

УДК 621.762.2

DOI:10.26661/2071-3789-2019-2-42-04

Терновой Юрий Федорович, заведующий кафедрой, доктор технических наук
Личконенко Наталия Владимировна, старший преподаватель

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ МИКРОГРАНУЛ ГАЗОВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ

Инженерный институт Запорожского национального университета

Приведены различные методики расчетов скорости охлаждения при газовом распылении металлических расплавов. Показано, что расчет скорости охлаждения при кристаллизации зависит от размера частиц и присутствия сателлитов на их поверхности. Оценка скорости охлаждения частиц без сателлитов или с ними указывает на необходимость учета и определения требуемых габаритов камеры распыления.

Ключевые слова: газовое распыление, теплообмен, сателлит, скорость охлаждения, микроструктура, число Био, специальный сплав, размер капель

При распылении струи металлической жидкости газовым потоком возникшие двухфазные системы «газ-жидкость» и «газ-твердое тело» образуют металлогазовый факел, представляющий собой непрерывно существующую двух- или трехфазную смесь жидких и твердых металлических частиц в газе. В нем происходит взаимодействие газового потока с расплавом, теплофизические характеристики и агрегатное состояние которого меняются: твердые гранулы и капли сталкиваются, кристаллизуются отдельно и взаимодействуют с окружающей средой. Такие процессы по сути определяют свойства получаемого порошка, прежде всего размеры и форму его частиц.

Инженерные расчеты процессов получения частиц при газовом распылении предусматривают определение следующих параметров: фракционного состава, координаты (трека) и скорости частицы, соответствующих началу и окончанию процесса ее кристаллизации; зависимостей изменения температуры и скорости движения капли во времени, коэффициента теплопередачи в зависимости от размера гранул, скорости охлаждения, а также продолжительности процессов охлаждения и кристаллизации [1].

Оценку условий кристаллизации и скорости охлаждения при образовании гранул в процессах газоструйного распыления выполняли во многих работах [2-4], хотя описание процессов, происходящих в металлогазовом факеле затруднено из-за быстро меняющихся условий во времени и пространстве, а также сложности постановки эксперимента.

В работе [5] реализован подход к расчету процесса охлаждения капель при распылении расплава при большой теплопроводности собствен-

но тела частицы. При этом критерий Био (Bi) является важной характеристикой процесса искусственного теплообмена частиц расплава с газом и характеризуется отношением термического сопротивления материала частицы, определяемым ее теплопроводностью, и термическим сопротивлением конвективного переноса окружающей среды:

$$Bi = \frac{\alpha_{\text{вк}} \cdot d_e}{\lambda_{\text{м}}}, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{м}}$ – теплопроводность жидкого металла; $\alpha_{\text{вк}}$ – коэффициент теплоотдачи за счет вынужденной конвекции, $\alpha = \text{Nu} \cdot \lambda_{\text{г}} / d_e$, Nu – число Нуссельта, $\text{Nu} = 2 + 0,576 \text{Re}^{0,5} \cdot \text{Pr}^{0,3}$; $\lambda_{\text{г}}$ – теплопроводность газа-энергоносителя; Re, Pr – число Рейнольдса и Прандтля соответственно.

При $Bi < 0,1$ тепловая энергия капли сконцентрирована в «геометрической точке» и диаметр металлической капли $d_k \leq 10^2$ мкм. Размер вертикальной камеры при распылении частиц $d_k = 50$ мкм равен 0,21 м, а скорость охлаждения распыленных частиц, которая составляет до начала кристаллизации порядка $7 \cdot 10^4$ К/с, имеет однозначную связь с дендритным параметром [6].

В случае когда $Bi > 0,1$ (для частицы металла $d > 100$ мкм) для приближенного решения задачи о затвердевании шара, обеспечивающего точность в пределах 15-20 %, можно использовать метод Ковнера [7], когда задача линейной скорости кристаллизации каплей отличается граничными условиями и изменяющимися во времени условиями охлаждения.

При этом для расчета скорости кристаллизации принимаем модель, где жидкая частица имеет форму шара, распределение температуры по ее телу до начала кристаллизации равномерное и равное температуре ликвидус, а распреде-

ление температуры в закристаллизовавшейся сферической оболочке – стационарное. На границе этой оболочки с расплавленным ядром ($r = \eta$) температура равна температуре кристаллизации T_k , а на поверхности частицы ($r = R$) теплообмен с газом происходит за счет вынужденной конвекции и излучения.

Решение уравнения теплопроводности в задаче Стефана [8]

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dT}{dr} = 0 \quad (2)$$

с граничными условиями:

$$T_i|_{r=R} = T_r; \quad (3)$$

$$-\lambda \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=R} = \alpha_i \cdot [T_i(R) - T_a] + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_i^4 - T_{\text{но}}^4] \quad (4)$$

имеет вид

$$T_i(R) = T_k - \frac{R^2}{\lambda} \cdot \left\{ \alpha_i \cdot \left(\frac{1}{\eta_i} - \frac{1}{r} \right) \cdot [T_i(R) - T_z] + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_i(R)^4 - T_{cm}^4] \right\}, \quad (5)$$

где T_k – температура кристаллизации; T_z – температура газа; ε – степень черноты; σ – универсальная постоянная Стефана; T_{cm} – температура стенки камеры распыления.

Уравнение (5) описывает распределение температуры по толщине закристаллизовавшейся оболочки в зависимости от радиуса r .

Подставляя уравнение (5) в условие, справедливое на границе раздела «оболочка-расплав»

$$-\lambda \left. \frac{dT_i(r)}{dr} \right|_{r=\eta} = q \cdot \rho \cdot \frac{d\eta_i}{dt} \quad (6)$$

получим дифференциальное уравнение движения фронта кристаллизации:

$$d\eta_i = \frac{R^2}{\eta_i^2 \cdot q \cdot \rho} \cdot \left[\alpha_i \cdot [T_i(R) - T_a] + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_i(R)^4 - T_{\text{но}}^4] \right] dt, \quad (7)$$

где ρ – плотность расплава; q – удельная теплота кристаллизации расплава; t – время.

В уравнении (7) неизвестной величиной является значение температуры поверхности частицы в i -й момент времени $T_i(R)$. Данную температуру определим из условия сохранения теплового потока:

$$\frac{4\pi \cdot \lambda \cdot [T_a - T_i(R)] \cdot \eta_i \cdot R}{\eta_i - R} = 4\pi \cdot R^2 \cdot$$

$$\cdot \alpha_i \cdot [T_i(R) - T_a] + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_i(R)^4 - T_{\text{но}}^4], \quad (8)$$

которое относительно температуры поверхности частиц $T_i(R)$ можно преобразовать в уравнение четвертой степени:

$$T_i(R)^4 + A_i \cdot T_i(R) - B_i = 0, \quad (9)$$

$$\text{где } A_i = \frac{\alpha_i}{\varepsilon \cdot \sigma} + \frac{\eta_i \cdot \lambda}{R(\eta_i - R) \cdot \varepsilon \cdot \sigma}; B_i = T_{cm}^4 + \frac{\alpha_i \cdot T_z}{\varepsilon \cdot \sigma} + \frac{\eta_i \cdot \lambda \cdot T_k}{R(\eta_i - R) \cdot \varepsilon \cdot \sigma}.$$

Решение задач теплообмена до начала кристаллизации и в процессе ее выполняли на примере никеля для условий распыления аргоном [9]. Величину α_i рассчитывали на каждом шаге интегрирования в зависимости от мгновенных значений скорости движения частицы.

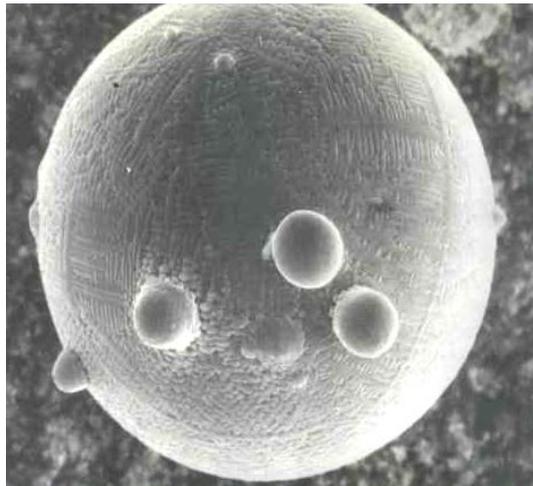
Длина вертикальных координат траекторий, обеспечивающих полную кристаллизацию и скорость охлаждения, для различных размеров частиц с использованием уравнений движения представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Длина траекторий закристаллизовавшихся капель при распылении никелевого расплава аргоном при $T_z = 293$ К и перегреве расплава 100 К

Размер частиц d , 10^{-6} м	100	200	400	800
Длина траектории u , м	0,56	1,45	4,23	10,23
Скорость охлаждения $V_{охл}$, К/с	$2,5 \cdot 10^4$	$8,50 \cdot 10^3$	$3,0 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$

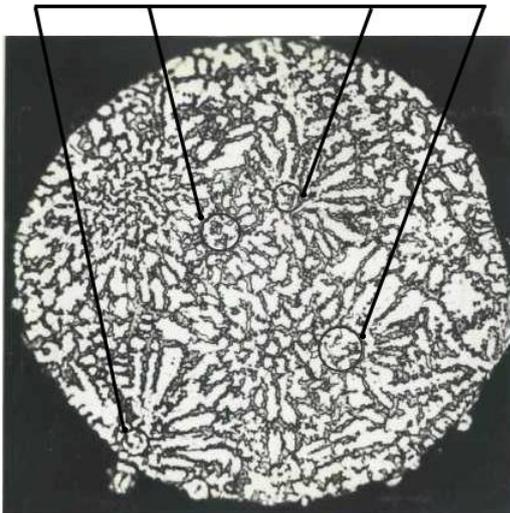
Решение нестационарной задачи Стефана позволяет корректно рассчитать температурные поля в распыленных частицах в любой точке траектории при газовом распылении, а также габариты камеры распыления, обеспечивающие полную кристаллизацию в сравнении с известным подходом, определяющим распыленную каплю как точечный объект.

Обычно гранулы малых размеров не содержат более мелких сателлитов, наплавленных на поверхность. Однако в случае $d_k > 50-150$ мкм на поверхности частицы, как правило, присутствуют столкнувшиеся с ней и «приваренные» сателлиты. «Бомбардировка» крупных частиц сателлитами приводит не только к их налипанию (рис. 1,а), но и проникновению вглубь тела частицы (рис. 1,б).



а

Сателлиты, внедренные в тело крупной частицы



б

Рисунок 1 – Сплав на основе никеля
(фракция -100 +50 мкм)

а) общий вид частицы с сателлитами, x 800;

б) микроструктура частицы с сателлитами, x 920

Мелкие капли охлаждаются быстрее ($V_{охл} = 10^4-10^5$ К/с) и остаются твердыми, не растворяясь в крупных каплях, имеющих температуру $T_{me1} > T_L$, которые быстро охлаждаются ($V_{охл} = 10^3-10^4$ К/с) до $T_{me1} < T_S$. Поэтому мы можем проиллюстрировать развитие нескольких разнообразных процессов кристаллизации (рис. 2).

Поскольку частицы разного размера имеют одинаковый химический состав, то при внедрении сателлитов в объем крупной частицы начинается процесс «внешней» гомогенной кристаллизации (рис. 2,б). После этого, при $T_{me1} < T_L$, начинается также внутренняя гомогенная кристаллизация (рис. 2,г). И этот процесс ни коем случае не стоит путать с не имеющей место в данном случае гетерогенной кристаллизацией

(рис. 2,а), которая имеет место при получении частиц без сателлитов (рис. 2,б).

Таким образом, в расчетах процесса кристаллизации необходимо учитывать явление более быстрого охлаждения за счет внедрения в тело гранулы и прилипания к ее поверхности мелких закристаллизовавшихся сателлитов.

Образование крупных частиц с сателлитами наблюдается в стандартных технологиях газового распыления, например, при использовании форсунок на ПАО «Днепроспецсталь» (Украина), «Веллер» (Австрия), опытных производствах «УкрНИИспецсталь» (Украина), ОАО «Полема», ЗАО «Завод Уралпрокат» (Россия) и др. [1,10].

Процесс образования частиц с сателлитами реализуется за счет:

- более быстрого охлаждения мелких частиц в газовой среде;
- большей скорости движения мелких частиц в газовой среде, что приводит к столкновению при той же скорости газа, при этом частота столкновений с учетом искривления траектории мелких частиц при их приближении к крупным, описывается зависимостью [5]:

$$N_{1,2} = \frac{3}{2} E_{21} \cdot \beta_2 \frac{(d_1 + d_2)^2}{(d_1^3 + d_2^3)} \cdot (V_2 - V_1), \quad (10)$$

где E_{21} – коэффициент осаждения малых частиц на крупную ($E_{21} = 0,7-0,9$); β_2 – объемная концентрация малых частиц; V_1, V_2 – скорости частиц крупной и мелкой фракции; d_1, d_2 – их размеры соответственно.

Расчеты процессов теплообмена при образовании частиц с сателлитами требуют уточнения: такие частицы охлаждаются быстрее, чем крупные частицы, но без сателлитов, поскольку мелкие частицы-сателлиты холоднее. Это приводит к тому, что кристаллизация таких частиц происходит за более короткое время и размер камеры распыления может быть уменьшен.

В таком случае оценку скорости охлаждения расплавов с высокой температурой ликвидус предлагается выполнять по упрощенной методике. Учитывая большую разницу температур расплава и газа скорость охлаждения независимо от температуры слива T_{me} можно рассчитывать из разницы температуры ликвидус T_L и температуры газа T_g . Так, для никелевого сплава с $T_L = 1350$ °С при $T_{me} = 1500$ °С и $T_g = 50$ °С, относительная ошибка определения скорости охлаждения составит 12 %, что вполне приемлемо для практических расчетов.

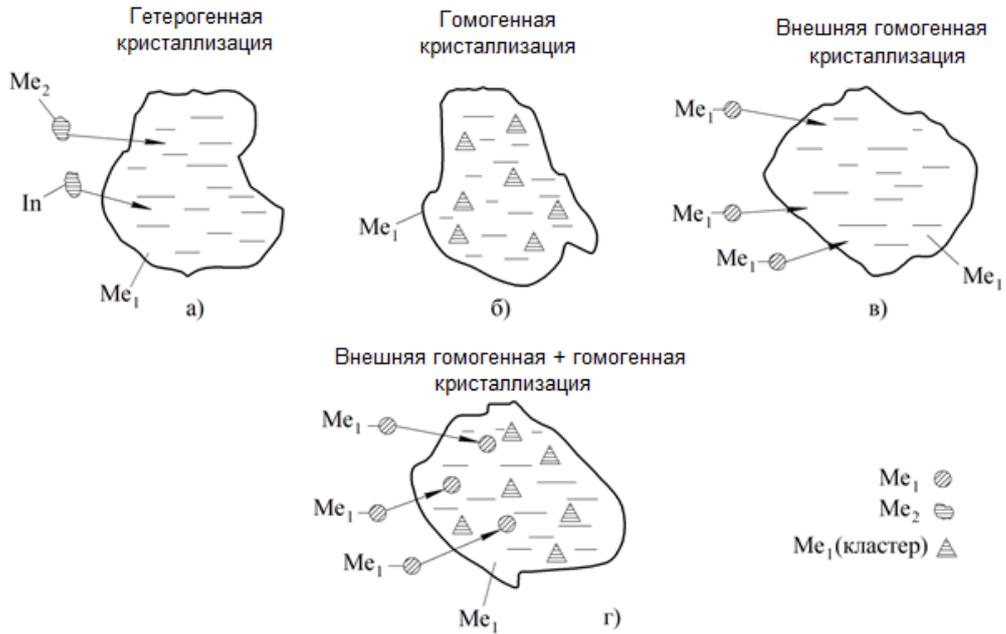


Рисунок 2 – Схема процесса кристаллизации крупной капли с участием сателлитов

Скорость охлаждения определяется по формуле:

$$V_{i\ddot{a}i} = \frac{\dot{O}_{i\ddot{a}1} - \dot{O}_{i\ddot{a}2}}{\Delta\tau} = \alpha \frac{(\dot{O}_{i\ddot{a}1} - \dot{O}_{i\ddot{a}}) \cdot S}{\tilde{n}_{i\ddot{a}} \cdot m_{i\ddot{a}}}, \quad (11)$$

где S – площадь поверхности частицы; m_{me} – масса частицы.

Коэффициент теплоотдачи может быть определен по формуле (2).

Тогда окончательный вид уравнения для скорости охлаждения:

$$V_{i\ddot{a}i} = 6 \left(2 + \frac{0,276 V_{\ddot{a}}^{0,5} \cdot d_{\ddot{a}}^{0,5} \cdot \rho_{\ddot{a}}^{0,5} \cdot \tilde{n}_{\ddot{a}}^{0,3}}{V_{\ddot{a}}^{0,2} \cdot \lambda_{\ddot{a}}^{0,3}} \right) \cdot \frac{\lambda_{\ddot{a}} \cdot (T_L - T_1)}{c_{i\ddot{a}} \cdot \rho_{i\ddot{a}} \cdot d_{\ddot{a}}^2}. \quad (12)$$

Из уравнения (12) видно, что $V_{i\ddot{a}i} \propto 1/d_{\ddot{a}}^{1,5}$.

Наиболее важен корректный выбор скорости газа. Исходя из данных скоростной кинесъемки [5] следует, что достаточно крупные частицы приобретают скорость не выше $0,1 V_2$. Пылевидная фракция ускоряется быстрее, хотя и быстрее теряет тепловую энергию. Ускорение, приобретаемое частицей пропорционально d_v (при $Re > 10^3$). Скорость охлаждения, исходя из формулы (12), пропорциональна выражению $A/d_{\ddot{a}}^2 + B/d_{\ddot{a}}^{1,5}$. Оценка показывает, что если до начала кристаллизации крупная частица ускорила до $0,1 V_2$, то и мелкая для своих усло-

вий ускорила приблизительно на величину порядка V_2 . Отсюда можно полагать, что повышение скорости газа способствует сталкиванию мелких и крупных частиц. Для гранул размером 100-500 мкм в стандартных условиях распыления количество внедрившихся через поверхность мелких частиц составит не менее 10-30 штук, а суммарная масса сателлитов относительно массы основной капли – от 5 до 10 %. Ориентировочные расчеты показывают, что длина вертикальных треков частиц в этом случае уменьшается приблизительно на 10 %, что дает возможность уменьшить габариты камеры распыления.

Выводы. Рассмотрены различные подходы к расчету процесса охлаждения капель при газоструйном распылении расплава. Показано, что для расчета габаритов камеры распыления необходимо учитывать явление образования на поверхности частиц сателлитов и их влияние на процесс кристаллизации частиц диаметром более 100 мкм за счет протекания так называемой «внешней» гомогенной кристаллизации, характерной именно для микрослитков-гранул. Решение задачи позволяет корректно рассчитать треки частиц и размеры при проектировании установок распыления, обеспечивающие полную кристаллизацию сферических частиц различных размеров.

Библиографический список

1. **Терновой Ю. Ф.**, Кудиевский С. С., Пашетнева Н. Н. Инженерные расчеты технологических процессов распыления расплавленных металлов. Запорожье : РИО ЗГИА, 2005. 149 с.
2. **Гессингер Г. Х.** Порошковая металлургия жаропрочных сплавов. Челябинск : Металлургия, 1988. 320 с.
3. **Рудской А. И.**, Соколов Ю. А., Кобаев В. Н. Определение теплофизических свойств материалов для моделирования процесса получения металлических гранул. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Металлургия.* 2014. № 3 (202), С. 170-179.
4. **Дейнеко Л. Н.**, Романова Н. С., Кокашинская Г. В., Ушаков Ю. Н. Теплофизические особенности и методики оценки скоростей охлаждения гранулированных алюминиевых сплавов. *Строительство, материаловедение, машиностроение* : Стародубовские чтения. 2017. С. 73-78.
5. **Ничипоренко О. С.**, Найда Ю. И., Медведовский А. Б. Распыленные металлические порошки, Киев : Наукова думка, 1980. 240 с.
6. **Мирошниченко И. С.** Закалка из жидкого состояния. Москва : Металлургия, 1982. 168 с.
7. **Ковнер С. С.** Условие термического подобия в процессах промерзания и оттаивания. *Известия АН СССР.* 1943. Т. 3. С. 143-149.
8. **Самарский А. А.**, Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. Москва : Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
9. **Терновой Ю. Ф.**, Баглюк Г. А., Кудиевский С. С. Теоретические основы процессов распыления металлических расплавов. Запорожье : РИО ЗГИА, 2008. 298 с.
10. **Газовое распыление** для производства металлических порошков / *Новости порошковой металлургии* № 3, 2008. URL: http://www.netramm.com/news_pm_3 нетрамм распыление газом.pdf (дата звернення 12.11.2019).

Терновий Юрій Федорович, доктор технічних наук завідувач кафедри металургії, Інженерний інститут Запорізького національного університету (Україна, Запоріжжя). E-mail: ferrous.metals@ukr.net

Лічконенко Наталія Володимирівна, старший викладач кафедри металургії, Інженерний інститут Запорізького національного університету (Україна, Запоріжжя). E-mail: nvlickon75@ukr.net

ТЕПЛОФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ОДЕРЖАННІ МІКРОГРАНУЛ ГАЗОВИМ РОЗПИЛОМ

Наведено різні методики розрахунків швидкості охолодження за газовим розпиленням металевих розплавів. Показано, що розрахунок швидкості охолодження під час кристалізації залежить від розміру часточок і присутності сателітів на їх поверхні. Оцінка швидкості охолодження часточок без сателітів або з ними вказує на необхідність урахування та визначення потрібних габаритів камери розпилення.

Ключові слова: газовий розпил, теплообмін, сателіт, швидкості охолодження, мікроструктура, число Біо, спеціальний сплав, розмір капель

Ternovyi Yurii, Doctor of Technical Sciences, Manager of the Department of Metallurgy, Engineering Institute of Zaporizhzhia National University (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: ferrous.metals@ukr.net

Panova Natalii, Senior Teacher of the Department of Metallurgy, Engineering Institute of Zaporizhzhia National University (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: nvlickon75@ukr.net

THERMOPHYSICAL PROCESSES AT RECEIPT OF MICROGRANULS BY GAS DISPERSION

When a liquid metal jet is sprayed with a gas stream, the resulting two-phase gas-liquid and gas-solid systems form a metal-gas torch in which the gas stream interacts with the melt, which essentially determines the size and shape of the particles of the obtained powder. The article analyzes various approaches and methods for calculating cooling rates during gas spraying. It is shown that the calculation of the cooling rate during crystallization depends on the particle size and the presence of satellites on their surface. When solving the unsteady Stefan problem, the temperature fields in the sprayed particles at any point on the trajectory, as well as the dimensions of the spraying chamber, were correctly calculated. The heat transfer problems were solved before crystallization and during crystallization by the example of nickel melt under argon sputtering conditions. So, when spraying particles $d \leq 50 \mu\text{m}$, the thermal energy of the droplet is concentrated at the "geometric point", the size of the vertical chamber is 0.21 m, and the cooling rate of the sprayed particles, which is about 7.104 K/s before crystallization, has a unique relationship with dendritic parameter. In the formation of individual large granules ($d > 100 \mu\text{m}$) with satellites, calculations of heat transfer processes require refinement - such particles are cooled faster than large particles, but without satellites, due to the incorporation of granules of crystallized (colder) satellites into the body of the granule and sticking to its surface total mass of 5-10% relative to the mass of the main drop. In this case, the development of several different crystallization processes takes place. Simultaneously with internal homogeneous crystallization, the

process of external homogeneous crystallization takes place, in which colder solid satellites welded to the surface play the role of crystallization centers. This leads to the fact that the solidification of such particles occurs in a shorter time and the length of the vertical tracks of the particles decreases in this case by about 10%. Thus, the solution of the problem allows one to calculate correctly particle tracks and sizes when designing spraying plants, which ensure full crystallization of spherical particles of different sizes.

Key words: gas dispersion, heat exchange, satellite, cooling speed, microstructure, number Bio, special alloy, size of drops

Стаття надійшла до редакції 04.11.2019 р.
Рецензент, проф. В.О. Скачков