

**ОЦЕНКА ПЕРЕМЕННОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТВОДА ТЕПЛОТЫ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ПАДАЮЩИХ И КРИСТАЛЛИЗУЮЩИХСЯ КАПЕЛЬ РАСПЛАВОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРИЛЛИРОВАНИЯ**

**Е.Н. Зверева<sup>@</sup>, аспирант, Ю.А. Таран, доцент**

*Кафедра процессов и аппаратов химических технологий им. Н.И. Гельперина, Московский технологический университет (Институт тонких химических технологий), Москва, 119571 Россия*

*<sup>@</sup>Автор для переписки, e-mail: lenazvereva724@gmail.com*

*Представлен метод расчета интенсивности отвода теплоты от поверхности кристаллизуемых капель расплава. Проведено сравнение полученных значений с помощью предложенного метода с экспериментально зафиксированными значениями, характеризующими интенсивность теплообмена между поверхностью образующейся гранулы и охлаждающей средой. Проанализировано влияние изменения коэффициента теплоотдачи по поверхности гранулы на время полной кристаллизации, а, следовательно, на габариты грануляционной башни. Условие, определяющее теплообмен между поверхностью гранулы и окружающим хладагентом, время полной кристаллизации в совокупности с зависимостями скорости зарождения и роста гранул определяют прочностные свойства гранул аммиачных удобрений.*

**Ключевые слова:** кристаллизация, приллирование, коэффициент теплоотдачи, гранула, приближение пограничного слоя.

**EVALUATION OF VARIABLE INTENSITY OF HEAT REMOVAL FROM THE SURFACE OF FALLING AND CRYSTALLIZING MELT DROPLETS IN THE PROCESS OF THEIR PRILLING**

**E.N. Zvereva<sup>@</sup>, Yu.A. Taran**

*Moscow Technological University (Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, 119571 Russia*

*<sup>@</sup>Corresponding author e-mail: lenazvereva724@gmail.com*

*The method of calculation of the intensity of heat removal from the surface of the crystallizing melt droplets is presented. A comparison with the experimental fixed values representing the intensity of the heat transfer between the surface of the resulting pellet and cooling agent is carried out. The influence of heat transfer coefficient on the surface of the pellet changes on complete crystallization time, and therefore on the size of the granulation tower, is analyzed. Conditions defining the heat transfer between the granule surface and surrounding coolant, while full crystallization in conjunction with the dependence of the rate of nucleation and growth of the granules determine mechanical properties of ammonia fertilizer granules.*

**Keywords:** crystallization, prilling, heat-transfer coefficient, pellet, boundary-layer approximation.

**Введение**

В данной работе определяют переменную интенсивность отвода теплоты от поверхности кристаллизующихся гранул к газообразной охлаждающей среде с целью связать полученные данные с габари-

тами грануляционных башен и их режимом работы для решения проектных и эксплуатационных задач. Существует не так много количественных зависимостей для определения переменной интенсивности отвода теплоты от поверхности кристаллизующихся гранул к газообразной охлаждающей среде [1–3];

результаты расчетов с применением известных зависимостей расходятся. Поэтому представляет интерес не просто сравнить результаты расчетов изменения коэффициента теплоотдачи по поверхности гранулы от угла атаки ее потоком газообразного хладагента  $\alpha_c = f(\varphi)$ , но и оценить влияние результатов расчетов времени полной кристаллизации гранул по предложенным уравнениям и математическим моделям на определение необходимой высоты грануляционных башен. Обзор работ и результаты ранее проведенных авторами экспериментов по теплообмену между сферическими телами, в том числе, претерпевающими фазовые превращения, и газовым потоком приведен в [1–8].

В настоящей работе представлен метод оценки интенсивности отвода теплоты от поверхности кристаллизующихся капель расплава. Проведено сравнение результатов, полученных с помощью метода расчета в приближении пограничного слоя, с экспериментально зафиксированными значениями, характеризующими интенсивность теплообмена между поверхностью образующейся гранулы и охлаждающей средой в процессе прилипания [1, 3, 4, 9].

Данный метод актуален для крупнотоннажных процессов производства азотсодержащих минеральных удобрений (аммиачная селитра, карбамид), серы и т.д., протекающих в башнях, где капли расплава попадают в восходящий поток хладагента (чаще всего – воздуха). Предложенный метод позволяет численно определить коэффициент теплоотдачи  $\alpha_c$  на поверхности кристаллизующейся гранулы в

зависимости от угла  $\varphi$ , который изменяется от 0 до  $\pi$ . Этот диапазон изменения угла атаки является характерным для процесса прилипания в башнях.

### Экспериментальная часть

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_c$  количественно определяется с помощью предложенного нами уравнения в приближении пограничного слоя, которое можно представить в следующем виде:

$$\alpha_c = (0.2a_c / Pr^n) \cdot \sqrt{w/r_k v_c \varphi}, \quad (1)$$

где  $Pr = v_c / a_c$ ,  $a_c = \lambda_c / c_c \rho_c$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $w$  – скорость воздуха, м/с;  $r_k$  – радиус гранулы, м;  $v_c$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;  $c_c$  – теплоемкость, Дж/кг·град;  $\rho_c$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\varphi$  – отклонение от угла атаки хладагентом, град.

Были определены коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_c$  для гранул с различными диаметрами ( $d_1 = 0.001$  м,  $d_2 = 0.002$  м,  $d_3 = 0.003$  м). Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Уравнение (1) описывает «падающий» участок кривой  $\alpha_c = f(\varphi)$ , где  $\varphi$  изменяется от 0 до  $\pi$ ,  $n = [-1/2 \div -1/3]$ ,  $r_k = 0.0005$  м.

Для аммиачной селитры:  $\lambda_c = 0.0257$  Вт/м·град – теплопроводность;  $\mu_c = 17.3 \cdot 10^{-6}$  Па·с – вязкость;  $c_c = 1005$  Дж/кг·град – удельная теплоемкость. Определяем коэффициент теплоотдачи  $\alpha_c$  для гранулы  $d_1 = 0.001$  м:

$$\alpha_c = (0.2a_c / Pr^n) \cdot \sqrt{w/r_k v_c \varphi} = 0.2 \cdot 2.124 / 0.677^{-1/2} \cdot \sqrt{8.6 / 0.0005 \cdot 1.437 \cdot 10^{-5} \cdot \pi} = 194.89 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$$

Таким образом, можно провести расчеты  $\alpha_c$  и для других диаметров гранул ( $d_2 = 0.002$  м и  $d_3 = 0.003$  м). В

табл. 1 представлены полученные результаты для коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_c$  при скорости воздуха  $w = w_{\text{внт}}$ .

**Таблица 1.** Значения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_c$ , зависящих от угла  $\varphi$ , для гранул с  $d = 0.001, 0.002, 0.003$  м

$\varphi$ , град	Экспериментальные значения $\alpha_c$ [1], Вт/м <sup>2</sup> ·град			Расчетные значения $\alpha_c$ в приближении пограничного слоя, Вт/м <sup>2</sup> ·град			Расчетные значения $\alpha_c$ по зависимости Фросслинга (для Re = 1000), Вт/м <sup>2</sup> ·град		
	$d_1=0.001$ м	$d_2=0.002$ м	$d_3=0.003$ м	$d_1=0.001$ м	$d_2=0.002$ м	$d_3=0.003$ м	$d_1=0.001$ м	$d_2=0.002$ м	$d_3=0.003$ м
30	580.0	496.5	435.0	194.9	137.8	112.5	930.1	465.0	310.0
45	539.4	469.8	411.8	159.2	112.6	91.9	908.7	454.3	302.9
60	516.2	435.0	388.6	137.9	97.5	79.6	801.5	400.8	267.2
90	255.2	261.0	174.0	112.6	79.6	64.9	444.3	222.2	148.1
110	87.0	54.5	34.8	–	–	–	194.3	97.1	64.8
140	139.2	89.3	75.4	–	–	–	265.7	132.9	88.6
180	200.7	162.4	139.2	79.6	56.3	45.9	408.6	204.3	136.2

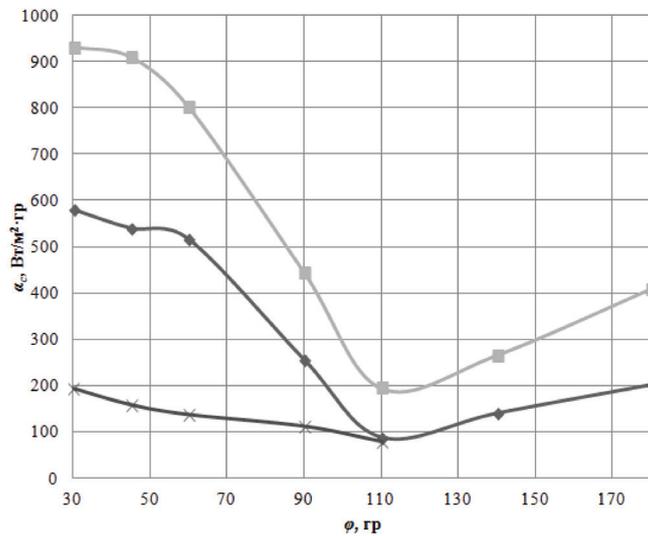
В этой же таблице приведены экспериментальные значения  $\alpha_c$  для размеров гранул  $d = 0.001, 0.002, 0.003$  м при скорости витания  $w_{\text{внт}}$ , полученные с помощью диаграммы из работы [1], и значения  $\alpha_c$ , рассчитанные по зависимости Фросслинга [1]. Число Фросслинга позволяет оценить относительную ин-

тенсивность локального переноса тепла и представлено следующим выражением:

$$Fr = \frac{Nu - 2}{Re^{0.5} \cdot Pr^{0.33}} \quad (2)$$

Метод расчета коэффициента теплоотдачи с помощью вышеприведенной зависимости заключается в последовательном определении числа Фросслинга с помощью графической зависимости  $F_r = f(\varphi)$  [1], затем значения критерия  $Nu$  и итоговом определении коэффициента теплоотдачи  $\alpha_c$  по поверхности гранул.

На рисунке приведены графические зависимости  $\alpha_c = f(\varphi)$  (экспериментальные – по диаграмме из работы [1] и расчетные – по методу в приближении пограничного слоя и по зависимости Фросслинга [1]) для гранул аммиачной селитры с диаметром  $d = 0.001$  м при  $w_{внт}$ .



Зависимости  $\alpha_c = f(\varphi)$  (♦ – экспериментальные по [1], × – расчетные по методу в приближении пограничного слоя, ■ – рассчитанные по формуле Фросслинга при  $Re_{внт} = 1000$ ) для гранул аммиачной селитры с диаметром  $d = 0.001$  м при  $w_{внт}$ .

Ниже представлена сравнительная таблица (табл. 2) определения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_c$  от поверхности образующихся гранул разными способами (экспериментальными и расчетными).

В этой же таблице даны значения времени полной кристаллизации  $\tau_{пк}$  для всех случаев (как расчет-

ных, так и экспериментальных  $\alpha_c$ ). Данные значения были получены численным расчетом по созданному на кафедре ПАХТ математическому описанию [4–7, 10] применительно к кристаллизации капель расплавов аммиачной селитры сферической формы, что удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

**Таблица 2.** Сравнение коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_c$  от поверхности образующихся гранул с  $d = 0.001$  м при различных способах оценки интенсивности отвода теплоты при  $w = w_{внт}$

Метод определения	$\alpha_c$ , Вт/м <sup>2</sup> ·гр	$\alpha_c^{расч}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·гр	$\alpha_c / \alpha_c^{расч}$	Расхождение $\alpha_c$ с $\alpha_c^{расч}$ , %	$\tau_{пк}$ , с
Экспериментальные значения [1] $d_k = 0.001$ м, $t_{см} = 173^\circ\text{C}$	462.9	580.0	0.798	20.2	1.8
Расчет по зависимости Фросслинга [1] $d_k = 0.001$ м, $t_{см} = 173^\circ\text{C}$	398.6	930.1	0.429	57.1	1.8
Расчет в приближении пограничного слоя $d_k = 0.001$ м, $t_{см} = 173^\circ\text{C}$	125.6	194.9	0.645	35.5	2.0
Расчет с помощью мат. модели [3]	311.9	–	–	–	1.9
Расчет с помощью полуэмпирического выражения [11]	328.4	–	–	–	1.9

Для оценки интенсивности локального переноса тепла используется безразмерная группа, с помощью которой рассчитывается усредненный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_c$  [3] по поверхности образующейся гранулы при  $200 < Re < 3000$ :

$$Nu = 0.37 \cdot Re^{0.6} \cdot Pr^{1/3}, \quad (Nu = \frac{\alpha_c \cdot d}{\lambda}). \quad (3)$$

В табл. 3 представлены полученные усредненные по поверхности значения  $\alpha_c$  при различных значениях  $d$  гранул аммиачной селитры.

Аналогично, для расчета среднего коэффициента теплоотдачи от сферических гранул к хладагенту в работе [11] предложено полуэмпирическое расчетное выражение:

$$Nu = 2 + k \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{0.33}, \text{ где } k = 0.59 \div 0.74 \quad (4)$$

Для расчета было принято значение  $k = 0.6$ . Полученные усредненные значения  $\alpha_c$ , приведенные в табл. 3, находятся примерно в том же числовом диапазоне, что и средние значения коэффициентов теплоотдачи, рассчитанные с помощью выражения (3).

Отметим, что значения  $\alpha_c = f(\varphi)$  и  $\alpha_c$ , рассчитанные по разным формулам, различаются достаточно

сильно между собой. Поэтому считать вопрос об определении коэффициента теплоотдачи  $\alpha_c$  в зависимости от угла атаки потока воздуха  $\varphi$  и усредненных значений  $\alpha_c$  полностью решенным преждевременно.

Однако, значения  $\alpha_c = f(\varphi)$  надежны не сами по себе, а как коэффициенты модели переноса теплоты в кристаллизующейся грануле. Внутреннее сопротивление переносу теплоты в грануле нивелирует различия в расчетной величине  $\alpha_c$  и в конечном результате – величине времени полной кристаллизации  $\tau_{\text{нк}}$ .

**Таблица 3.** Значения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_c$  для гранул с  $d = 0.001, 0.002, 0.003$  м, рассчитанные по формулам (3) [3] и (4) [11]

$d, \text{ м}$	$Re$	$Nu$		$\bar{\alpha}_c, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{гр}$	
		(3)	(4)	(3)	(4)
0.001	418	12.1357	12.7773	311.9	328.4
0.002	835	18.3944	17.2414	236.4	221.6
0.003	1253	23.4606	20.6668	201.0	177.0

### Выводы

1. Сравнительный анализ показал, что формула (1) для расчета  $\alpha_c$  позволяет провести оценку переменной интенсивности отвода теплоты по поверхности образующейся гранулы к потоку хладагента. Полученные расчетные данные в приближении пограничного слоя согласуются с экспериментальными, полученными в работах [1, 2]. В то же время найденные по формулам (2), (3) усредненные значения  $\alpha_c$  также коррелируют с

рассчитанными  $\alpha_c$ . Таким образом, возможно использование метода расчета коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_c$  в приближении пограничного слоя для оценки интенсивности теплообмена кристаллизующейся капли расплава.

2. Проведенный анализ утверждает авторов во мнении, что можно считать вопрос о методе расчета  $\alpha_c = f(\varphi)$  решенным оптимистично, так как с учетом внутреннего сопротивления переносу теплоты он позволяет надежно рассчитывать динамику кристаллизации капель расплава и определять  $\tau_{\text{нк}}$ .

### Список литературы:

1. Казакова Е.А. Гранулирование и охлаждение азотсодержащих удобрений. М.: Химия, 1980. 288 с.
2. Tao L.C. Generalized numerical solutions of freezing a saturated liquid in cylinders and spheres // A. J. Ch. E. Journal. 1967. V. 13. № 1. P. 165–169.
3. Иванов М.Е., Олевский В.М., Поляков Н.Н. и др. Производство аммиачной селитры в агрегатах большой единичной мощности. 2-е изд., перераб. и доп. / под ред. В.М. Олевского. М.: Химия, 1990. 285 с.
4. Таран А.Л., Шмелев С.Л., Олевский В.М., Кузнецова В.В., Рустамбеков М.К., Филонов А.М., Таран А.В. Исследование возможности гранулирования в башнях аммиачной селитры с добавками сульфата аммония. // Хим. пром. 1991. № 12. С. 743–749.
5. Таран А.Л., Кабанов Ю.М., Таран А.В. Гранулирование аммиачной селитры в газообразном, жидком и испаряющемся хладагентах // Теор. основы хим. технологии. 1983. Т. 17. № 5. С. 714.
6. Таран А.Л., Кабанов Ю.М. Затвердевание гранул азотсодержащих удобрений при неравномерной по их поверхности интенсивности отвода тепла // Теор. основы хим. технологии. 1983. Т. 17. № 6. С. 759–766.

### References:

1. Kazakova E.A. The granulation and cooling of nitrogenated fertilizers. M.: Khimiya Publ., 1980. 288 p. (in Russ.).
2. Tao L.C. Generalized numerical solutions of freezing a saturated liquid in cylinders and spheres // A. J. Ch. E. Journal. 1967. V. 13. № 1. P. 165–169.
3. Ivanov M.E., Olevskiy V.M., Polyakov N.N. [et al.] Production of ammonium nitrate in aggregates with high unit capacity? / Ed. by V.M. Olevskiy. M.: Khimiya Publ., 1990. 285 p. (in Russ.).
4. Taran A.L., Shmelev S.L., Olevski V.M., Kuznetsova V.V., Rustambekov M.K., Filonov A.M., Taran A.V. The study of the possibility of granulation in towers of ammonium nitrate with ammonium sulphate additives. // Khim. prom. (Chemical Industry). 1991. № 12. P. 743–749. (in Russ.).
5. Taran A.L., Kabanov Yu.M., Taran A.V. Granulation of ammonium nitrate in a gaseous, liquid, and evaporating refrigerants // Teor. osnovy khim. tekhnologii. (Theor. Foundations of Chemical Technology). 1983. V. 17. № 5. P. 714. (in Russ.).
6. Taran A.L., Kabanov Yu.M. The solidification of the nitrogen-containing fertilizer pellets at their uneven surface of removing of heat // Teor. osnovy khim. tekhnologii

7. Таран А.Л., Таран А.В. Расчеты процесса кристаллизации однокомпонентных расплавов в башенных аппаратах // Теор. основы хим. технологии. 1985. Т. 19. № 5. С. 712.
8. Таран А.Л., Долгалёв Е.В., Таран Ю.А. Математическое описание процесса гранулирования извлектово-аммиачной селитры в башнях // Хим. технология. 2007. Т. 8. №8. С. 376–380.
9. Чернышов А.К., Левин Б.В., Туголуков А.В., Огарков А.А., Ильин В.А. Аммиачная селитра: свойства, производство, применение. М.: Инфохим, 2009. 544 с.
10. Карташов Э.М., Нагаева И.А. Краевые задачи теплопроводности при переменном во времени коэффициенте теплоотдачи // Тонкие химические технологии. 2015. Т. 10. № 4. С. 79–86.
11. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А., Захаренко В.В., Зиновкина Т.В., Таран А.Л., Костаян А.Е. Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс в 2 кн. М.: Теревинф, 2015. 1784 с.
- (Teor. Foundations of Chemical Technology). 1983. V. 17. № 6. P. 759–766. (in Russ.).
7. Taran A.L., Taran A.V. Calculations of single-component melt crystallization process in the tower machines // Teor. osnovy khim. tehnologii. (Teor. Foundations of Chemical Technology). 1985. V. 19. № 5. P. 712. (in Russ.).
8. Taran A.L., Dolgalev E.V., Taran Yu.A. The mathematical description of the granulation process of calcium ammonium nitrate in the towers // Khimicheskaya tekhnologiya (Chemical Technology). 2007. V. 8. № 8. P. 376–380. (in Russ.).
9. Chernyshov A.K., Levin B.V., Tugolukov A.V., Ogarkov A.A., Il'in V.A. Ammonium nitrate: properties, production, application. M.: Infokhim Publ., 2009. 544 p. (in Russ.).
10. Kartashov E.M., Nagaeva I.A. Boundary value problems of thermal conductivity at time-variant relative coefficient of heat transfer // Tonkie khimicheskie tekhnologii (Fine Chemical Technologies). 2015. V. 10. № 4. P. 79–86.
11. Ainshtein V.G., Zakharov M.K., Nosov G.A., Zakharenko V.V., Zinovkina T.V., Taran A.L., Kostaniyan A.E. Processes and devices of chemical technology. M.: Terevinf, 2015, in 2 books. 1784 p. (in Russ.).