

УДК 378

**С. В. Варенков**

**S. V. Varenkov**

Варенков Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент, НФИ КемГУ, г. Новокузнецк, Россия.

Varenkov Sergey Vasilievich, candidate of technical sciences, associate professor, NFI KemSU, Novokuznetsk, Rossiya.

## **НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ТУРБОДЕТАНДЕР, РАБОТАЮЩИЙ С ВЫМОРАЖИВАНИЕМ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ**

### **LOW-TEMPERATURE TURBODETANDER WORKING WITH FREEZING OF CARBON DIOXIDE IN THE FLOW PART**

***Аннотация.** Представлены результаты процесса кристаллизации одного из компонентов газовой смеси в газовом потоке на основании разработанной математической модели. Дан анализ изменения некоторых параметров газовой смеси в зависимости от различной концентрации одного из компонентов.*

***Annotation.** The results of crystallization process of one of the components of mixed gas in the gas flow, based on the developed mathematical model, are represented in the article. The analyses of changes in some parameters of mixed gas, in relation to different concentration of one of the components.*

***Ключевые слова:** кристаллизация, газовая смесь, диоксид углерода, концентрация, турбодетандер, проточная часть.*

***Keywords:** crystallization, mixed gas, Carbon dioxide, concentration, turbo-expander, flow range.*

В настоящей работе рассматривается изоэнтропический процесс расширения газовой смеси с образованием твердого диоксида углерода в проточной части низкотемпературного турбодетандера без учета теплообмена с окружающей средой.

В действительности потери энергии в проточной части турбодетандера в основном имеют место в пограничном слое, т.е. у стенок каналов, ядро же потока расширяется по зависимости близкой к изоэнтропе.

Одномерное движение газовой смеси, состоящей из воздуха и диоксида углерода, описывается уравнениями состояния, неразрывности, сохранения количества движения, сохранения энергии и уравнением кристаллизации [1].

Масса смеси, которая проходит через выбранное сечение проточной части за единицу времени, состоит из трех величин: массы попутного газа, массы способных кристаллизоваться паров и массы кристаллической фазы. Сумма этих трех масс должна быть постоянной.

В паро-газовом пространстве в момент кристаллизации образуются зародыши. В термодинамическом равновесии будут находиться только те зародыши, которые имеют критический размер. Закон роста твердых частиц представляет собой закон увеличения массы кристаллических зародышей критического размера при их движении по потоку. Допуская, что кристаллические зародыши растут изолированно, не сливаясь между собой, массовая концентрация кристаллической фазы в сечении определится из выражения

$$g_m(x) = \frac{1}{G} \int_{x_0}^x m(\xi, x) I(\xi) F(\xi) d\xi, \quad (1)$$

где  $m(x, \xi)$  - масса в сечении  $x$  частицы критического размера, возникшей в сечении  $\xi$ ;  $I(\xi)$ ;  $F(\xi)$  - число образующихся за единицу времени в единице объема зародышевых частиц и площадь поперечного сечения каналов проточной части турбодетандера в сечении  $x$ .

Закон роста кристаллических зародышей определяется числом Кнудсена  $Kn$  и описывается уравнениями

$$\frac{dr_i}{dx} = \frac{C_{Pn} - R_n}{CL} \frac{P_n}{R_n T \rho_T} \left( \frac{R_n T}{2\pi} \right)^{0.5} \frac{T_T - T}{1 - 2\gamma / (\rho_T r_i L)}, \quad Kn > 1;$$

$$\frac{dr_i}{dx} = \frac{1}{c} \frac{r'_{CO_2} \lambda_{CO_2} + (1 - r'_{CO_2}) \lambda_B}{\rho_T r_i L} (T_T - T), \quad Kn < 1;$$

где  $r_i$  - критический радиус  $i$ -го зародыша;

$L$  - теплота сублимации;

$\rho_T$  - плотность твердой фазы;

$T_T$  - температура твердой фазы;

$\gamma$  - свободная поверхностная энергия образования кристалла;

$\lambda_{CO_2}, \lambda_B$  - теплопроводность, соответственно, паров  $CO_2$  и воздуха;

$r'_{CO_2}$  - начальная объемная концентрация  $CO_2$  в смеси.

Система вышеупомянутых уравнений при известном законе распределения площади поперечного сечения  $F(x)$  является системой обыкновенных дифференциальных уравнений и решается численными методами.

Исходными данными для решения уравнений являются: начальное давление смеси  $P_n$ , начальная температура потока  $T_n$ , начальный массовый расход рабочего тела  $G$ , начальная объемная концентрация  $CO_2$  в смеси  $\tau'_{CO_2}$ , угловая скорость вращения ротора турбодетандера  $\omega$ , шаг интегрирования, величина интервала интегрирования и закон распределения площадей поперечных сечений каналов.

Целью расчета являлось определение характера изменения давления, температуры, плотности и скорости движения газовой смеси в проточной части турбодетандера, а также количества выпадающей твердой фазы диоксида углерода.

Расчеты производились для экспериментального турбодетандера при его работе на смеси воздуха с диоксидом углерода. Начальная объемная концентрация двуокиси углерода в смеси принималась такой же, как при опытах – 8, 12, 16, 20 %. Начальные значения давления, температуры, массового расхода газовой смеси и числа оборотов ротора турбодетандера выбирались такими же, как при экспериментах.

При расчетах потери от трения и теплопритоков из окружающей среды не учитывались. Учет этих факторов, по-видимому, привел бы к увеличению количества твердой фазы, выпадающей в турбодетандере. В связи с этим рассматриваемые условия можно считать наиболее неблагоприятными.

Рассмотрим, как происходит изменение параметров потока вдоль проточной части турбодетандера согласно численным расчетам.

Качественно картина изменения давления подобна той, которая была получена на основании измерений при снятии экспериментальных характеристик турбодетандера при работе на воздухе. Наибольшее падение давления происходит в средней части соплового аппарата. В дальнейшем, в рабочем колесе, падение давления происходит практически по линейному закону. Минимум давления соответствует наименьшей площади поперечного сечения каналов рабочего колеса. Процесс кристаллизации практически не оказывает влияния на характер изменения давления. Картина изменения плотности смеси аналогична картине изменения давления. Процесс кристаллизации также не оказывает заметного влияния на характер изменения абсолютной скорости потока. Это объясняется тем, что объем газовой смеси практически не изменяется, так как объемная концентрация твердой фазы очень мала.

Более интересным для нас представляется изменение температуры потока  $T$  вдоль проточной части в зависимости от пути потока  $x$  [2]. При входе потока в сопловой аппарат (СА) его температура на несколько градусов выше температуры насыщения диоксида углерода в газовой смеси. В дальнейшем температура смеси понижается за счет расширения потока и в начале рабочего колеса (РК) достигает температуры насыщения диоксида углерода в смеси, т.е. поток входит в двухфазную область. Однако, для образования устойчивых кристаллических зародышей, необходимо достичь определенного переохлаждения потока. При достижении потоком такого переохлаждения происходит резкое возрастание температуры потока в результате подогрева смеси, за счет тепла отдаваемого твердыми частицами, т.е. наблюдается «скачок кристаллизации» аналогичный «скачку конденсации» для жидкостей. Далее темп возрастания температуры падает и процесс кристаллизации приближается к равновесному.

Процесс образования кристаллических зародышей происходит ближе к выходу потока из межлопаточных каналов рабочего колеса. При больших значениях  $гСО_2$  процесс ядрообразования начинается раньше и диапазон изменения несколько меньше. Наибольшие значения скорости ядрообразования  $I$  соответствуют максимальному переохлаждению потока [3], в этот момент образуются кристаллические зародыши критического размера, способные к дальнейшему росту.

Согласно расчетным данным количество выпадающей твердой фазы невелико по отношению к начальной массовой концентрации диоксида углерода в газовой смеси и составляет 10...15 %.

### **Список литературы**

1. Варенков, С. В. Процесс образования твердой фазы диоксида углерода из газовой смеси в турбомашине [Текст] / С. В. Варенков // Технологическое и профессиональное образование в России и за рубежом как фактор устойчивого развития общества: Международный сборник научных трудов. Секция «Управление технолого-экономическими процессами». – Новокузнецк: изд-во КузГПА, 2009. – Том 5. – С. 90-93.
2. Варенков, С. В. Результаты численного расчета изменения термодинамических параметров в процессе кристаллизации диоксида углерода в проточной части турбодетандера [Текст] / С. В. Варенков // Технологическое и профессиональное образование в России и за рубежом как фактор устойчивого развития общества: Материалы 4 Международной научно-практической конференции. – Новокузнецк: изд-во КузГПА, 2011. – Ч. 1. – С. 43-45.
3. Варенков, С. В. Процессы ядрообразования и роста кристаллических частиц в потоке газовой смеси в проточной части низкотемпературного турбодетандера [Текст] / С. В. Варенков // Технологическое образование и устойчивое развитие региона: сборник статей Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: изд-во НГПУ, 2014. – С. 128-132.