

УДК 004.415.25

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.30.3.019](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.30.3.019)

Разработка программного комплекса для оптимизации параметров синтеза нанопорошков металлов

И.В. Чепкасов, И.С. Замулин, В.С. Байдышев

*Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова,
Абакан, Россия*

Резюме: В данной работе было проведено моделирование методом молекулярной динамики в программном пакете LAMMPS получения наночастиц металлов (Cu, Au, Ni, Al) из газовой фазы при различных параметрах синтеза, с детальным исследованием влияния температуры и скорости охлаждения на форму, размер и морфологию наночастиц. На основе полученных данных был разработан алгоритм, на основе которого был создан программный комплекс для оптимизации параметров синтеза наночастиц металлов. Для реализации алгоритма в качестве основного был выбран язык программирования C++. Полученные в ходе молекулярно-динамических моделирований эффективные физические величины, параметры моделей, подгоночные коэффициенты, не включены в исходный код программ, а реализованы в виде подключаемых баз данных, которые в дальнейшем можно будет дополнять новыми наборами металлов и их сплавов или уточнять для уже представленных. При помощи этого программного комплекса станет возможным определять требуемые условия установки синтеза (температурный режим, время охлаждения, состав и концентрация паров металла) для получения наночастиц с заданными параметрами (тип частиц, их распределение по размеру, соотношение компонентов в частице).

Ключевые слова: алгоритм, программный продукт, компьютерное моделирование, конденсация, молекулярная динамика.

Для цитирования: Чепкасов И.В., Замулин И.С., Байдышев В.С. Разработка программного комплекса для оптимизации параметров синтеза нанопорошков металлов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(3). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/ChepkasovSoavtors_3_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.019

Development of a software complex for optimization of synthesis parameters of metal nanopowder

I.V. Chepkasov, I.S. Zamulin, V.S. Baidyshev

Katanov Khakas State University, Abakan, Russian Federation

Abstract: In this work, we carried out molecular dynamics modeling in the LAMMPS software package for obtaining metal nanoparticles (Cu, Au, Ni, Al) from the gas phase at various synthesis parameters, with a detailed study of the effect of temperature and cooling rate on the shape, size and morphology of nanoparticles. Based on the data obtained, an algorithm was developed, on the basis of which a software package was created to optimize the parameters of the synthesis of metal nanoparticles. To implement the algorithm, the C++ programming language was chosen as the main one. The effective physical quantities, model parameters, fitting coefficients obtained in the course of molecular dynamics simulations are not included in the source code of the programs, but are implemented in the form of plug-in databases, which can later be supplemented with new sets of metals and their alloys or refined for those already presented. With the help of this software package, it will be possible to determine the required conditions for the synthesis plant (temperature regime, cooling time, composition and concentration of metal vapors) to obtain nanoparticles with specified parameters (type of particles, their size distribution, ratio of components in a particle).

Keywords: algorithm, software, computer simulation, condensation, molecular dynamics.

For citation: Chepkasov I.V., Zamulin I.S., Baidyshev V.S. Development of a software complex for optimization of synthesis parameters of metal nanopowder. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(3). Available from: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/ChepkasovSoavtors_3_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.019 (In Russ).

Введение

Разработка технологии синтеза наночастиц в большом количестве с возможностью эффективно управлять формой, размером и морфологией частиц является важной задачей. Существующие методики получения часто сталкиваются с длительным периодом настройки производственного процесса, и нахождением оптимальных параметров синтеза. В частности, из наиболее приемлемых подходов с точки зрения затрат и объема производства является синтез из газофазной среды. Для его успешного применения, и получения наночастиц нужного размера и морфологии нужна точная информация о параметрах синтеза, которую трудоемко получить экспериментально в связи с необходимостью проведения множества тестовых запусков системы конденсации.

Методы компьютерного моделирования позволяют детально рассматривать процессы происходящие при газофазном синтезе наночастиц и успешно применяются для изучения подобных систем [1, 2]. Авторы в работе [3] для моделирования гомогенного зарождения металлических наночастиц из газовой фазы разработали кинетическую модель Монте-Карло. Авторами было показано, что увеличение начальной температуры газа атомов металла приводит к значительному ускорению нуклеации с увеличением размера критических кластеров. Однако данный метод ограничен способностью отображать детализированную атомистическую картину процесса. Учет полной динамики частиц реализован в методе молекулярной динамики, которой активно применяется при моделировании образования наночастиц в процессах нуклеации и конденсации.

При проведении молекулярно-динамического моделирования приходится учитывать множество параметров, и использовать межатомные потенциалы, которые позволяют оценивать взаимодействия атома до пятой координационной сферы включительно, и это несомненно замедляет процесс расчета. Проведение подобного моделирования требует достаточно больших ресурсов даже с использованием технологий параллельных вычислений реализуемых на многопроцессорных кластерах.

Идея данной работы состоит в создании программного продукта, который основываясь на многочисленных компьютерных моделированиях синтеза наночастиц, будет способен предсказывать вид синтезируемых частиц, при введении в программный комплекс лишь начальных параметров системы синтеза. Для этого в данной работе выявлены основные закономерности роста наночастиц (Cu, Au, Ni, Al) при синтезе методом конденсации из начальной газовой фазы. Полученный набор параметров использовался для создания алгоритма, позволяющего спрогнозировать выходные параметры синтезируемых наночастицы. В данный момент аналогов такого программного продукта, который бы без проведения масштабного компьютерного моделирования давал подобную информацию, нам не известно. Данный программный продукт может быть полезен при внедрении или отладке процесса производства новых типов наночастиц методом конденсации из газовой фазы в различных научно-производственных лабораториях и предприятиях.

Материалы и методы

Моделирование процессов конденсации наночастиц металлов (Cu, Au, Ni, Al) было проведено методом классической молекулярной динамики в программном пакете LAMMPS [4]. В начальный момент система представляла собой смесь паров атомов металла и буферного газа Ar. Взаимодействие между атомами металла описывалось многочастичными EAM-потенциалами [5], широко используемыми в компьютерном исследовании металлических фаз, в том числе для моделирования свойств наноматериалов [6, 7]. Численное интегрирование уравнений движения реализовывалось с использованием алгоритма Верлета с временным шагом 2 фс. В процессе движения атомов системы происходят случайные столкновения, которые при определенных условиях могут приводить к образованию “связанных” атомов димеров, тримеров и более крупных кластерных зародышей. В процессе таких столкновений выделяется энергию сублимации. Механизм отвода данной энергии реализован через столкновения с атомами буферного газа, температура которого поддерживается постоянной на всем процессе моделирования. В качестве буферного газа выбран Ar, так как он часто используется в экспериментальных установках. Для описания взаимодействия буферного газа с атомами металла был выбран классический парный потенциал Леннарда-Джонса с параметрами $\epsilon=0.0123$ eV, $\sigma = 3.76$ Å. Данное предположение вполне корректно, так как буферный газ не вступает в химическую связь с атомами металла. Концентрация атомов буферного газа соответствовала концентрации атомов металла, общее количество атомов в системе составляло 170000.

Результаты исследований и обсуждение

Моделирование конденсации наночастиц Cu, Au, Ni, Al проводилось с тремя различными скоростями охлаждения $U = 2 \cdot 10^{11}$ K/c, $U = 4 \cdot 10^{11}$ K/c и $U = 20$ K/c. Выбор нескольких скоростей обусловлен тем, что скорость охлаждения имеет решающее значение при синтезе наночастиц и важно понять механизм влияния этого параметра. В качестве значений конечных температур охлаждения были выбраны температура жидкого азота $T = 77$ K и температура кипения воды $T=373$ K. Выбор температур охлаждения объясняется тем, что в экспериментальных установках по синтезу нанопорошков металлов используют в качестве охлаждающей жидкости азот и воду. Время моделирования процессов конденсации атомов металла из газовой фазы в фазу отдельных нанокристаллических частиц составляло порядка 20 нс. Выбранный промежуток времени позволял полностью завершиться основным процессам структурообразования наночастиц. На рисунке 1 представлены примеры наночастиц меди полученные в результате моделирования и электронно-микроскопические изображения реально синтезированных наночастиц меди. Хорошо видно, что морфология данных наночастиц схожа, что говорит о хорошем согласии используемых нами методов компьютерного моделирования с экспериментальными данными.

Для каждого рассматриваемого металла (Cu, Au, Ni, Al) было проведено моделирование процесса конденсации атомов металла из газовой фазы с шестью различными начальными условиями, были рассмотрены три скорости охлаждения и две конечные температуры. На последнем этапе моделирования был проведен подробный анализ имитируемых систем, с целью, установления взаимосвязи изменяемых параметров системы на количество, конечную структуру и форму получаемых частиц. В таблицах 1-4 обобщенные полученные результаты моделирования.

Анализ полученных результатов показал, что количества частиц, средний размер и форма получаемых наночастиц коррелируют со скоростью охлаждения системы и

данный параметр является определяющим параметром при условии неизменного начального числа атомов в системе.

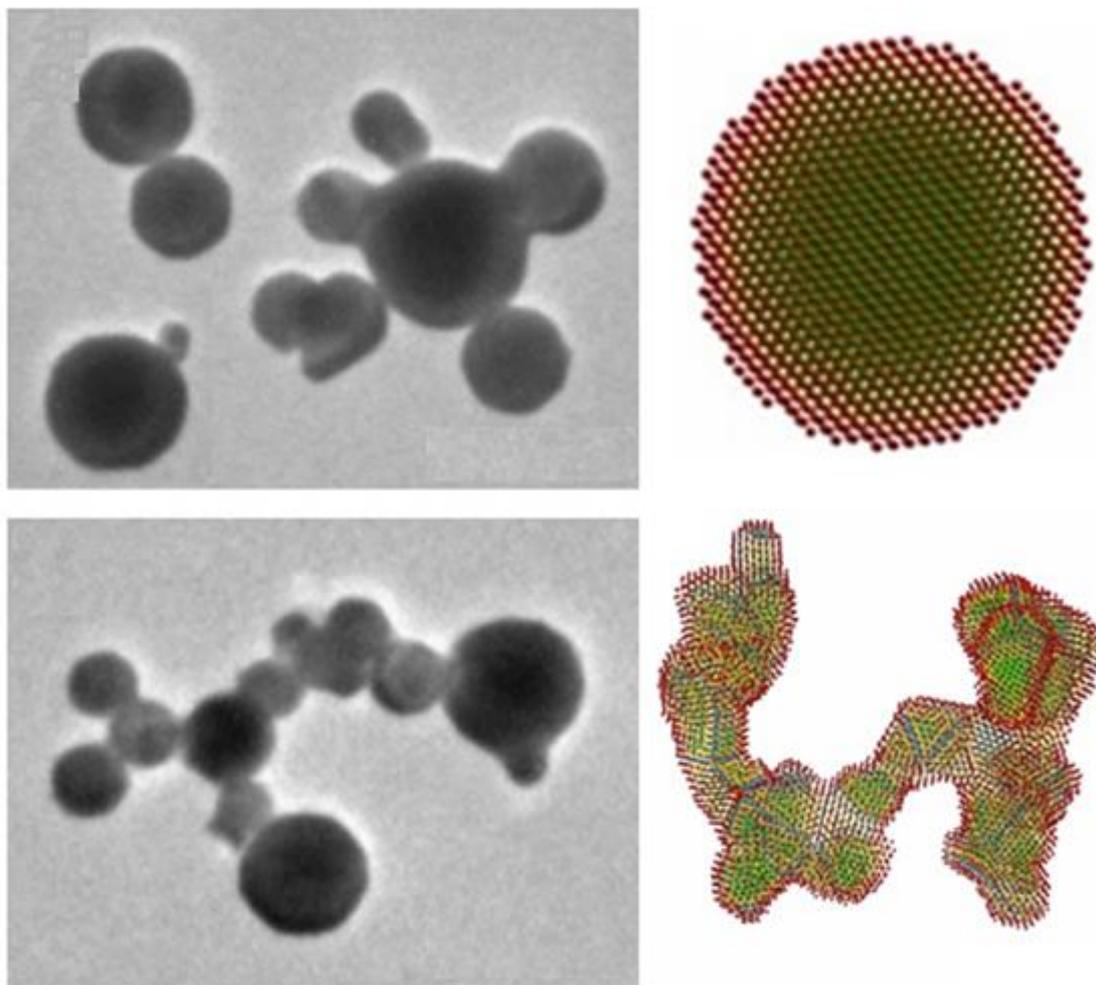


Рисунок 1 – ТЕМ-изображение наночастиц Cu синтезированных на экспериментально-промышленной установке в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН г. Новосибирск (слева). Пример наночастиц полученных в результате компьютерного моделирования синтеза наночастиц из газовой фазы (справа).
Figure 1 – TEM image of Cu nanoparticles synthesized on an experimental industrial setup at the Institute of Theoretical and Applied Mechanics named after S.A. Khristianovich SB RAS Novosibirsk (left). An example of nanoparticles obtained as a result of computer simulation of the synthesis of nanoparticles from the gas phase (right).

Например, для наночастиц меди уменьшении скорости охлаждения в 10 раз способствовало сокращению количества получаемых частиц в 2,7 и 3,1 раза при конечных температурах 77 К и 373 К соответственно (таблица 1). Кроме того, более низкие температуры охлаждения способствовали формированию большего числа частиц. Для системы содержащей медь данное отношение составляло $2,6 \pm 0,2$. В системе с конечной температурой 373 К наблюдалось формирование частиц меди с цепочечной формой, таким образом более высокие температуры конденсации являются наиболее благоприятными условиями для получения частиц данного типа. Получение подобных цепочечных наночастиц представляет большой интерес, так как такие частицы активно используются при гетерогенном катализе. Более подробно о

результатах моделирования конденсации наночастиц меди представлено в нашей более ранней работе[8].

Таблица 1 – Структура и форма нанокластеров Cu синтезированных из газовой фазы
Table 1 – Structure and shape of Cu nanoclusters synthesized from the gas phase

U, 10 ¹¹ К/с)	T _f , К	Среднее число атомов	Структура				Форма	
			ГЦК (ГПУ)	Ih	Dh	Аморфная	Цепочечная	Сферичная
2	77	1847	22,02%	45,83%	20,87%	11,28%	76,08%	23,92%
4	77	2428	22,51%	41,93%	30,02%	5,54%	74,28%	25,72%
20	77	5000	23,59%	26,82%	49,59%	0%	58,83%	41,17%
2	373	4473	22,57%	31,38%	46,05%	0%	89,47%	10,53%
4	373	6538	29,43%	30,07%	40,5%	0%	84,61%	15,39%
20	373	14166	38,33%	26,67%	35%	0%	83,34%	16,66%

В отличие от наночастиц меди, при конденсации наночастиц золота наблюдается примерно на 20 % большее количество кластеров с икосаэдрической структурой (таблица 2). Данный факт хорошо согласуется с ранее проведенными исследованиями по структурообразованию в малых частицах золота [9, 10]. Также размер синтезируемых наночастиц золота примерно в 2 раза меньше наночастиц Cu, и наночастицы золота более склонны к формированию сферической формы (более 50%).

Таблица 2 – Структура и форма нанокластеров Au синтезированных из газовой фазы
Table 2 – Structure and shape of Au nanoclusters synthesized from the gas phase

U, 10 ¹¹ К/с)	T _f , К	Среднее число атомов	Структура				Форма	
			ГЦК (ГПУ)	Ih	Dh	Аморфная	Цепочечная	Сферичная
2	77	685	12,35%	65,69%	8,32%	13,64%	36,8%	63,2%
4	77	1307	12,56%	62,96%	11,05	13,43%	35,42%	64,58%
20	77	2023	14,89%	56,2%	15,96%	12,95%	28,23%	71,77%
2	373	2428	11,36%	61,82%	10,06%	16,76%	29,96%	70,04%
4	373	5666	12,32%	59,7%	12,8%	15,18%	24,47%	75,53%
20	373	15788	13,65%	53,56%	17,98%	14,81%	18,27	81,73%

Анализ наночастиц Ni сконденсированных из газовой фазы (таблица 3) показал, что для данных наночастиц более вероятно формирование ГЦК (ГПУ) структуры (в среднем 37%).

Таблица 3 – Структура и форма нанокластеров Ni синтезированных из газовой фазы
Table 3 – Structure and shape of Ni nanoclusters synthesized from the gas phase

U, 10 ¹¹ К/с)	T _f , К	Среднее число атомов	Структура				Форма	
			ГЦК (ГПУ)	Ih	Dh	Аморфная	Цепочечная	Сферичная
2	77	1545	25,37%	47,19%	11,98%	15,46%	26,9%	73,1%
4	77	1808	28,96%	38,96%	12,05	20,03%	28,45%	71,55%
20	77	3269	38,85%	29,2%	15,37%	16,58%	35,76%	64,24%
2	373	2575	32,36%	32,82%	11,98%	22,84%	65,89%	34,11%
4	373	4047	46,45%	25,7%	13,7%	14,15%	74,19%	25,81%
20	373	10989	55,92%	23,56%	16,65%	3,87%	81,76	18,24%

В наночастицах алюминия, так же, как и в наночастицах золота наблюдается большой процент икосаэдрической структурой. Однако, в отличие от наночастиц золота, в наночастицах алюминия преобладают цепочечные формы, в среднем цепочечную форму имеют около 63 % наночастиц (Таблица 4).

Таблица 4 – Структура и форма нанокластеров Al синтезированных из газовой фазы.
Table 4 – Structure and shape of Al nanoclusters synthesized from the gas phase.

U, 10 ¹¹ К/с)	T _f , К	Среднее число атомов	Структура				Форма	
			ГЦК (ГПУ)	Ih	Dh	Аморфная	Цепочечная	Сферичная
2	77	968	18,67%	59,64%	8,6%	13,09%	46,5%	53,6%
4	77	1648	21,63%	48,45%	17,65	12,27%	48,29%	51,71%
20	77	4896	23,78%	42,36%	19,28%	14,58%	52,64%	47,36%
2	373	3258	20,73%	45,89%	20,8%	12,58%	69,38%	30,62%
4	373	4098	26,82%	41,75%	23,6%	7,83%	76,47%	23,53%
20	373	12009	29,76%	39,76%	25,7%	4,78%	89,73	10,27%

Следующим этапом исследования была разработка алгоритма поиска оптимальных параметров синтеза для интересующей формы, строения и размера наночастиц. Алгоритм данного программного комплекса основан на результатах молекулярно динамического моделирования процессов синтеза наночастиц из газовой фазы с различными начальными параметрами конденсации. Анализа полученных данных был направлен на выявление влияния скорости охлаждения и конечной температуры на основные закономерности роста наночастиц. Найденные зависимости легли в основу разработанного программного продукта. Программный комплекс имеет интерфейс командной строки, что позволяет производить его запуск в средах без графической оболочки, и при первом запуске предлагает ввести необходимые значения скорости охлаждения и конечной температуры, после чего программа выводит статистические значения преимущественного формирования структуры и формы в наночастицах. Более подробный алгоритм работы программного комплекса представлен на рисунке 2.

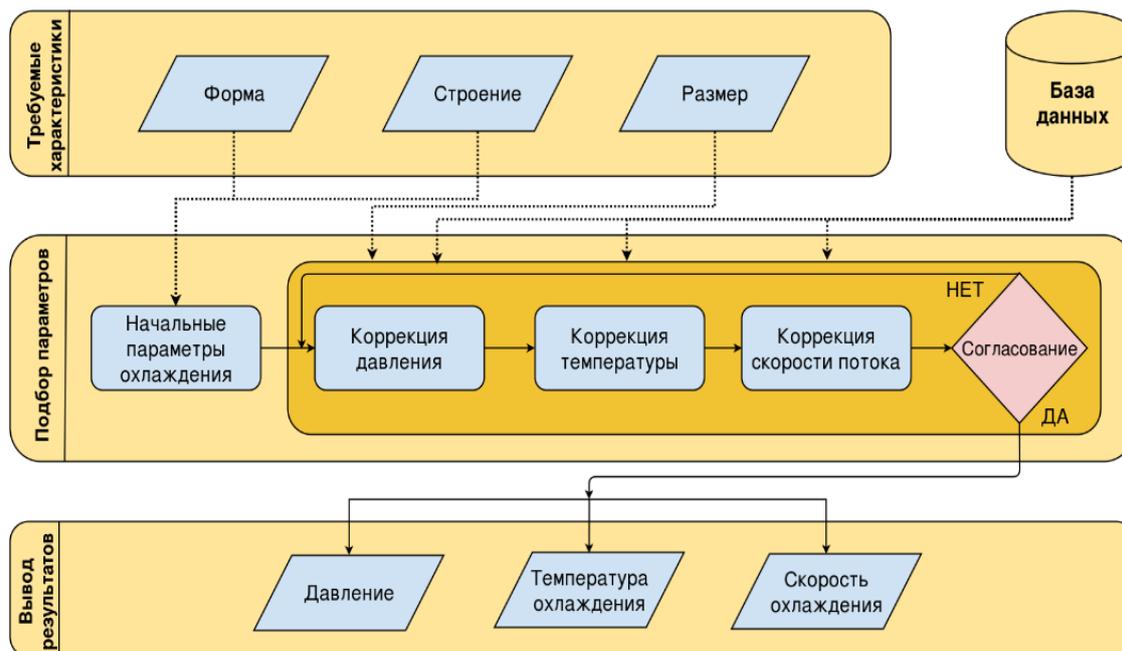


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма
 Figure 2 - Block diagram of the algorithm

При запуске программы появляется консоль на которой предлагают ввести название металла (Cu, Au, Ni, Al) для которого будет определяться свойства наночастиц «Choose the metal used in synthesis». Далее вводим значение конечной температуры, на выбор предлагается две температуры в кельвинах 77 К или 373 К «Enter the coolant temperature in Kelvins». После нажатия клавиши Enter появляется надпись, предлагающая ввести значения скорости охлаждения «Enter the cooling rate in 10¹¹ K/s». После ввода скорости охлаждения появлялась информация о преимущественном формировании в такой системе наночастиц с определенными свойствами. Выводится информация о среднем размере частиц и количестве атомов в частице и процентное соотношение структур. На рисунке 3 приведен пример работы программы для двух металлов Ni и Cu.

```

>megasynthesis.exe
Choose the metal used in synthesis.
Ni
Reading model parameter set for Ni.mod... OK!
Enter the coolant temperature in Kelvins <77 or 373>:
77
Enter the cooling rate in 10^11 K/s:
2
With this synthesis conditions average particle size will be 1545
26.9% of the particles will have spherical form
The structure distribution will be:
25.37% FCC(HCP); 47.19% Ih; 11.98% Dh; 15.46% amorphous.

>megasynthesis.exe
Choose the metal used in synthesis.
Cu
Reading model parameter set for Cu.mod... OK!
Enter the coolant temperature in Kelvins <77 or 373>:
373
Enter the cooling rate in 10^11 K/s:
20
With this synthesis conditions average particle size will be 14166
83.34% of the particles will have spherical form
The structure distribution will be:
38.33% FCC(HCP); 26.67% Ih; 35% Dh; 0% amorphous.
    
```

Рисунок 3 – Демонстрация консольного режима работы программного комплекса
 Figure 3 - Demonstration of the console operating mode of the software package

Заключение

Было проведено исследование режимов получения наночастиц из газовой фазы с целью создания алгоритма поиска оптимальных условий синтеза. Был разработан программный комплекс, облегчающий отладку технологии конденсации однокомпонентных наночастиц.

На данном этапе, разрабатываемый программный комплекс учитывает такие параметры синтеза как конечную температуру и режим охлаждения при вычислении распределения конечных наночастиц по форме, размеру и структуре. При этом, полученные в ходе молекулярно-динамических моделирований эффективные физические величины, параметры моделей, подгоночные коэффициенты, не включены в исходный код программ, а реализованы в виде подключаемых баз данных, которые в дальнейшем можно будет дополнять новыми наборами металлов или уточнять для уже представленных.

Преимущество разрабатываемого программного комплекса заключается в скромных требованиях к производительности вычислительного устройства, что позволяет исполнять его на обычном персональном компьютере. При помощи этого комплекса станет возможным определять требуемые условия (температурный режим, время охлаждения, состав и концентрация паров металла) для получения наночастиц заданных параметров (тип частиц, их распределение по размеру, соотношение компонентов в частице).

ЛИТЕРАТУРА

1. Grammatikopoulos P. Atomistic modeling of the nucleation and growth of pure and hybrid nanoparticles by cluster beam deposition. *Current Opinion in Chemical Engineering*. May 2019;23:164–173. DOI: 10.1016/j.coche.2019.04.004.
2. Bohra M. et al. Tuning the onset of ferromagnetism in heterogeneous bimetallic nanoparticles by gas phase doping. *Phys. Rev. Materials*. November 2017;1(6):066001. DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.1.066001.
3. Davari S.A., Mukherjee D. Kinetic Monte Carlo simulation for homogeneous nucleation of metal nanoparticles during vapor phase synthesis. *AIChE Journal*. July 2018;64(1):18–28. DOI: 10.1002/aic.15887.
4. Plimpton S. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics. *Journal of Computational Physics*. March 1995;117(1):1–19. DOI: 10.1006/jcph.1995.1039.
5. Foiles S.M., Baskes M.I., Daw M.S. Embedded-atom-method functions for the fcc metals Cu, Ag, Au, Ni, Pd, Pt, and their alloys. June 1986;33(12):7983–7991. DOI: 10.1103/PhysRevB.33.7983.
6. Wang G., Xu Y., Qian P., Su Y. Vacancy concentration of films and nanoparticles. *Computational Materials Science*, February 2020;173:109416.
7. Cai J., Li Y. L., Mo D., Wang, Y. D. Softening effect on elastic moduli of Fe, Nb, Cu, and RuAl nanoparticles. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, December 2019;19(12):7899-7905. DOI:
8. Chepkasov I.V., Popov Z.I. Analysis of thermal effects on copper nanoparticles synthesized from the gas phase. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. IOP Publishing*. November 2015; 81:012033. DOI:
9. Liu S., Chen G., Prasad P. N., Swihart, M. T. Synthesis of monodisperse Au, Ag, and Au–Ag alloy nanoparticles with tunable size and surface plasmon resonance frequency. *Chemistry of Materials*. August 2011;23(18):4098-4101. DOI: 10.1021/cm201343.

10. Nam H. S., Hwang N. M., Yu B. D., Yoon, J. K. Formation of an icosahedral structure during the freezing of gold nanoclusters: surface-induced mechanism. *Physical review letters*. December 2002;89(27):275502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.89.275502.

REFERENCES

1. Grammatikopoulos P. Atomistic modeling of the nucleation and growth of pure and hybrid nanoparticles by cluster beam deposition. *Current Opinion in Chemical Engineering*. May 2019;23:164–173. DOI: 10.1016/j.coche.2019.04.004.
2. Bohra M. et al. Tuning the onset of ferromagnetism in heterogeneous bimetallic nanoparticles by gas phase doping. *Phys. Rev. Materials*. November 2017;1(6):066001. DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.1.066001.
3. Davari S.A., Mukherjee D. Kinetic Monte Carlo simulation for homogeneous nucleation of metal nanoparticles during vapor phase synthesis. *AIChE Journal*. July 2018;64(1):18–28. DOI: 10.1002/aic.15887.
4. Plimpton S. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics. *Journal of Computational Physics*. March 1995;117(1):1–19. DOI: 10.1006/jcph.1995.1039.
5. Foiles S.M., Baskes M.I., Daw M.S. Embedded-atom-method functions for the fcc metals Cu, Ag, Au, Ni, Pd, Pt, and their alloys. June 1986;33(12):7983–7991. DOI: 10.1103/PhysRevB.33.7983. DOI: 10.1103/PhysRevB.33.7983.
6. Wang G., Xu Y., Qian P., Su Y. Vacancy concentration of films and nanoparticles. *Computational Materials Science*, February 2020;173:109416.
7. Cai J., Li Y. L., Mo D., Wang, Y. D. Softening effect on elastic moduli of Fe, Nb, Cu, and RuAl nanoparticles. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, December 2019;19(12):7899-7905. DOI:
8. Chepkasov I.V., Popov Z.I. Analysis of thermal effects on copper nanoparticles synthesized from the gas phase. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. IOP Publishing*. November 2015; 81:012033. DOI:
9. Liu S., Chen G., Prasad P. N., Swihart, M. T. Synthesis of monodisperse Au, Ag, and Au–Ag alloy nanoparticles with tunable size and surface plasmon resonance frequency. *Chemistry of Materials*. August 2011;23(18):4098-4101. DOI: 10.1021/cm201343.
10. Nam H. S., Hwang N. M., Yu B. D., Yoon, J. K. Formation of an icosahedral structure during the freezing of gold nanoclusters: surface-induced mechanism. *Physical review letters*. December 2002;89(27):275502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.89.275502.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Чепкасов Илья Васильевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова, Абакан, Российская Федерация

e-mail: ilya_chepkasov@mail.ru

Цуя V. Chepkasov, Phd, Associate Professor Of The Department Of Software For Computer Engineering And Automated Systems, Khakas State University , Abakan, Russian Federation

Замулин Иван Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова, Абакан, Российская Федерация

e-mail: zamulin_ivan@mail.ru

Байдышев Виктор Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова, Абакан, Российская Федерация

e-mail: bayd_vs@mail.ru

Ivan S. Zamulin, Phd, Associate Professor Of The Department Of Software For Computer Engineering And Automated Systems, Khakas State University , Abakan, Russian Federation

Viktor S. Baidyshev, Phd, Associate Professor Of The Department Of Software For Computer Engineering And Automated Systems, Khakas State University , Abakan, Russian Federation