)$  – насыщенное давление чистой фазы водяного пара,

$$e\omega(t) = 6,112 \cdot e^{\frac{17,62(T^{yO} + 273)}{516,12 + T^{yO}}}, \quad (16)$$

$f(p)$  – функция от давления,

$$f(p) = 1,0016 + 3,15 \cdot 10^{-4} \cdot p^{yO} - 7,4 \cdot 10^{-4} \cdot p^{yO-1}. \quad (17)$$

Решая совместно уравнения (14)–(17), получаем

$$G_{H_2O}^{пар} = 0,013 \text{ кг/с.}$$

Для определения  $T^{yO}$  решаем уравнение (13):

$$T^{yO} = 330 \text{ К.}$$

Таким образом, установившаяся равновесная температура в устройстве улавливания  $T^{yO} = 330 \text{ К}$ , что совпадает с оценочным расчетом.

Уменьшение установившейся температуры в устройстве отбора позволит снизить количество водяного пара на выходе из устройства.

Количество тепла, необходимое для рассеивания  $Q^{\text{расс}}$  посредством теплообменника 5 (см. рис. 1), определяется по формуле

$$Q^{\text{расс}} = G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{yO}} \cdot C_{\text{P}}^{\text{H}_2\text{O}} \cdot (T^{\text{yO}} - T) = 2 \text{ МВт}, \quad (18)$$

где  $T$  – температура воды, подаваемая в устройство отбора,  $T = 298 \text{ К}$ .

### ***Определение количества струйных форсунок узла диспергирования***

Узел диспергирования 3 (см. рис. 1) разделим на две части:

1. Передняя часть форсунки, которая распыливает воду непосредственно навстречу двухфазному потоку из камеры сгорания (расход воды через переднюю часть форсунки  $G_{\text{в}}^1 = 3 \text{ кг/с}$ ).

2. Цилиндрическая часть узла диспергирования, представляющая из себя трубу с отверстиями, предназначенная для распыливания избыточного количества воды в устройство отбора ( $G_{\text{в}}^2 = 12 \text{ кг/с}$ ).

Расход воды через форсунки

$$G_{\text{ф}}^{1,2} = \mu \cdot S_0^{1,2} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p_{\text{ф}}}, \quad (19)$$

где  $\rho$  – плотность воды,  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $\Delta p_{\text{ф}}$  – перепад давления на форсунке,  $\Delta p_{\text{ф}} = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;  $S_0^1$ ,  $S_0^2$  – площадь отверстия передней части форсунки и цилиндрической части узла диспергирования соответственно;  $\mu$  – коэффициент расхода жидкости, зависящий от формы отверстия форсунки,  $\mu = 0,6 \dots 0,95$ .

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

Согласно формуле (19) рассчитываем  $G_{\text{ф}}^1$  для диаметра форсунки  $d_{\text{ф}}^1 = 2 \text{ мм}$  и перепада давления  $\Delta p_{\text{ф}} = 0,3 \text{ МПа}$ . По найденному значению расхода через форсунку определяем количество отверстий в передней части форсунки:

$$n = \frac{G_{\text{в}}^1}{G_{\text{ф}}^1} = 50.$$

По формуле (19) определяем  $G_{\text{ф}}^2$  для значения диаметра форсунки  $d_{\text{ф}}^2 = 2,5 \text{ мм}$  и перепада давления  $\Delta p_{\text{ф}}$ . По найденному значению

расхода через форсунку определяем количество отверстий в цилиндрической части узла диспергирования:

$$n = \frac{G_{\text{в}}^2}{G_{\text{ф}}^2} = 128.$$

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Проведена модернизация устройства отбора к-фазы с целью увеличения коэффициента улавливания за счет:

- введения в конструкцию винтового шнека;
- обеспечения замкнутого цикла работы и увеличения расхода подаваемой воды;
- увеличения диаметра устройства.

2. Разработана схема устройства отбора дисперсных продуктов сгорания установки синтеза наноксида алюминия, позволяющая увеличить продолжительность работы установки. Предложенная схема работы устройства отбора обеспечит непрерывную стабильную работу за счет замкнутого контура воды, введения теплообменника и линий подпитки дистиллированной воды и слива суспензии.

3. Определена равновесная температура устройства улавливания.

4. Установлены газодинамические параметры двухфазного потока устройства отбора. Аналитически определены расход водяного пара и скорость движения газового потока в устройстве улавливания.

5. Определены основные характеристики узла диспергирования воды устройства отбора конденсированной фазы.

### **Библиографический список**

1. Малинин В.И. Внутрикамерные процессы в установках на порошкообразных металлических горючих. – Екатеринбург; Пермь: Изд-во УрО РАН, 2006. – 262 с.

2. Балтренас П.Б. Обеспыливание воздуха на предприятиях стройматериалов. – М.: Стройиздат, 1990. – 181 с.

3. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. – М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.

4. Скрябин Г.М., Коузов П.А. Пылеулавливание в химической промышленности. – Л.: Химия, 1976. – 64 с.

5. Бербек А.М., Малинин В.И. Устройство выделения конденсированной фазы из потока продуктов сгорания двигательных и технологических установок на металлическом горючем // *Аэрокосмическая техника и высокие*

технологии – 2005: материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. / под ред. А.Н. Аношкина, М.А. Нихамкина и К.В. Недопекиной; Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2005. – С. 26.

6. Термодинамические свойства индивидуальных веществ / под ред. В.П. Глушко. – М.: Наука, 1981. – Т. 1, 3.

7. 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.

8. Ужов В.Н., Вальюберг А.Ю. Очистка газов мокрыми фильтрами. – М.: Химия, 1972. – 246 с.

9. Алиев Г.М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

10. Guide to meteorological instruments and methods of observation, WMO. – № 8. – 7th ed. – 2008.

## References

1. Malinin V.I. *Vnutrikamernye protsessy v ustanovkakh na poroshkoo-braznykh metallicheskih goryuchikh* [Intrachamber processes in plants with the powdery metal fuels]. Ekaterinburg, Perm: Uralskoe otделение Rossiyskoy akademii nauk, 2006. 262 p.

2. Baltrenas P.B. *Obespylivanie vozdukha na predpriyatiyakh stroymaterialov* [Dedusting of air at building material factories]. Moscow: Stroyizdat, 1990. 181 p.

3. Pirumov A.I. *Obespylivanie vozdukha* [Dedusting of air]. Moscow: Stroyizdat, 1981. 296 p.

4. Skryabin G.M., Kouzov P.A. *Pyleulavlivanie v khimicheskoy promyshlennosti* [Dust collecting in chemical industry]. Leningrad: Khimiya, 1976. 64 p.

5. Berbek A.M., Malinin V.I. *Ustroystvo vydeleniya kondensirovannoy fazy iz potoka produktov sgoraniya dvigatelnykh i tekhnologicheskikh ustanovok na metallicheskom goryuchem* [The device to extract the condensed phase from a flow of combustion products of propulsion and technological systems on metal fuel]. *Materialy VIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Aerokosmicheskaya tekhnika i vysokie tekhnologii"*. Permskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2005. p. 26.

6. *Termodinamicheskie svoystva individualnykh veshchestv* [Thermodynamic properties of individual substances]. Ed. by V.P. Glushko. Moscow: Nauka, 1981, vol 1, 3.

7. 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 politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2012, no. 33, pp. 109-123.

8. Uzhov V.N., Valyuberg A.Yu. *Ochistka gazov mokrymi filtrami* [Purification of gases by wet filters]. Moscow: Khimiya, 1972. 246 p.

9. Aliev G.M. *Tekhnika pyleulavlivaniya i ochistki promyshlennykh gazov* [Technique of a dust collecting and purification of industrial gases]. Moscow: Metallurgiya, 1986. 544 p.

10. Guide to meteorological instruments and methods of observation, WMO, no. 8, 7th ed., 2008.

### Об авторах

**Федоровцев Павел Игоревич** (Россия, Пермь) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: fedorovcev@gmail.com).

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

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

**Шатров Алексей Владимирович** (Россия, Пермь) – соискатель кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: alex.shatroff.v@gmail.com).

### About the authors

**Fedorovtsev Pavel Igorevich** (Perm, Russian Federation) – Doctoral student, Department of Rocket and Space Technology, Generating Units, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: fedorovcev@gmail.com).

**Zemerev Evgeniy Sergeevich** (Perm, Russian Federation) – Doctoral 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).

**Shatrov Aleksey Vladimirovich** (Perm, Russian Federation) – Doctoral candidate in Technical Sciences, Department of Rocket and Space Technology, Generating Units, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: alex.shatroff.v@gmail.com).

Получено 25.07.2013