

## Разработка компактной охлаждающей камеры для процессов остывания при производстве металлического порошка

© А.Р. Гайсина

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, 420111, Российская Федерация

*Представлена разработка конденсационной камеры охлаждения металлических порошков, используемых в процессах сфероидизации. В применяемой на практике схеме получения металлических порошков после расплава и распыления металла наступает этап застывания частиц, приобретающих сферическую форму под действием поверхностного натяжения. Для промышленного использования необходим большой поток газопорошковой смеси, поэтому требуются камеры для застывания частиц значительных размеров. В случае применения стандартных охлаждающих камер с плоской верхней частью возможно оседание частиц в их углах. В связи с этим решается задача оптимизации газовой динамики потока в камере для предотвращения его срыва на входе, а также уменьшения скорости движения частиц при сохранении структуры центрального потока. Предложен метод газового торможения потока частиц для малогабаритной камеры, в которой реализуется этот метод газового торможения. Приведены параметры работы системы. Разработана исследованная методом CFD математическая модель движения частиц в камере.*

**Ключевые слова:** конденсационная камера, сфероидизация, микрочастицы, оптимизация, металлический порошок

**Введение.** В настоящей работе рассматривается движение частиц в процессе производства и переработки металлического порошка на завершающей стадии остывания, которой завершается любой из способов его изготовления независимо от используемого для расплавления частиц источника энергии, объемов выпуска продукции и скорости движения [1, 2]. Как правило, ей уделяют меньше внимания, чем процессам перемещения заготовок [2], взаимодействию вещества с лазером [3], плазмой или электрической дугой [3–6]. С учетом скорости остывания частиц, камеру охлаждения делают таких размеров, чтобы ее объема заведомо хватило для полного остывания порошка [7].

Рассмотрим для примера три охлаждающие камеры, представленные на рис. 1. В установке HERMIGA 75/3 компании PSI (рис. 1, а) камера выполнена с плоским верхом и зауженной нижней частью, предназначенной для сбора охлажденных частиц, падающих в сборочный отсек. Подобным образом сконструированы установка EIGA 50 компании ALD Vacuum Technologies (рис. 1, б) и атомизатор компании Raymor (рис. 1, в). Данные компании работают в течение многих

десятилетий, показывая, что избранный ими подход стал общепринятым. Преимущество конструкции с такой компоновкой заключается в простоте изготовления, так как раскроить лист стали и скрепить его болтами проще, чем придавать заготовке большой толщины коническую форму и затем накладывать сварной шов. В качестве недостатка отметим возникновение зон скопления частиц с высокой температурой сразу за входным отверстием. В соответствии с уравнением Навье — Стокса при резком изменении сечения канала в месте подхода входного отверстия к охлаждающей камере скорость и давление снижаются. Частицы начинают сталкиваться между собой и со стенками камеры, что приводит к ухудшению качества порошка. Иными словами, в таких случаях могут происходить механические деформации и агломерация частиц из-за того, что процесс охлаждения частиц остается незавершенным [4]. В связи с этим целесообразно проводить расчет таких камер, имеющих ограниченные размеры.



Рис. 1. Модели охлаждающих камер HERMIGA 75/3 (а), EIGA 50 (б) и атоизатора (в)

Цель данной работы — разработка модификации камеры застывания порошка после расплавления. Поскольку частицы порошка перемещаются в потоке газа, движущегося с довольно высокой скоростью, которая обусловлена требованиями технологического процесса расплава, необходимы камеры большого объема, для того чтобы частицы успевали застыть. Для решения этой проблемы было предложено сократить свободный пробег частицы до застывания, подавая встречный газовый поток. Для подтверждения реализуемости этого подхода требуется решить следующие задачи:

- создать такую конструкцию камеры охлаждения, в которой реализовалось бы газовое торможение;
- выработать механизм защиты входного газопорошкового потока, обеспечивающий сглаживание эффекта резкого падения давления и скорости в зоне входного отверстия;

- определить необходимую расчетную область для камеры охлаждения;
- сформулировать математическую модель с учетом исходных данных, принятых законов и установленных ограничений;
- исследовать созданную конструкцию методом вычислительной гидродинамики (CFD);
- оптимизировать полученный способ, подбирая наиболее целесообразный режим работы камеры охлаждения.

**Конструкция камеры охлаждения.** При расчете конструкции камеры охлаждения наряду с выбором исходных данных необходимо принять некоторые ограничения. Поскольку поставлена задача решить не теоретическую, а реальную производственную проблему, для изготовления частиц следует выбрать различные сплавы железа, меди, алюминия и титана [1, 2, 5, 6], так как, в частности, алюминий имеет  $T_{\text{плав}} = 933,5$  К, сплав 316L —  $T_{\text{плав}} = 1713$  К, ВТ20 —  $T_{\text{плав}} = 1943$  К [4]. Такое ограничение обусловлено разными температурами плавления металлов. Например, из материалов, имеющих температуру плавления ниже, чем у алюминия, металлический порошок почти не производят, потому что их редко применяют в металлургической промышленности и аддитивном производстве [3]. Если температура плавления исходного материала выше, чем у титана и стали, требуется использовать другие системы [8]. Следовательно, указанные выше сплавы могут служить основой для изготовления большинства металлических порошков [9, 10].

Кроме того, дополнительным ограничением является количество частиц, поступающих в камеру в единицу времени [9].

Исследования показали, что при проходе большого количества частиц в аналогично функционирующей конструкции их распределение характеризуется как близкое к нормальному, которое и желают получить в экспериментах. Использование атомизаторов EIGA и VIGA также демонстрирует подобную статистику. При этом выход готового продукта, т. е. частиц порошка, который можно считать допустимым по сферичности, доходит в лучшем случае до 80 % [3–5].

Рабочей гипотезой для более общей разработки, в состав которой входит представленное исследование, является уменьшение количества частиц, вводимых для расплавления. Следовательно, в камеру охлаждения частицы будут входить разреженным потоком, т. е. в данном случае делается попытка разнести частицы пространственно и по времени во избежание их столкновения. Однако лабораторные эксперименты должны, естественно, приводить к внедрению в промышленность, а значит, производительность необходимо повышать. Поэтому следует принимать решение о создании нескольких десятков таких охлаждающих камер. С учетом конструкторских расчетов, а также исходя из приведенных предпосылок, требуется создавать камеру диаметром

и высотой не более 25 мм, а ее входное отверстие делать диаметром не менее 5 мм, чтобы избежать столкновения расплавленной частицы с поверхностью входного канала, размер которого увеличить невозможно. Это приводит к тому, что для сохранения пространственного и временного разнесения частиц их поток не превысит 10 частиц в секунду.

Несущий газовый поток аргона движется со скоростью 1 м/с. Основная идея построения базовой конструкции — создание такой области в центре камеры, где частица почти полностью остановится. Из нескольких начальных вариантов модификации классической охлаждающей камеры наиболее удачной признан следующий: плавное расширение свода, что само по себе, в соответствии с уравнением неразрывности, снизит скорость потока. Следует отметить, что классические камеры охлаждения представляют собой вариации цилиндра и даже параллелепипеда. Кроме того, необходимо спроектировать камеру охлаждения такой конструкции, которая позволила бы остановить поток, не приводя к тому, чтобы частицы разлетались в вихрях. Например, конструкция осесимметричной камеры охлаждения, приведенная на рис. 2, имеет плавный свод в начале и конце. Создание тормозящей зоны обеспечивают два сопла 1, центральные линии которых пересекаются в верхней трети камеры. Для того чтобы поток с частицами не расходился в стороны, установлены еще два сопла 2 для стабилизации движения центрального сопла.

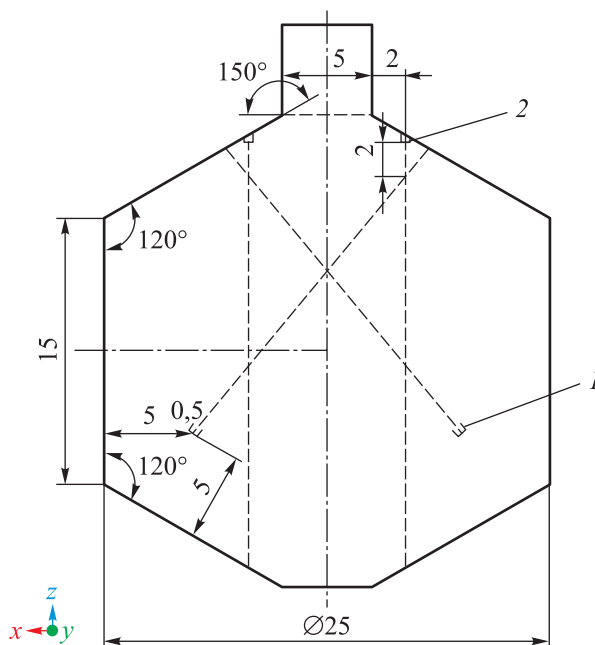


Рис. 2. Схема конструкции камеры охлаждения порошка, имеющей плавные своды

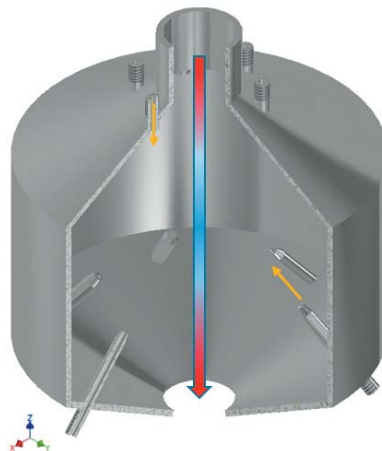


Рис. 3. Схема охлаждающей камеры с тормозящим и ограничивающим потоками

Трехмерная модель данной камеры приведена на рис. 3, где показано, как поток с высокой скоростью (красным цветом) тормозится (синим цветом) ближе к середине и далее, ускоряясь, выходит из камеры. Направления тормозящего и ограничивающего потоков указаны желтым цветом.

**Расчетная область и математическая модель.** Полученное решение необходимо исследовать с помощью метода вычислительной гидродинамики. Исходя из разработанной конструкции, был создан проект объема материала, подлежащего вычислению. Размеры расчетной области приведены на рис. 4.

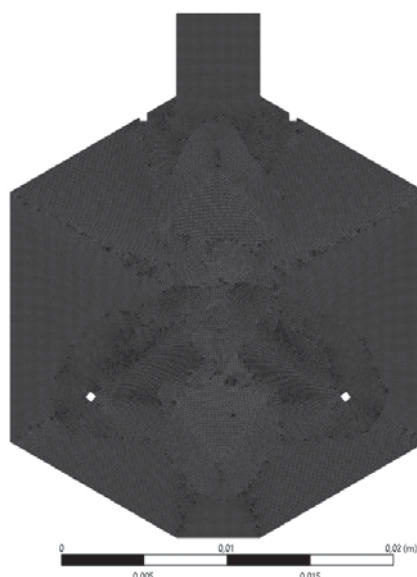


Рис. 4. Расчетная область охлаждающей камеры

Геометрические размеры элементов расчетной области были подобраны итерационным методом. В приведенной сетке, имеющей квадратичный порядок, вершин — 173 341, элементов — 57484, размер ребра элемента —  $1^{-4}$  м. Для исследования методом CFD использовались следующие уравнения:

- переноса теплоты

$$\rho(T)c_p(T)\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T\right) = \nabla k(T)\nabla T + Q, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность материала в зависимости от температуры, кг/м<sup>3</sup>;  $T$  — поле температуры, К;  $c_p$  — удельная теплоемкость вещества в зависящая от температуры, Дж/(кг·К);  $\vec{u}$  — векторное поле скорости, м/с;  $\nabla$  — оператор Набла;  $k$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $Q$  — объемный источник тепла, Дж;

- сохранения массы (должны быть включены в систему уравнений совместно с (1) для учета поля течения):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{u}) = 0, \quad (2)$$

$$\rho\left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + (\vec{u}\nabla)\vec{u}\right) = -\nabla p + \mu\nabla^2\vec{u} + \vec{f}, \quad (3)$$

где  $p$  — давление, Н/м<sup>2</sup>;  $\mu$  — динамическая вязкость, Н·с/м<sup>2</sup>;  $\vec{f}$  — массовые силы, Н/кг.

**Моделирование газовых потоков в камере охлаждения.** Скорости входных потоков форсунок — параметры для варьирования расчетов в данной модели. При скорости центрального входного потока, равной 1 м/с, были получены результаты для скоростей форсунок, равных 2 м/с (рис. 5, а) и 10 м/с (рис. 5, б). При разнице потоков в 2 раза центральный поток практически не замедлялся, что было вызвано недостаточностью расхода тормозящих форсунок. Следует также отметить, что ограничивающие форсунки не справляются с этим, из-за чего центральный поток искажается. В случае больших расходов наблюдается крайне нестабильная картина — возникает множество вихрей. В таких условиях велика вероятность того, что частицы столкнутся с поверхностью камеры, а это недопустимо. Исходя из предварительных решений, данные расчеты были взяты как границы для получения оптимального результата.

Следующим шагом стало проведение серии экспериментов по дальнейшему варьированию скоростей форсунок в определенном ранее диапазоне. Потоки со скоростью 2, 3, 4 и 5 м/с были поданы на форсунки и были рассчитаны картины газовой динамики.

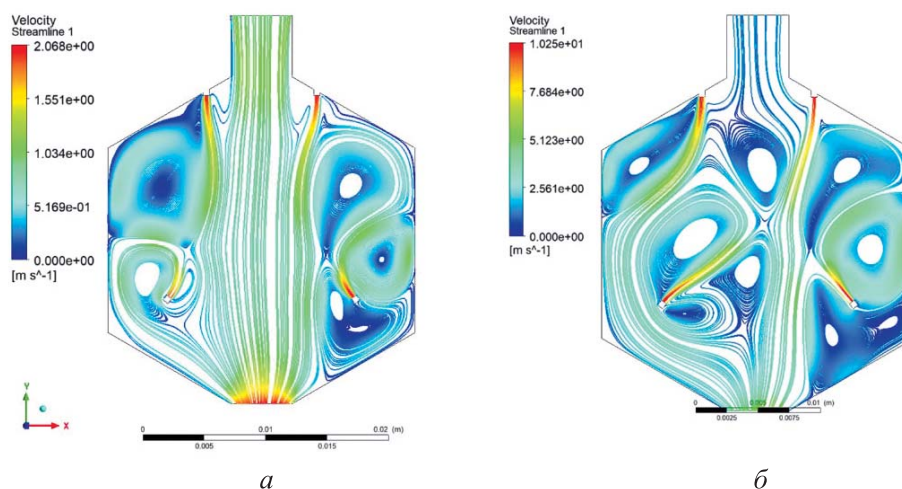


Рис. 5. Скорости в камере охлаждения при входном потоке 1 м/с и скорости на форсунках 2 м/с (а) и 10 м/с (б)

При скорости входного потока 1 м/с и 2 м/с (рис. 6, а) на форсунках не обеспечивалось торможение центрального потока — он искривлялся, а тормозящих форсунок не хватало, для того чтобы остановить его. Скорость на форсунках, равная 3 м/с, еще не обеспечивала достаточной стабильности потоков и торможения частиц в центре камеры (рис. 6, б), однако при значении 4 м/с на форсунках (рис. 6, в) достигался результат, максимально приближающийся к требуемому.

Исследования показали, что, начиная от скорости на форсунках 5 м/с включительно (рис. 6, г), возникает ситуация, когда верхние ограничивающие форсунки излишне усиливают взаимодействие с нижними тормозящими. Исходя из начальных условий, пространственно удалить их сильнее невозможно, поэтому было принято, что дальнейшее увеличение скорости приведет к совсем нестабильной картине. Это можно предположить, проанализировав изображения на рис. 5, г и рис. 6, г и экстраполировав на большие расходы порошка. Предположим, что при расходах порошка в потоках со скоростью от 4 м/с в большей части объема сохраняются условия для ламинарного течения газа.

Необходимо попытаться улучшить полученное решение путем раздельного изменения скоростей на верхних и нижних форсунках. Так, эффект торможения был достигнут, а стабильность центрального потока можно дополнительно оптимизировать путем изменения скорости на верхних форсунках. Для этого варьировали поток на верхних форсунках при скоростях 2, 3 и 4 м/с (рис. 7).

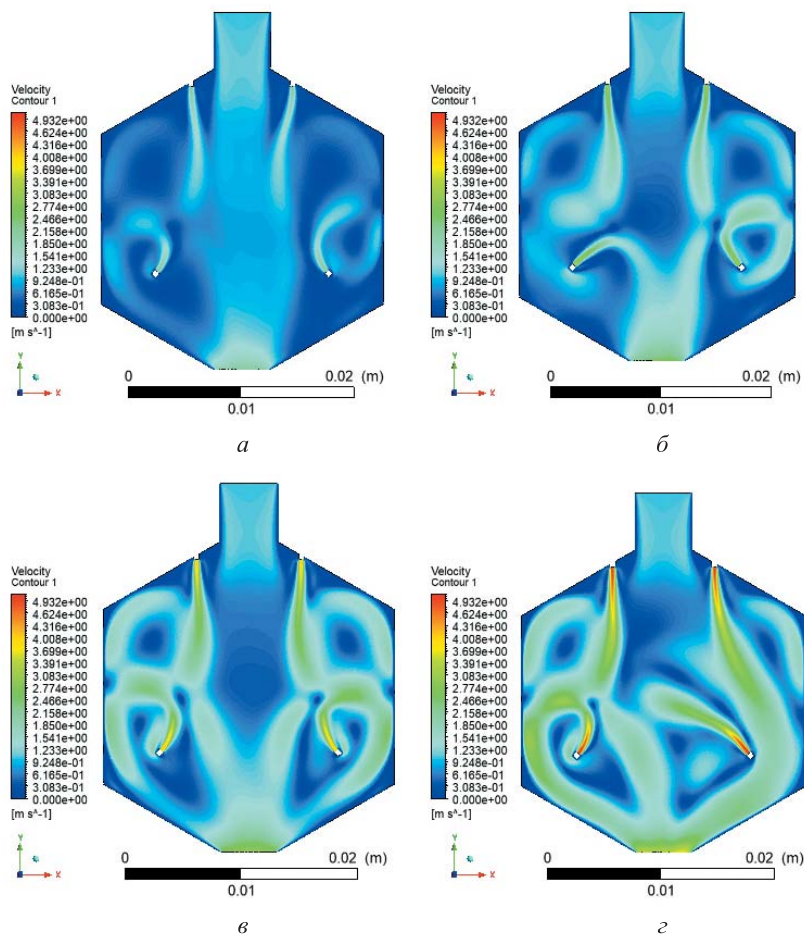


Рис. 6. Скорости в камере охлаждения при скорости входного потока 1 м/с и скорости на форсунках 2 м/с (*a*), 3 м/с (*б*), 4 м/с (*в*), 5 м/с (*г*)

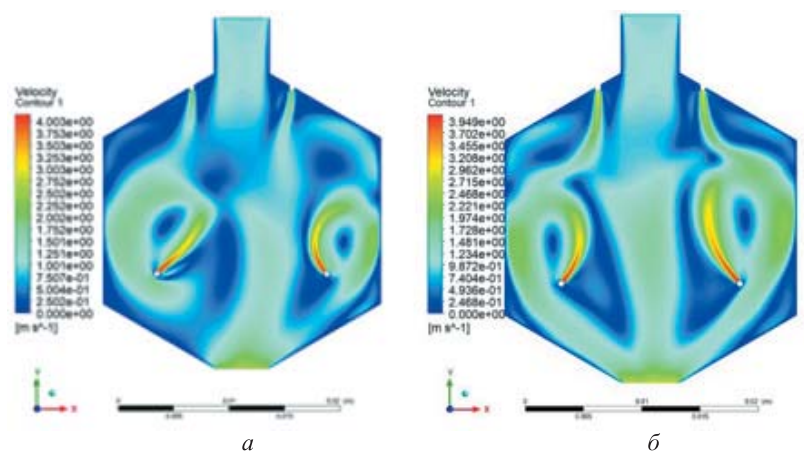
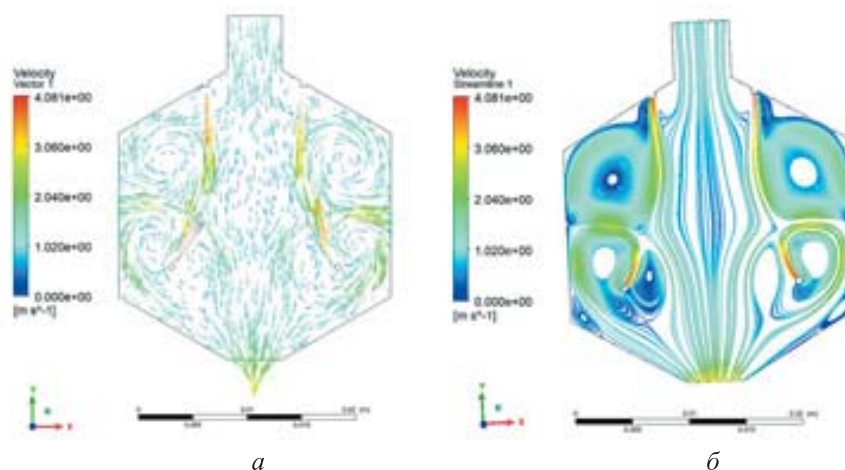


Рис. 7. Скорости в камере охлаждения при скорости входного потока 1 м/с, скорости на нижних форсунках 4 м/с и на верхних форсунках 2 м/с (*a*) и 3 м/с (*б*)



**Результаты расчета.** Полученные расчеты показывают, что изменение скорости на верхних форсунках приводит к дестабилизации картины скоростей. Согласно полученным данным, скорость 4 м/с является оптимальной для представленной установки.

Рассмотрим конструктивное решение камеры охлаждения, представленное на рис. 8, более подробно. Приведенные в векторном виде скорости позволяют сделать вывод, что потоки из верхних форсунок имеют ожидаемо большую скорость и служат защитой центрального входного потока, что в стандартных конфигурациях обеспечивается введением потока по трубке. Однако использование такого классического метода может привести к срыву потока и возникновению обратных течений, увлекающих поток с частицами в турбулентные зоны, где они и оседают в верхних углах камеры. Это явно демонстрирует, что предложенные схемы ввода как конструктивное решение помогут справиться с проблемой скопления частиц.



**Рис. 8.** Схема камеры охлаждения, в которой отображены скорости входного потока 1 м/с, скорости на нижних и верхних форсунках — по 4 м/с:  
*а* — в векторном виде; *б* — линиями тока

На рис. 8 видно, что центральный поток — ламинарный, он входит в камеру и останавливается в ее центре. Диаметр этого потока достаточно большой, т. е. почти весь объем проходящего газа с частицами будет тормозиться в этой области, не смешиваясь с защитными и тормозящим потоками, что и было одной из основных задач проведенного исследования.

Следует отметить, что немаловажную роль играет и выбор формы охлаждающей камеры. Она выполнена в виде цилиндра, верхняя и нижняя части которого сужаются. Численное моделирование показывает, как выработанная схема движения потоков пропорционально соответствует конструкции камеры, в которой при наличии углов

наверняка возникли бы неоднородности вследствие скопления частиц. Скорее всего, приведенное техническое решение будет реализовано, и результаты, полученные экспериментально, можно будет сравнить с выполненными численными исследованиями.

**Заключение.** В ходе решения поставленной задачи о построении компактной охладительной камеры, где свободный пробег частиц укорочен благодаря созданию встречных замедляющих потоков, был определен подход, наиболее эффективный с точки зрения снижения скорости центрального потока. Это было достигнуто с помощью схемы с применением защитных потоков, расположенных вдоль основного входящего потока транспортного газа с частицами, который сталкивается со встречными потоками не фронтально, а под углом, что приведено на схеме, представленной на рис. 3. Как показало численное моделирование, такая схема не приводит к разрушению центрального потока. При этом подобранные режимы для расхода газа как основного потока (1 м/с), так и защитного со встречными потоками (4 м/с) обеспечивают наиболее стабильную картину с точки зрения минимизации вихрей, с одной стороны, и замедления скорости центрального потока до нуля — с другой.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Terekhov S. Thermophysical properties of metals in quasi-two-phase model. *Physics of Metals and Metallography*, 2024, no. 124, pp. 1293–1302. DOI: 10.1134/S0031918X23602196
- [2] He Yahua, You Jing, Dickey Michael, Wang Xiaolin. Controllable flow and manipulation of liquid metals. *Advanced Functional Materials*, 2023. DOI:10.1002/adfm.202309614
- [3] Ortega-Jimenez C., Andino G., Segura W., Andino G., Pavón C., Valladares S., Donaire H., Flores L., Padilla C. Systematic review of powder metallurgy: current overview of manufactured materials and challenges for future research. *Materials Science Forum*, 2020, no. 1015, pp. 36–42. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1015.36
- [4] Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. *Аддитивные технологии в машиностроении*. Москва, ГИЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015.
- [5] Bissett H., van der Walt I.J., Havenga J.L., Nel J.T. Titanium and zirconium metal powder spheroidization by thermal plasma processes. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, October 2015, vol. 5, pp. 937–942.
- [6] Vert R., Pontone R., Dolbec R., Dionne L., Boulos M.I. Induction plasma technology applied to powder manufacturing: example of titanium-based materials. In: *22nd International Symposium on Plasma Chemistry*, July 5–10, 2015. Antwerp., Belgium, P-II-7-32.
- [7] Hossein Sehhat M., Ming C. Leu. Numerical study and experimental validation of copper powder plasma spheroidization process. 26 June 2023, *Research Square*. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3085172/v1
- [8] Li Yan, Song Mei, Zhang Yu, Li Yan, Zhang Xiao. Preparation of GH3536 spherical powder for additive manufacturing by plasma spheroidization. *Materials Science Forum*, 2022, vol. 1058, pp. 141–147. DOI: 10.4028/p-4zi20s

- [9] Nkhasi Nthateng, du Preez Willie, Bissett Hertzog. Plasma spheroidisation and characterisation of commercial titanium grade 5 powder for use in metal additive manufacturing. In: *MATEC Web of Conferences*, 2023, paper 388.  
DOI: 10.1051/mateconf/202338803004
- [10] Boulos M., Fauchais P., Pfender E. Plasma-particle momentum. *Heat and Mass Transfer*, 2023. DOI: 10.1007/978-3-030-84936-8\_29

Статья поступила в редакцию 22.04.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Гайсина А.Р. Разработка компактной охлаждающей камеры для процессов остывания при производстве металлического порошка. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 6. EDN TZMFPP

**Гайсина Айгуль Райхановна** — аспирант кафедры «Лазерных и аддитивных технологий», старший преподаватель кафедры «Лазерных и аддитивных технологий» КНИТУ им. А.Н. Туполева – КАИ. e-mail: AigulKazanStar@gmail.com

## Development of a compact cooling chamber for solidification processes in the metal powder production

© A.R. Gaisina

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,  
Kazan, 420111, Russian Federation

*The paper considers a problem in developing a condensation chamber for cooling the metal powders used in the spheroidization processes. It shows that in the practically used scheme for obtaining the metal powders after metal melting and its atomization the particles are solidifying and taking a spherical shape exposed to the surface tension. Industrial version requires a large flow of the gas-powder mixture, which is determined by significant geometric dimensions of the chamber itself in the particles' solidification. Besides, a problem also appears of the particles sedimentation in the corners when using the standard flat top coolers. The paper aims at optimizing the gas dynamics flow in a chamber preventing a flow stall at the inlet and reducing the particles motion speed with maintaining the central flow structure. The research special feature lies in the proposed method of gas deceleration of the particle flow at the chamber miniaturized geometric dimensions. The paper identifies a device design that implements the gas braking method and studies the system operation parameters. Mathematical model of the particles motion in a chamber was developed. The model was studied using the CFD method.*

**Keywords:** spheroidization, microparticles, optimization

### REFERENCES

- [1] Terekhov S. Thermophysical Properties of Metals in Quasi-Two-Phase Model. *Physics of Metals and Metallography*, 2024, no. 124, pp. 1293–1302. <https://doi.org/10.1134/S0031918X23602196>
- [2] He Yahua, You Jing, Dickey Michael, Wang Xiaolin. Controllable Flow and Manipulation of Liquid Metals. *Advanced Functional Materials*, 2023. <https://doi.org/10.1002/adfm.202309614>
- [3] Ortega-Jimenez C., Andino G., Segura W., Andino G., Pavón C., Valladares S., Donaire H., Flores L., Padilla C. Systematic Review of Powder Metallurgy: Current Overview of Manufactured Materials and Challenges for Future Research. *Materials Science Forum*, 2020, no. 1015, pp. 36–42. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1015.36>
- [4] Zlenko M.A., Nagaytsev M.V., Dovbysh V.M. *Additivnyye tekhnologii v mashinostroenii* [Additive technologies in mechanical engineering]. Moscow, GNTs RF FGUP “NAMI” Publ., 2015.
- [5] Bissett H., van der Walt I.J., Havenga J.L., Nel J.T. Titanium and zirconium metal powder spheroidization by thermal plasma processes. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, October 2015, vol. 5, pp. 937–942.
- [6] Vert R., Pontone R., Dolbec R., Dionne L., Boulos M.I. Induction plasma technology applied to powder manufacturing: example of titanium-based materials. In: *22nd International Symposium on Plasma Chemistry*, July 5–10, 2015, Antwerp., Belgium, pp.-II-7-32.
- [7] Hossein M. Sehhat, Ming C. Leu. Numerical study and experimental validation of copper powder plasma spheroidization process. 26 June 2023, *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3085172/v1>

- [8] Li Yan, Song Mei, Zhang Yu, Li Yan, Zhang Xiao. Preparation of GH3536 Spherical Powder for Additive Manufacturing by Plasma Spheroidization. *Materials Science Forum*, 2022, no. 1058, pp. 141–147. <https://doi.org/10.4028/p-4zi20s>
- [9] Nkhasi N., du Preez W., Bissett H. Plasma spheroidisation and characterisation of commercial titanium grade 5 powder for use in metal additive manufacturing. In: *MATEC Web of Conferences*, 2023, paper 388. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202338803004>
- [10] Boulos M., Fauchais P., Pfender E. Plasma-Particle Momentum. *Heat and Mass Transfer*, 2023. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-84936-8\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-030-84936-8_29)

**Gaisina A.R.**, Postgraduate, Associate Professor, Department of Laser and Additive Technologies, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI. e-mail: AigulKazanStar@gmail.com