

## Взаимодействие металлического порошка с газом в процессах остывания

*А.Р. Гайсина*

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева - КАИ, Казань*

**Аннотация:** В данной статье рассматривается решение проблемы расчета процессов кристаллизации металлических капель в процессе продувки расплава газом при производстве порошков. Приведены расчеты процесса каплеобразования и оценки времени фазового перехода и до полного остывания в зависимости от размера частицы в диапазоне 50-500 мкм при предварительном подогреве газового потока до различных температур от 0 до 500<sup>0</sup> С. Разработана методика расчета времени охлаждения капли расплавленного металла в потоке газа при получении металлического порошка методом распыления и определено соотношение составляющих полного времени капельного охлаждения.

**Ключевые слова:** металлический порошок, распыление расплава, охлаждение частиц, газовые потоки, теплообмен, аддитивные технологии, технологический процесс, газодинамический процесс.

### Введение

В настоящей работе рассматриваются основные особенности теплообмена между частицами расплавленного металла и окружающим их газовым потоком. Оценка времени охлаждения отдельных частиц различных размеров в газовом потоке необходима для выяснения процесса порошкообразных частиц; зная время затвердевания капли в потоке газа, можно рассчитать форму, которую примет эта капля под действием сил поверхностного натяжения, переходный процесс, происходящий при этом, описан в работе [1], и, следовательно, определить требуемые технологические параметры процесса распыления для получения порошка заданного размера частиц. Подобные процессы теоретически оценивала группа в работе [2], но для более крупных частиц, где важна ещё и оценка переноса тепла в самой частице. Анализ газодинамических процессов остывания расплавленных частиц является частью процессов, как производства новых порошков, описанных, например, в работе группы под руководством Lin Chan [3], так и восстановления порошковых материалов,

---

темой которого активно занимается научная группа Гайсина А.Ф. [4,5]. Как правило, в таких процессах стараются использовать лабораторные эксперименты прямого наблюдения процессов с использованием оптических методов [6,7], однако, они мало применимы в высокоинтенсивных тепловых процессах, где размеры частиц при этом меньше 0,5 мм. Особенности таких процессов экспериментально изучены в работе [8].

### Основная часть

Каждая расплавленная частица находится под действием сил поверхностного натяжения и вязкости, с одной стороны, и удара газового потока, с другой. По мере удаления от точки расплавления деформирующее действие газовой струи становится менее сильным, что рассчитано теоретически в работах [1,9]; в результате теплообмена между металлом и газовой фазой изменяются также вязкость и поверхностное натяжение металла как показано в работах [3,10], и по этой причине чрезвычайно важно знать, как изменяются эти теплофизические параметры во времени.

В начальный момент времени капля, увлекаемая газовым потоком, находится в жидком состоянии и имеет некоторое количество теплоты  $Q_{\Sigma}$ .

$$Q_{\Sigma} = q_1 + q_2 + q_3, \quad (1)$$

здесь  $q_1$  – количество теплоты, затраченное на нагрев капли от температуры плавления  $t_{пл}$  до конечной температуры  $t_k$ ;  $q_2$  – скрытая теплота плавления (затвердевания);  $q_3$  – количество теплоты, затраченное на нагрев капли от комнатной температуры до температуры плавления  $t_{пл}$ . Для процесса каплеобразования интересно рассмотреть первые две составляющие,  $q_1$  и  $q_2$ . Величину  $q_1$  можно определить из уравнения теплового баланса:

$$dq_1 = \alpha F(t_k - t_{пл})d\tau = -mcdt, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>\*°С;  $F$  площадь поверхности частиц, м<sup>2</sup>;  $t_k$  – температура металла, подаваемого на расплав, °С;  $\tau$  время

охлаждения капли от температуры  $t_k$  до температуры  $t_{пл}$ ;  $m$  масса капли, кг;  $v$  удельная теплоемкость металла, Дж/кг\* $^{\circ}$ С.

Преобразование уравнения (2) и разделяя переменные, получаем

$$-\frac{dt}{t_k - t_g} = \frac{6\alpha}{d \cdot \gamma_m \cdot c} d\tau, \quad (3)$$

После интегрирования получаем:

$$\ln \frac{t_k - t_g}{t_d - t_g} = \frac{6\alpha}{d \cdot \gamma_m \cdot c}, \quad (4)$$

где  $\gamma_m$  – удельный вес металла, кг/м $^3$ ;  $t_d$  – температура капли в рассматриваемый момент времени;  $d$  диаметр частиц, мкм.

Преобразование уравнения (4) получаем выражение для определения времени, необходимого для охлаждения капли от температуры  $t_d$  до температуры  $t_k$  при фиксированной температуре продувки  $t_g$ .

$$\tau = \frac{d \cdot \gamma_m \cdot c}{6\alpha} \ln \frac{t_k - t_g}{t_d - t_g}, \quad (5)$$

В конкретном случае, когда  $t_d = t_{плав}$ , уравнение (5) можно использовать для определения времени, необходимого для охлаждения капли до температуры плавления. Скрытую теплоту плавления или затвердевания  $q_2$  найдем из выражения:

$$q = \lambda * m, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – удельная теплота затвердевания, Дж/кг.

Время, необходимое для выделения скрытой теплоты затвердевания, можно определить следующим образом:

$$\tau' = \frac{q_2}{q \cdot F}, \quad (7)$$

В этой формуле  $q$  — тепловой поток, величина которого находится из выражения:

$$q = \alpha(t_{плав} - t_g), \quad (8)$$

Суммарное время  $\tau_{\Sigma}$ , необходимое для охлаждения капли до полностью затвердевшего состояния, определяется, как сумма:

$$\tau_{\Sigma} = \tau + \tau', \quad (9)$$

В некоторых случаях может оказаться желательным рассчитать скорость охлаждения капли [2], т. е. изменение температуры капли с течением времени. Температура капли в любой момент времени может быть рассчитана по формуле, полученной путем небольшой модификации уравнения (4):

$$t_d = t_g + (t_{\text{плав}} - t_g) * e^{-\frac{6\alpha}{d * \gamma m * c}}, \quad (10)$$

Уравнение (10) применимо, когда  $t_d > t_{\text{плав}}$ . Для расчета коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  использовалось эмпирическое соотношение, предложенное для газового потока с взвешенными частицами при числах Рейнольдса 150-30000:

$$\alpha = 0.62 * \frac{\lambda_g}{d} Re^{0.5}, \quad (11)$$

где  $\lambda_g$  – коэффициент теплопроводности газа, Вт/м\*°С;  $Re$  число Рейнольдса,

$$Re = \frac{\omega_g - \omega_p}{\nu_g} d, \quad (12)$$

В соответствии с изложенным были рассчитаны времена охлаждения капель различных размеров от 50 до 500 мкм при предварительном подогреве газового потока до различных температур (от 0 до 500° С) и при различных степенях перегрева металла  $t_m$ . Результаты этих расчетов представлены в виде кривых времени охлаждения в зависимости от размера частиц для различных температурных условий процесса распыления.

На рис. 1 показано влияние размера капель на время остывания капель диаметром 50-500 мкм при температуре газового потока от 0 до 500 °С. Расчет проводился для капель расплавленной меди, перегретой до температуры 1200° С, как это обычно применяют при распылении меди и бронз.

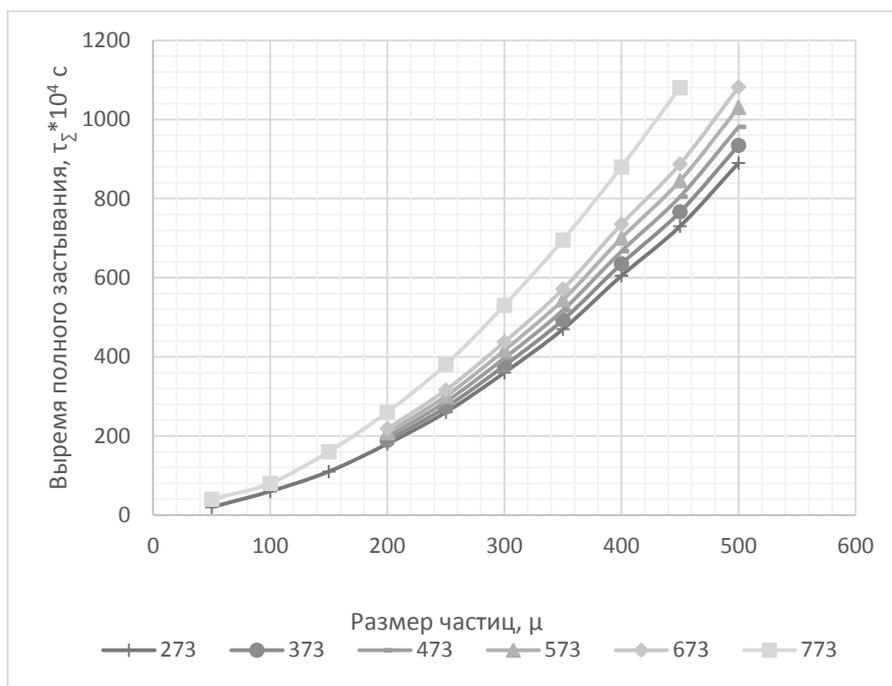


Рис. 1. Зависимость времени полного остывания капли от размера капли при различных температурах продувки. Температура газа (К): 1) 273; 2) 373; 3) 473; 4) 573; 5) 673; 6) 773.  $T_{пл} = 1473$  К.

Время охлаждения рассчитывали по уравнениям (5) и (7), после чего два значения были добавлены в соответствии с формулой (9). Из рис. 1 видно, что, в зависимости от размера частиц и температуры продувки, время, необходимое для охлаждения капель до полного затвердевания  $\tau_{\Sigma}$ , в среднем составляло от 0,01 до 0,1 с. Интересно отметить, что отношение элементов времени охлаждения  $\tau'/\tau$  при всех температурах продувки и размерах частиц было постоянным и равнялось 3,65 при  $t_k \approx 1200^\circ$  С. Другими словами, период охлаждения до температуры плавления составлял 20,5%, а период выделения скрытой теплоты затвердевания 78% от общего времени затвердевания частиц. Это следует также из уравнения (5), когда:

$$\frac{t_k - t_g}{t_d - t_g} \ll 1, \quad (13)$$

Таким образом, по графику на рис. 1 можно определить не только полное время капельного охлаждения, но и обе его составляющие:  $\tau = 0,21 \tau_{\Sigma}$  и  $\tau' = 0,79 \tau_{\Sigma}$ .

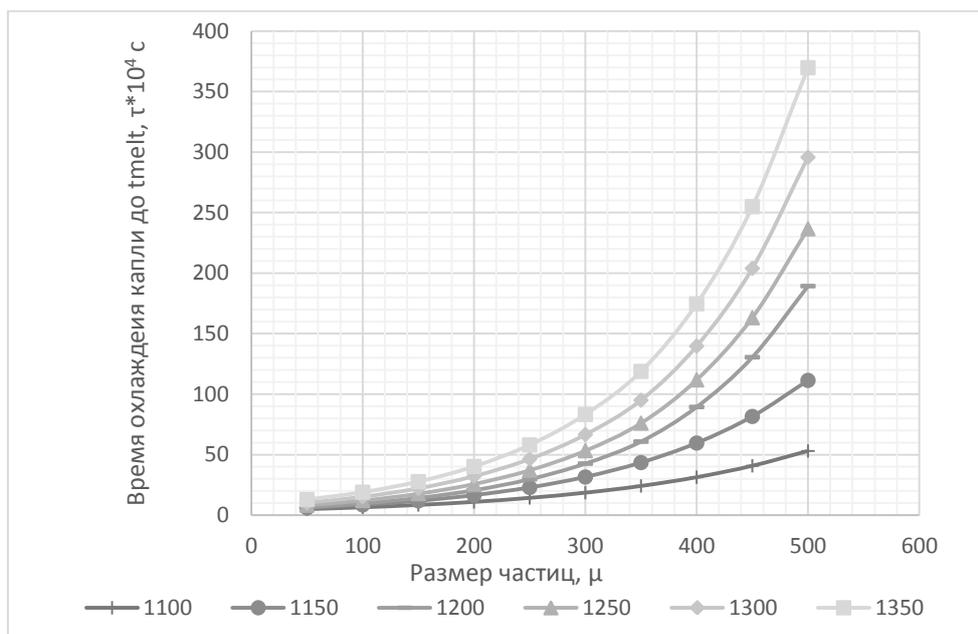


Рис. 2. Зависимость времени, необходимого для охлаждения капель до температуры плавления при различных степенях металла. Температура металла ( $^{\circ}\text{C}$ ): 1) 1100; 2) 1150; 3) 1200; 4) 1250; 5) 1300; 6) 1350.  $T = f(d)$ ,  $T_g = \text{const}$ .

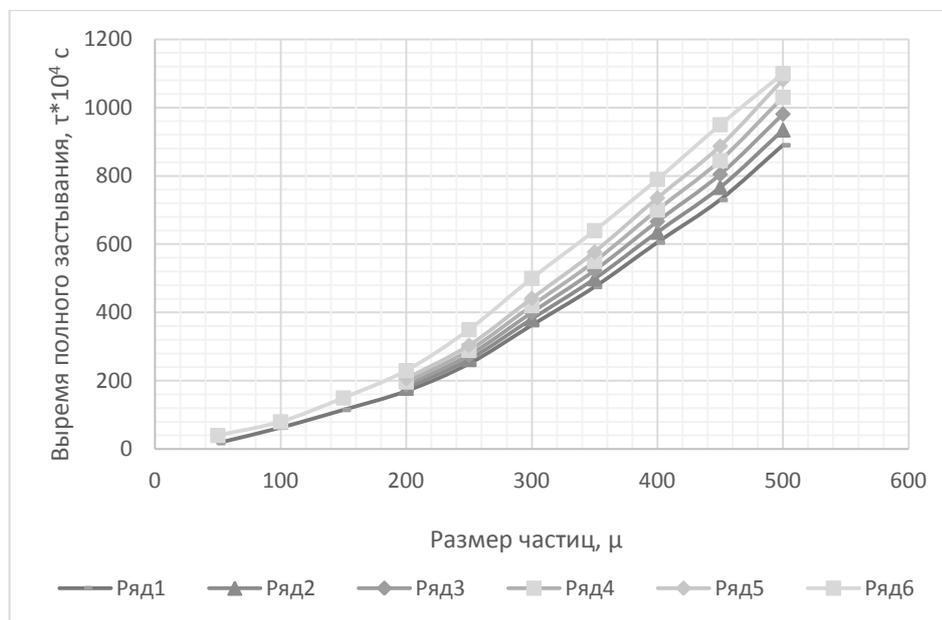


Рис. 3. Зависимость времени полного охлаждения капли ( $\tau_{\Sigma}$ ) от размера капли при различных степенях перегрева металла. Температура металла ( $^{\circ}\text{C}$ ): 1) 1100; 2) 1150; 3) 1200; 4) 1250; 5) 1300; 1350.

Рис. 2 и 3 показывают влияние размера частиц на время охлаждения частиц при различных степенях перегрева металла выше его температуры плавления; температура продувки при этом поддерживалась постоянной на уровне 20-25° С. На рис. 2 представлена функция  $\tau=f(d)$ , а на рис. 3 функция  $\tau_{\Sigma}=f(d)$ .

Анализ этих графиков показывает, что чем выше степень перегрева металла, тем больше доля компонента Т в общем времени охлаждения, и позволяет оценить эту долю численно. Отношение  $\tau'/\tau$  рассчитано для температур перегрева металла от 1100 до 1350° С (температура плавления меди 1083 °С). Зависимость отношения  $\tau'/\tau$  от температуры перегрева металла представлена на рис. 4.

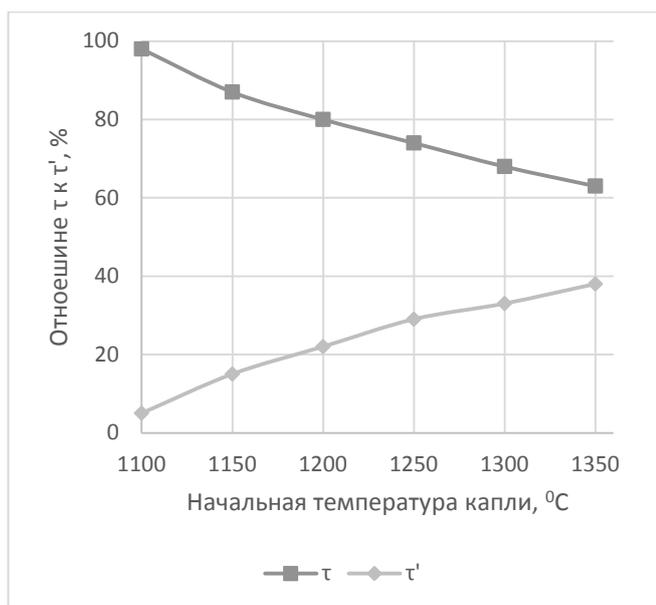


Рис. 4. Зависимость соотношения элементов полного времени капельного охлаждения от начальной температуры металла.  $\tau$  время предварительного охлаждения до температуры плавления;  $\tau'$  время выделения скрытой теплоты кристаллизации.

## Результаты и обсуждение

Разработана методика расчета времени охлаждения капли расплавленного металла в потоке газа при получении металлического порошка методом распыления. Определено соотношение составляющих полного времени капельного охлаждения - времени охлаждения до температуры плавления и времени выделения скрытой теплоты кристаллизации.

## Литература

1. Bandyopadhyay R., Nylén P. A computational fluid dynamic analysis of gas and particle flow in flame spraying // Journal of Thermal Spray Technology. 2003. Т. 12. № 4. pp. 492-503.
2. Lu W. and Yang M., Theoretical study of phase change heat transfer in a sphere. The Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow, Busan, Korea, 2015. pp. 253-259
3. Fan Q., Niu H., Zhang J., Sun Yu., Lin Ch. Prediction modeling and parameters' optimization of gas-powder flow convergence in coaxial powder feeding nozzles based on cfd-dem simulation // Progress in additive manufacturing. 2022. Т. 7. № 6. pp. 1423-1439.
4. Гайсин А.Ф., Каюмов Р.Р., Купутдинова А.И., Марданов Р.Р. Плазменно-жидкостной рециклинг металлического порошка для 3D печати // Физика и химия обработки материалов. 2023. № 1. С. 37-44.
5. Гайсин А.Ф. Исследование и разработка плазменно-жидкостной переработки металлических изделий аддитивного производства в мелкодисперсный порошок для его повторного применения в 3D-печати. НИР: грант № 22-29-00021. Российский научный фонд. 2022. URL: [rscf.ru/project/22-29-00021/](https://rscf.ru/project/22-29-00021/)

6. Шмелев А.Г., Леонтьев А.В., Никифоров В.Г., Сафиуллин Г.М., Лобков В.С. К вопросу об оптическом контроле анизотропии молекул в жидкости: ориентационная анизотропия // Ученые записки Казанского государственного университета. Серия: Физико-математические науки. 2008. Т. 150. № 2. С. 228-233.
7. Нагулин К.Ю. Теневая визуализация газовых и плазменных потоков в горелке индуктивно-связанной плазмы оптического эмиссионного спектрометра // Инженерный вестник Дона, 2016, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3660](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3660).
8. Нагулин К.Ю. Исследование и оптимизация газопорошковых потоков во внеосевой сопловой насадке лазерного технологического комплекса // Инженерный вестник Дона, 2017, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4278](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4278)
9. Гайсина А.Р. Программа расчета РВП. Свидетельство №2018660085 Российская Федерация // Заявитель и правообладатель Гайсина А.Р. заявл. №2018618077 23.07.2018, опубл.16.08.2018. Реестр программ для ЭВМ. – URL: [new.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=EVM&DocNumber=2018660085](http://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2018660085)
10. Бируля В.Б. Выравнивание перепада температур в зоне обжига туннельной печи // Инженерный вестник Дона, 2023, №7. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8554](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8554)

### References

1. Bandyopadhyay R., Nylén P. Journal of Thermal Spray Technology. 2003. Т. 12. № 4. pp. 492-503.
  2. Lu W. and Yang M., Theoretical study of phase change heat transfer in a sphere. The Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow, Busan, Korea, 2015. pp. 253-259.
-

3. Fan Q., Niu H., Zhang J., Sun Yu., Lin Ch. Progress in additive manufacturing. 2022. Т. 7. № 6. pp. 1423-1439.
4. Gajsin A.F., Kayumov R.R., Kuputdinova A.I., Mardanov R.R. Fizika i ximiya obrabotki materialov. 2023. № 1. pp. 37-44.
5. Gajsin A.F. Research and development of plasma-liquid processing of metal products of additive manufacturing into a fine powder for its reuse in 3D printing. [Research and development of plasma-liquid processing of additively manufactured metal products into fine powder for reuse in 3D printing]. NIR: grant № 22-29-00021. Rossijskij nauchnyj fond. 2022. URL: [rscf.ru/project/22-29-00021/](https://rscf.ru/project/22-29-00021/)
6. Shmelev A.G., Leont`ev A.V., Nikiforov V.G., Safiullin G.M., Lobkov V.S. Uchenye zapiski Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki. 2008. Т. 150. № 2. pp. 228-233.
7. Nagulin K.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona, 2016, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3660](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3660).
8. Nagulin K.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4278](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4278)
9. Gajsin A.R. Programma rascheta RVP [RVP calculation program]. Svidetel`stvo №2018660085 Rossijskaya Federaciya, Zayavitel` i pravoobladatel` Gajsin A.R. zayavl. №2018618077 23.07.2018, opubl.16.08.2018. Reestr programm dlya E`VM. URL: [new.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=EVM&DocNumber=2018660085](https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2018660085)
10. Birulya V.B. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №7. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8554](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8554)