

УДК 621.594

Адаптация закономерностей процесса коагуляции к математической модели образования кристаллов диоксида углерода

Канд. техн. наук М. М. ДАНИЛОВ¹, О. С. АПИЦЫНА²

¹dmm@trumgame.ru, ²apitsyna.olga@yandex.ru

Университет ИТМО

При расширении в низкотемпературных турбодетандерах газового потока, содержащего пары диоксида углерода, происходит процесс кристаллообразования, т.е. часть паров переходит в твердое состояние. В определенных сечениях проточной части детандера образуются кристаллы-зародыши, которые растут по мере движения в проточной части. Поэтому в каждом из определенных сечений проточной части могут находиться кристаллы диоксида углерода различного размера. В результате их взаимодействия может произойти коагуляция, выражающаяся как прилипание более мелких кристаллов к более крупным. Исследуется влияние процесса коагуляции на изменение количества более мелких кристаллов и на рост более крупных. Это позволит, при необходимости, внести коррективы в математическую модель процесса кристаллообразования. Разработан математический аппарат для расчета процесса коагуляции кристаллов диоксида углерода. Приведены практические результаты исследования, которые указывают на незначительное количество кристаллов, способных к коагуляции при рассмотренных условиях.

Ключевые слова: кристаллы диоксида углерода, коагуляция, сечения проточной части, количество кристаллов, параметр кристалла, группы кристаллов, расширение газовой смеси.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 03.03.2020, принята к печати 28.04.2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-2-73-78

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Данилов М. М., Апицына О. С. Адаптация закономерностей процесса коагуляции к математической модели образования кристаллов диоксида углерода // Вестник Международной академии холода. 2020. № 2. С. 73–78.

Adapting the laws of coagulation process to mathematical model of carbon dioxide formation

Ph. D. M. M. DANILOV¹, O. S. APITSYNA²

¹dmm@trumgame.ru, ²apitsyna.olga@yandex.ru

ITMO University

When a gas stream containing vapors of carbon dioxide expands in low-temperature turbo expanders a crystal formation process occurs, i.e. part of the vapor goes into a solid state. Crystals nucleate in certain sections of the flow part of the expanders and grow as they move in the flow. Therefore, crystals of carbon dioxide of various sizes can be found in each of those sections. As a result of their interaction, coagulation can occur, expressed as the adhesion of smaller crystals to larger ones. The influence of the coagulation process on the change in the number of smaller crystals and on the growth of larger ones is considered. This will allow, if necessary, to make adjustments to the mathematical model of the crystal formation process. A mathematical apparatus has been developed to calculate the coagulation process of carbon dioxide crystals. Practical research results are given indicating a small number of crystals capable of coagulation under the considered conditions.

Keywords: carbon dioxide crystals, coagulation, sections of the flow part, number of crystals, crystal parameter, groups of crystals, expansion of the gas mixture.

Article info:

Received 03/03/2020, accepted 28/04/2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-2-73-78

Article in Russian

For citation:

Danilov M. M., Apitsyna O. S. Adapting the laws of coagulation process to mathematical model of carbon dioxide formation. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2020. No 2. p. 73–78.

Введение

Математическая модель процесса образования кристаллов диоксида углерода, в объеме расширяющегося газового потока [1], позволяет определить, в том числе, численную концентрацию образующихся кристаллов-зародышей диоксида углерода и их размер, а также размер кристаллов, растущих по мере продвижения потока вдоль проточной части расширительного устройства [2, 3]. Хотя эта модель разработана для оценки количественного и дисперсного состава кристаллического диоксида углерода, она не учитывает коагуляцию, т.е. прилипание одних кристаллов к другим в результате их соударения между собой [4]–[8]. В вышеперечисленных работах показано, что при наличии в потоке частиц различных размеров, вследствие различия их скоростей, происходят соударения и слияния этих частиц. Приведены два метода расчета коагуляции: метод Эйлера (коагуляция заданных фракций) и метод Лагранжа (коагуляция отдельных частиц).

Для поставленной задачи применим метод Эйлера. Кристаллы диоксида углерода, образующиеся и растущие в расширяющемся потоке, имеют размер менее 1 мкм [9], поэтому их можно отнести к классу высокодисперсных аэрозолей [10, 11]. Для таких аэрозолей свойственна коагуляция, обусловленная броуновским движением частиц, т.е. тепловая коагуляция. Расчет коагуляции методом Эйлера предполагает одномерное движение всех частиц, которые при их соударении обязательно слипаются [12, 13]. На основе этого метода следует решить задачу создания математического аппарата для описания процесса коагуляции кристаллов диоксида углерода и проверить практическое влияние коагуляции на численную концентрацию кристаллов и увеличение их размеров, что и является целью данного исследования.

Коагуляция кристаллов диоксида углерода.

В каждом из последующих сечений проточной части расширительного устройства (детандера) могут находиться несколько групп кристаллов диоксида углерода, имеющих различный размер. Это и кристаллы-зародыши, образовавшиеся в данном сечении, и кристаллы, образовавшиеся в предыдущем сечении и выросшие в данном сечении, и кристаллы, образовавшиеся и выросшие в предыдущих сечениях. Так как равновесной формой кристалла диоксида углерода является куб, принимается допущение, что растущие как за счет увеличения степени переохлаждения потока, так и за счет коагуляции кристаллы будут иметь кубическую форму.

Если рассматривать кристалл, который движется относительно неподвижных других кристаллов такого же размера, то его соприкосновение с неподвижными кристаллами произойдет, когда расстояние между центрами этих кристаллов будет равным a (a — размер грани кубического кристалла). Центр движущегося кристалла, каждая боковая грань которого (относительно направления движения) соприкоснулись с неподвижными кристаллами, будет находиться в центре параллелепипеда с площадью основания $4a^2$ (площадь квадрата со стороной $2a$). Объем такого параллелепипеда в единицу времени можно выразить как

$$V = 4a^2 \cdot \bar{c}_k,$$

где $\bar{c}_k = \sqrt{3kT/m_k}$ — среднее значение относительной скорости броуновского движения кристаллов в движущемся потоке [14];

k — постоянная Больцмана;

T — температура потока;

m_k — масса кристалла.

Количество соприкосновений

$$Z = V \cdot N,$$

где N — количество кристаллов в единице объема.

Учитывая, что все кристаллы в потоке движутся со средней скоростью \bar{c}_k , следует использовать среднюю скорость движения относительно других кристаллов

$$\bar{c}_{\text{отн}} = \bar{c}_k \sqrt{2}.$$

С целью сокращения записи закономерностей процесса коагуляции, введем константу коагуляции

$$K = 4a^2 \cdot \bar{c}_k \sqrt{2}.$$

В каждом соприкосновении участвуют два кристалла. Чтобы не учитывать одно соприкосновение два раза, действительную константу коагуляции необходимо уменьшить вдвое

$$K_d = \frac{K}{2} = 2a^2 \cdot \bar{c}_k \sqrt{2}.$$

Тогда, количество соприкосновений в единицу времени

$$Z_d = 2a^2 \cdot \bar{c}_k \sqrt{2} \cdot N = K_d N.$$

Если умножить количество кристаллов в единице объема на число соприкосновений в единицу времени, то получим количество кристаллов, которое уменьшилось в результате процесса коагуляции в единицу объема за единицу времени

$$\frac{dN}{d\tau} = -N \cdot Z_d = -K_d \cdot N^2.$$

Перейдем к реальной картине кристаллообразования диоксида углерода в проточной части детандера, когда в одном и том же сечении находится несколько групп кристаллов различной величины (с различным размером грани a). В этом случае рост более крупных кристаллов может произойти за счет коагуляции с ними более мелких, количество которых при этом будет сокращаться (вплоть до исчезновения целых групп кристаллов).

Обозначим размер мелких и крупных кристаллов $a_{\text{мел}}$ и $a_{\text{кр}}$, соответственно. Движущийся мелкий кристалл соприкоснется с неподвижными (как допущение) крупными кристаллами в пределах параллелепипеда с объемом в единицу времени

$$V = (a_{\text{мел}} + a_{\text{кр}})^2 \bar{c}_{\text{к.мел}}.$$

Учитывая скорость крупных кристаллов, можно вычислить среднюю скорость броуновского движения кристаллов различных размеров

$$\bar{c}_{\text{кр.ср}} = (\bar{c}_{\text{к.мел}} + \bar{c}_{\text{к.кр}}) / 2.$$

Действительную константу коагуляции можно представить как

$$K_d = (a_{\text{мел}} + a_{\text{кр}})^2 \frac{\bar{c}_{\text{кр}}}{2}.$$

Количество соприкосновений мелких кристаллов с крупными (число мелких кристаллов, центры которых лежат внутри параллелепипеда) в единицу времени

$$Z_d = K_d \cdot N_{\text{мел}}.$$

Умножая количество крупных кристаллов в единице объема на число столкновений с ними мелких кристаллов в единицу времени, получим число мелких кристаллов, которые исчезнут в процессе коагуляции с крупными кристаллами в единице объема за единицу времени

$$\frac{dN_{\text{мел}}}{d\tau} = -N_{\text{кр}} \cdot Z_d = -K_d \cdot N_{\text{мел}} \cdot N_{\text{кр}}. \quad (1)$$

Условия для осуществления процесса коагуляции кристаллов диоксида углерода

Результатом коагуляции можно считать два последствия: сокращение количества мелких кристаллов (или полное их исчезновение) и рост за счет этого крупных кристаллов.

Если говорить о мелких кристаллах, то значимой можно считать такую коагуляцию, когда число исчезающих мелких кристаллов $dN_{\text{мел}}$ сопоставимо с их количеством $N_{\text{мел}}$. Когда число $dN_{\text{мел}}$ на несколько порядков меньше числа $N_{\text{мел}}$, то существенного сокращения этой группы мелких кристаллов не произойдет.

Стоит отметить, что в проточной части детандера образуются кристаллы-зародыши с размером грани куба a равными $3a_m$ и $2a_m$ (a_m — параметр молекулярного кристалла диоксида углерода) [9]. Количество кристаллов в единице объема, образующихся в различных сечениях проточной части, колеблется от $1 \cdot 10^4$ (кристаллы с параметром $a=3a_m$) до $1 \cdot 10^{18}$ (кристаллы с параметром $a=2a_m$). Эта группа образующихся кристаллов по своим размерам всегда будет меньше, чем группы уже выросших кристаллов, появившихся ранее, поэтому количество таких кристаллов в единице объема можно обозначить как $N_{\text{мел}}$.

Теперь проследим рост более крупных кристаллов за счет присоединения к ним мелких кристаллов. Будем рассматривать рост кубического кристалла с параметром a . Принимается предположение, что выросший в результате коагуляции кристалл будет также иметь кубическую форму (равновесную с газовой фазой). Тогда кристалл с параметром $2a$ будет состоять из 8-ми кристаллов с параметром a (к кристаллу с параметром a должно присоединиться еще 7 таких же кристаллов), кристалл с параметром $3a$ — из 27-ми кристаллов, и т. д. Если обозначить параметр выросшего кристалла na , где n — положительное целое число больше единицы, то количество кристаллов с параметром a , которое должно к нему присоединиться, можно выразить как (n^3-1) — коагуляция кристаллов одного размера.

В действительности размер присоединяемых кристаллов будет меньше, чем a . Если параметр мелких кристаллов будет в f раз меньше, чем a , т.е. a/f , то для увеличения кристалла с параметром a до размера na потребу-

ется присоединение к нему мелких кристаллов в количестве $(n^3-1)f^3$.

Например, количество кристаллов с параметром $a/2$, которое необходимо присоединить к кристаллу с параметром a с целью его увеличения до параметра $2a$, будет составлять величину $(2^3-1)2^3=56$.

Учитывая количество крупных кристаллов $N_{\text{кр}}$ можно вычислить количество необходимых для их роста мелких кристаллов

$$dN_{\text{мел}} = (n^3 - 1)f^3 N_{\text{кр}}. \quad (2)$$

Если величина $dN_{\text{мел}}$, определяемая по уравнению (2) окажется больше, чем величина $dN_{\text{мел}}$, выраженная из уравнения (1), то рост крупных кристаллов в результате коагуляции не произойдет.

Результаты расчета процесса коагуляции для кристаллов диоксида углерода

В качестве примера выбраны кристаллы диоксида углерода, образующиеся и растущие в процессе расширения газовой смеси, содержащей 10% CO_2 , в центро-стремительном турбодетандере с давления 200 кПа до давления 110 кПа [9]. Величины основных параметров процесса кристаллообразования, необходимые для расчета коагуляции, приведены в табл. 1 (см. стр. 76). К этой таблице следует привести несколько пояснений:

- в сечении 6 проточной части турбодетандера впервые появляется значимое число кристаллов-зародышей;
- после сечения 11 процесс образования и роста кристаллов завершается;
- подстрочная надпись «мел» относится к кристаллам-зародышам, образовавшимся в рассмотренных сечениях;
- подстрочная надпись «кр1» относится к кристаллам, образовавшимся в предыдущих сечениях и выросших в рассматриваемых сечениях;
- подстрочная надпись «кр2» относится к кристаллам, образовавшимся за два сечения до рассматриваемого;
- подстрочные надписи «кр3», «кр4», «кр5» относятся к кристаллам, образовавшимся за три, за четыре и за пять сечений до рассматриваемого, соответственно.

До наибольшего размера вырастут первые образовавшиеся кристаллы диоксида углерода (в сечении 6), когда достигнут последнего сечения 11. Такие же выводы справедливы и для массы кристалла. Относительная скорость броуновского движения кристалла будет в значительной степени обратно пропорциональна его массе. В восьмом сечении начинают образовываться чуть более мелкие кристаллы, однако их количество возрастает многократно (на 12 порядков).

В табл. 2 (см. стр. 77) приведены расчетные показатели количества более мелких кристаллов, которые должны исчезнуть в результате коагуляции с более крупными кристаллами, причем кристаллы, обозначенные как «кр1» будут более мелкими относительно кристаллов «кр2», кристаллы «кр2» будут более мелкими относительно кристаллов «кр3», и т. д. Эти показатели должны быть сопоставлены с количеством самих более мелких кристаллов, представленных в табл. 1.

Например, в сечении 7 при коагуляции с кристаллами «кр1» в единице объема должно исчезнуть $5,12 \cdot 10^{-10}$

Таблица 1

Расчетные параметры кристаллов диоксида углерода в различных сечениях проточной части

Table 1

The calculated parameters of carbon dioxide crystals in various sections of the flow part

№ п/п	Параметры, размерность	Сечения					
		6	7	8	9	10	11
1	$a_{\text{мел}} \cdot 10^9, \text{ м}$	1,701	1,700	1,132	1,131	1,131	1,131
2	$a_{\text{кр1}} \cdot 10^9, \text{ м}$	—	6,848	7,262	5,821	6,084	6,210
3	$a_{\text{кр2}} \cdot 10^9, \text{ м}$	—	—	18,620	20,360	18,282	19,233
4	$a_{\text{кр3}} \cdot 10^9, \text{ м}$	—	—	—	38,971	43,230	40,894
5	$a_{\text{кр4}} \cdot 10^9, \text{ м}$	—	—	—	—	68,702	75,411
6	$a_{\text{кр5}} \cdot 10^9, \text{ м}$	—	—	—	—	—	106,404
7	$N_{\text{мел}}, 1/\text{м}^3$	$2,33 \cdot 10^5$	$0,44 \cdot 10^5$	$4,55 \cdot 10^{17}$	$1,99 \cdot 10^{17}$	$0,79 \cdot 10^{17}$	$0,73 \cdot 10^{17}$
8	$N_{\text{кр1}}, 1/\text{м}^3$	—	$2,33 \cdot 10^5$	$0,44 \cdot 10^5$	$4,55 \cdot 10^{17}$	$1,99 \cdot 10^{17}$	$0,79 \cdot 10^{17}$
9	$N_{\text{кр2}}, 1/\text{м}^3$	—	—	$2,33 \cdot 10^5$	$0,44 \cdot 10^5$	$4,55 \cdot 10^{17}$	$1,99 \cdot 10^{17}$
10	$N_{\text{кр3}}, 1/\text{м}^3$	—	—	—	$2,33 \cdot 10^5$	$0,44 \cdot 10^5$	$4,55 \cdot 10^{17}$
11	$N_{\text{кр4}}, 1/\text{м}^3$	—	—	—	—	$2,33 \cdot 10^5$	$0,44 \cdot 10^5$
12	$N_{\text{кр5}}, 1/\text{м}^3$	—	—	—	—	—	$2,33 \cdot 10^5$
13	$m_{\text{мел}} \cdot 10^{24}, \text{ кг}$	7,891	7,887	2,278	2,334	2,332	2,332
14	$m_{\text{кр1}} \cdot 10^{22}, \text{ кг}$	—	5,160	6,164	3,179	3,627	3,866
15	$m_{\text{кр2}} \cdot 10^{20}, \text{ кг}$	—	—	1,038	1,360	0,986	1,148
16	$m_{\text{кр3}} \cdot 10^{19}, \text{ кг}$	—	—	—	0,954	1,303	1,104
17	$m_{\text{кр4}} \cdot 10^{19}, \text{ кг}$	—	—	—	—	5,232	6,922
18	$m_{\text{кр5}} \cdot 10^{18}, \text{ кг}$	—	—	—	—	—	1,944
19	$\bar{c}_{\text{к, мел}}, \text{ м/с}$	29,523	29,297	53,383	52,977	52,607	52,535
20	$\bar{c}_{\text{к, кр1}}, \text{ м/с}$	—	3,622	3,286	4,540	4,218	4,081
21	$\bar{c}_{\text{к, кр2}}, \text{ м/с}$	—	—	0,800	0,694	0,809	0,749
22	$\bar{c}_{\text{к, кр3}}, \text{ м/с}$	—	—	—	0,262	0,223	0,242
23	$\bar{c}_{\text{к, кр4}}, \text{ м/с}$	—	—	—	—	0,111	0,096
24	$\bar{c}_{\text{к, кр5}}, \text{ м/с}$	—	—	—	—	—	0,058

кристаллов «мел», в то время как в этом сечении в единице объема находится $0,44 \cdot 10^5$ таких кристаллов, т.е. на 14 порядков больше. Поэтому в этом сечении существенного сокращения более мелких кристаллов в результате коагуляции не произойдет. В том же сечении 7 количество кристаллов «мел», которое должно присоединиться к кристаллам «кр1» для увеличения их параметра a в два раза, определяется по уравнению (2) и составляет в единице объема $1,066 \cdot 10^8$, что больше числа самих этих кристаллов (более чем на три порядка), и тем более больше, чем количество мелких кристаллов, которое может сократиться в результате коагуляции (более, чем на 17 порядков).

Заключение

По результатам расчета процесса коагуляции кристаллов диоксида углерода, образующихся при расширении газовой смеси с начальными параметрами: давлением 200 кПа и концентрацией диоксида углерода 10%, можно сделать следующие выводы.

1. Наиболее значимо возможное сокращение более мелких кристаллов произойдет в сечении 10 при взаимодействии групп кристаллов «мел — кр2», где из всего количества (в единице объема) кристаллов «мел», равно-го $7,9 \cdot 10^{16}$, могут исчезнуть $1,85 \cdot 10^{16}$, то есть 23%.

Но для увеличения хотя бы в 2 раза размера a кристаллов «кр2» потребуется число кристаллов «мел» (в единице объема), равное $1,35 \cdot 10^{22}$, что почти на 6 порядков больше их количества в этом сечении. Поэтому даже это взаимодействие групп кристаллов не приведет к росту более крупных кристаллов. Можно предположить, что то количество кристаллов «мел», которое способно к коагуляции с кристаллами «кр2», но которого не хватает для увеличения размера кристаллов «кр2», будет участвовать в формировании кристаллов «кр1» в следующем сечении (наряду с другими кристаллами «мел» в рассматриваемом сечении).

2. Во всех обозначенных сечениях проточной части взаимодействие всех групп кристаллов не приведет к росту более крупных кристаллов за счет присоединения к ним более мелких кристаллов, а количество способных к коагуляции мелких кристаллов незначительно.

Дальнейшие исследования будут посвящены расчетам процесса коагуляции кристаллов диоксида углерода, образующихся при расширении газовых смесей с иными начальными параметрами и в других расширительных машинах, что позволит оценить влияние коагуляции в условиях иных скоростей образования и роста кристаллов.

Таблица 2

Параметры взаимодействия групп кристаллов диоксида углерода

Table 2

The interaction parameters for the groups of carbon dioxide crystals

№ п/п	Группы кристаллов	Параметры, размерность	Сечения				
			7	8	9	10	11
1	мел — кр1	$\Delta N_{\text{мел}}/\Delta \tau, 1/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$	$6,20 \cdot 10^{-6}$	$2,01 \cdot 10^7$	$6,28 \cdot 10^{19}$	$1,16 \cdot 10^{19}$	$4,40 \cdot 10^{18}$
		$\Delta N_{\text{мел}}, 1/\text{м}^3$	$5,12 \cdot 10^{-10}$	$1,76 \cdot 10^3$	$5,92 \cdot 10^{15}$	$1,18 \cdot 10^{15}$	$5,05 \cdot 10^{14}$
2	мел — кр2	$\Delta N_{\text{мел}}/\Delta \tau, 1/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$	—	$5,58 \cdot 10^8$	$5,46 \cdot 10^7$	$1,81 \cdot 10^{20}$	$3,18 \cdot 10^{19}$
		$\Delta N_{\text{мел}}, 1/\text{м}^3$	—	$4,91 \cdot 10^4$	$5,15 \cdot 10^3$	$1,85 \cdot 10^{16}$	$3,66 \cdot 10^{15}$
3	мел — кр3	$\Delta N_{\text{мел}}/\Delta \tau, 1/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$	—	—	$9,90 \cdot 10^8$	$9,10 \cdot 10^7$	$7,73 \cdot 10^{20}$
		$\Delta N_{\text{мел}}, 1/\text{м}^3$	—	—	$9,34 \cdot 10^4$	$9,28 \cdot 10^3$	$8,88 \cdot 10^{16}$
4	мел — кр4	$\Delta N_{\text{мел}}/\Delta \tau, 1/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$	—	—	—	$1,18 \cdot 10^9$	$2,49 \cdot 10^8$
		$\Delta N_{\text{мел}}, 1/\text{м}^3$	—	—	—	$1,21 \cdot 10^5$	$2,86 \cdot 10^4$
5	мел — кр5	$\Delta N_{\text{мел}}/\Delta \tau, 1/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$	—	—	—	—	$2,58 \cdot 10^9$
		$\Delta N_{\text{мел}}, 1/\text{м}^3$	—	—	—	—	$2,97 \cdot 10^5$
6	кр1 — кр2	$\Delta N_{\text{кр1}}/\Delta \tau, 1/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$	—	$7,06 \cdot 10^{-6}$	$1,81 \cdot 10^7$	$6,74 \cdot 10^{19}$	$1,23 \cdot 10^{19}$
		$\Delta N_{\text{кр1}}, 1/\text{м}^3$	—	$6,19 \cdot 10^{-10}$	$1,70 \cdot 10^3$	$6,88 \cdot 10^{15}$	$1,41 \cdot 10^{15}$
7	кр1 — кр3	$\Delta N_{\text{кр1}}/\Delta \tau, 1/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$	—	—	$2,55 \cdot 10^8$	$2,38 \cdot 10^7$	$8,62 \cdot 10^{19}$
		$\Delta N_{\text{кр1}}, 1/\text{м}^3$	—	—	$2,40 \cdot 10^4$	$2,42 \cdot 10^3$	$9,90 \cdot 10^{15}$
8	кр1 — кр4	$\Delta N_{\text{кр1}}/\Delta \tau, 1/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$	—	—	—	$2,80 \cdot 10^8$	$2,44 \cdot 10^7$
		$\Delta N_{\text{кр1}}, 1/\text{м}^3$	—	—	—	$2,86 \cdot 10^4$	$2,80 \cdot 10^3$
9	кр1 — кр5	$\Delta N_{\text{кр1}}/\Delta \tau, 1/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$	—	—	—	—	$2,41 \cdot 10^8$
		$\Delta N_{\text{кр1}}, 1/\text{м}^3$	—	—	—	—	$2,77 \cdot 10^4$
10	кр2 — кр3	$\Delta N_{\text{кр2}}/\Delta \tau, 1/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$	—	—	$8,67 \cdot 10^{-6}$	$1,97 \cdot 10^7$	$8,09 \cdot 10^{19}$
		$\Delta N_{\text{кр2}}, 1/\text{м}^3$	—	—	$8,18 \cdot 10^{-10}$	$2,00 \cdot 10^3$	$9,30 \cdot 10^{15}$
11	кр2 — кр4	$\Delta N_{\text{кр2}}/\Delta \tau, 1/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$	—	—	—	$1,84 \cdot 10^8$	$1,67 \cdot 10^7$
		$\Delta N_{\text{кр2}}, 1/\text{м}^3$	—	—	—	$1,88 \cdot 10^4$	$1,91 \cdot 10^3$
12	кр2 — кр5	$\Delta N_{\text{кр2}}/\Delta \tau, 1/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$	—	—	—	—	$1,47 \cdot 10^8$
		$\Delta N_{\text{кр2}}, 1/\text{м}^3$	—	—	—	—	$1,69 \cdot 10^4$
13	кр3 — кр4	$\Delta N_{\text{кр3}}/\Delta \tau, 1/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$	—	—	—	$1,08 \cdot 10^{-5}$	$2,30 \cdot 10^7$
		$\Delta N_{\text{кр3}}, 1/\text{м}^3$	—	—	—	$1,10 \cdot 10^{-9}$	$2,64 \cdot 10^3$
14	кр3 — кр5	$\Delta N_{\text{кр3}}/\Delta \tau, 1/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$	—	—	—	—	$1,72 \cdot 10^8$
		$\Delta N_{\text{кр3}}, 1/\text{м}^3$	—	—	—	—	$1,97 \cdot 10^4$
15	кр4 — кр5	$\Delta N_{\text{кр4}}/\Delta \tau, 1/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$	—	—	—	—	$1,31 \cdot 10^{-5}$
		$\Delta N_{\text{кр4}}, 1/\text{м}^3$	—	—	—	—	$1,51 \cdot 10^{-9}$

Литература

References

1. Данилов М. М. Моделирование процесса вымораживания диоксида углерода в объеме расширяющегося газового потока // Известия СПбГУНИПТ. 2007. № 1. С. 6–8.
2. Данилов М. М., Смирнов А. С. Основные особенности образования твердой фазы диоксида // Вестник Международной академии холода. 2014. № 2. С. 37–40.
3. Данилов М. М. Рост кристаллов диоксида углерода в объеме расширяющегося газового потока // Известия СПбГУНИПТ. 2006. № 1. С. 18–20.
4. Гришин С. Д., Тишин А. П., Хайрутдинов Р. И. Неравновесное двухфазное течение в сопле Лавала с коагуляцией частиц полидисперсного конденсата // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1969. № 2. С. 112–117.
5. Соловьев А. Д. Слияние капель жидкости при соударениях // Труды ЦАО. 1969. Вып. 89. С. 3–25.
6. Тишин А. П., Хайрутдинов Р. И. К расчету коагуляции частиц конденсата в соплах Лавала // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1971. № 5. С. 181–185.
7. Marble F. E. Droplet Agglomeration in Rocket Nozzles Caused by Particle Slip and Collision // Astronautica Acta. 1967. V. 13. No. 2. P. 159–166.
1. Danilov M. M. Modeling the process of carbon dioxide freezing out in the volume of expending gas flow. *Izvestia SPbGUNiPT*. 2007. No. 1. P. 6–8. (in Russian)
2. Danilov M. M., Smirnov A. S. Main peculiarities of carbon dioxide solid phase formation. *Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda*. 2014. No. 2. C. 37–40. (in Russian)
3. Danilov M. M. The growth of carbon dioxide crystals in the volume of an expanding gas stream. *Izvestia SPbGUNiPT*. 2006. No. 1. P. 18–20. (in Russian)
4. Grishin S. D., Tishin A. P., Khayrutdinov R. I. Nonequilibrium two-phase flow in a Laval nozzle with coagulation of particles of polydisperse condensate. *Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Mechanics of fluid and gas*. 1969. No. 2. P. 112–117. (in Russian)
5. Soloviev A. D. Merging drops of fluid in collisions. *Scientific papers of the Central Administrative District*. 1969. Vol. 89. P. 3–25. (in Russian)
6. Tishin A. P., Khayrutdinov R. I. On the calculation of coagulation of condensate particles in Laval nozzles. *Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Mechanics of fluid and gas*. 1971. No. 5. P. 181–185. (in Russian)

8. Стернин Л. Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. — М.: Машиностроение. 1974. 212 с.
9. Данилов М. М. Особенности процесса получения твердого диоксида углерода в низкотемпературных турбодетандерах // Дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. СПб.: СПбГУНИИПТ. 2003. 143 с.
10. Амелин А. Г. Теоретические основы образования тумана при конденсации пара. М.: Химия, 1972. 304 с.
11. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука. 1970. 904 с.
12. Теверовский Е. Н. Перенос аэрозольных частиц турбулентными потоками / Теверовский Е. Н., Дмитриев Е. С. М.: Энергоатомиздат. 1988. 160 с.
13. X.-Y. Li, A. Brandenburg, N. E. L. Haugen, G. Svensson Eulerian and Lagrangian approaches to multidimensional condensation and collection // J. Adv. Model. Earth Syst. 2017. V. 9. No. 2. P. 1116–1137.
14. Кондратьев Н. В. Коагуляция частиц твердого диоксида углерода при расширении продуктов сгорания топлива в турбодетандере // Дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. Омск: ОГТУ. 2004. 124 с.
7. Marble F. E. Droplet Agglomeration in Rocket Nozzles Caused by Particle Slip and Collision. *Astronautica Acta*. 1967. V. 13. No. 2. P. 159–166.
8. Sternin L. E. Fundamentals of gas dynamics of two-phase flows in nozzles. Moscow: Mechanical Engineering. 1974. 212 p. (in Russian)
9. Danilov M. M. Features of the carbon dioxide obtaining in the low-temperature turbines: dissertation for the degree of doctor of technical Sciences, Saint-Petersburg: SPbGUNiPT. 2003. 143 p. (in Russian)
10. Amelin A. G. Theoretical foundations of the formation of fog during condensation. Moscow: Chemistry. 1972. 304 p. (in Russian)
11. Loytsyanskiy L. G. Mechanics of fluid and gas. Moscow: Nauka, 1970. 804 p. (in Russian)
12. Teverovsky E. N. Transfer of aerosol particles by turbulent flows / Teverovsky E. N., Dmitriev E. S. Moscow: Energoatomizdat. 1988. 160 p. (in Russian)
13. X.-Y. Li, A. Brandenburg, N. E. L. Haugen, G. Svensson Eulerian and Lagrangian approaches to multidimensional condensation and collection. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2017. V. 9. No. 2. P. 1116–1137
14. Kondratyev N. V. Coagulation of particles of solid carbon dioxide during expansion of fuel combustion products in a turboexpander: dissertation for the degree of doctor of technical Sciences. Omsk: OSTU. 2004. 124 p.

Сведения об авторах

Данилов Михаил Михайлович

К.т. н., доцент факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, dmm@trumgame.ru

Апицына Ольга Сергеевна

Магистрант, инженер факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, apitsyna.olga@yandex.ru

Information about authors

Danilov Mikhail M.

Ph.D., Associate professor of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, dmm@trumgame.ru

Apitsyna Olga S.

Undergraduate, Engineer of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, apitsyna.olga@yandex.ru



29th International Conference
Ecology & Safety
 20–23 June 2020
 Burgas, Bulgaria
<http://www.sciencebg.net>

29 Международная конференция **Экология и безопасность**

20 – 23 июня 2020 г.
 Бургас, Болгария

Тематика конференции:

- Энергия, климат и глобальная безопасность в 21-ом столетии;
- Экология воздуха, почвы и воды;
- Экология человека — здоровье и безопасность;
- Гражданская оборона и борьба со стихийными бедствиями.

Topics:

- Energy, Climate and Global Security in the 21st Century;
- Ecology of Air, Soil and Water;
- Health and Safety;
- Civil Protection and Disaster Management.

Контакты (Contacts)

E-mail: ecology@sciencebg.net