

УДК 415

DOI: 10.12737/2308-4898-2022-10-3-12-22

П.В. Кононов

Канд. техн. наук, доцент,
Санкт-Петербургский горный университет,
Россия, 199106, Санкт-Петербург, 21 линия В.О., 2

И.Е. Кононова

Канд. физ.-мат. наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»,
Россия, 197376, Санкт-Петербург, ул. пр. Попова, 5

О.Н. Мороз

Канд. техн. наук, доцент,
Санкт-Петербургский горный университет,
Россия, 199106, Санкт-Петербург, 21 линия В.О., 2

Принципы построения геометрических моделей нанокластеров по тетраэдрической линии

Аннотация. В связи с развитием новых методов нанотехнологии в статье рассмотрены особенности морфологии нанобъектов, предопределяющие актуальность модернизации подготовки магистрантов при изучении дисциплин «Наноматериаловедение», «Нанотехнология», «Начертательная геометрия, инженерная и компьютерная графика» и «Компьютерное моделирование».

В последнее время понятие «кластер» становится актуальным в связи с тенденцией развития наноматериалов. Такие наноматериалы, полученные с помощью нетрадиционных механизмов роста (включая ориентированное сращивание (*oriented attachment*)) чрезвычайно интересны в области электроники, фотоники и представляют большой интерес для катализа.

В статье рассмотрены гомеоатомные кластеры, построенные из одинаковых структурных единиц. Стремление к минимуму энергии выражается в тенденции к плотнейшему расположению структурных единиц в кластере. Это позволяет утверждать, что наиболее устойчивыми будут структуры кластеров, имеющие максимальное число связей, приходящихся на одну структурную единицу; что кластеры стремятся к квазисферической форме (т.е. размеры кластера по трем декартовым осям по возможности должны быть близки, при этом образуются плотные структуры, поверхность которых минимальна, а число связей максимально); что кластеры с более высокой симметрией предпочтительнее (одинаковые структурные единицы, составляющие каркас кластера, должны стремиться к пребыванию в неотличимом друг от друга состоянии и положении).

В работе применены знания и умения, закладываемые студентам в курсе инженерная и компьютерная графика к исследованиям закономерностей протекания процессов в наном мире на примере принципов построения нанокластеров по тетраэдрической линии с помощью трехмерного моделирования в среде *Autodesk 3ds Max*. Визуализация и наглядное представление геометрических образов нанокластеров позволит избежать примитивно-геометрического представления о нанобъектах у студентов и послужит мотивацией к изучению других естественнонаучных предметов.

Содержание статьи предназначено специалистам, работающим в областях нанотехнологии, твердотельной электроники, микро- и нанoeлектроники, микро- и наносистемной техники, тонкопленочной сенсорики.

Ключевые слова: трехмерное моделирование, нанокластеры, тетраэдрические кластеры.

P.V. Kononov

Ph.D. of Engineering, Associate Professor,
Saint Petersburg Mining University,
2, 21st Line V.O., Saint Petersburg, 199106, Russia

I.E. Kononova

Ph.D. of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»,
5, Professor Popova street, Saint Petersburg, 197376, Russia

O.N. Moroz

Ph.D. of Engineering, Associate Professor,
Saint Petersburg Mining University,
2, 21st Line V.O., Saint Petersburg, 199106, Russia

Principles of Constructing Geometric Models of Nanoclusters Along a Tetrahedral Line

Abstract. In connection with the development of new methods of nanotechnology, the article discusses the features of the morphology of nanoobjects that determine the relevance of the modernization of the training of undergraduates in the study of the disciplines «Nanomaterial Science», «Nanotechnology», «Descriptive geometry, engineering and computer graphics» and «Computer modeling».

Recently, the concept of «cluster» has become relevant due to the trend in the development of nanomaterials. Such nanomaterials obtained using unconventional growth mechanisms (including oriented attachment) are extremely interesting in the field of electronics, photonics and are of great interest for catalysis.

The article considers homoatomic clusters constructed from identical structural units. The desire to minimize energy is expressed in the tendency to the densest arrangement of structural units in the cluster. This allows us to assert that cluster structures with the maximum number of connections per structural unit will be the most stable; that clusters tend to a quasi-spherical shape (i.e., cluster sizes along three Cartesian axes should be close if possible, while dense structures are formed, the surface of which is minimal, and the number of connections is maximum); that clusters with higher symmetry are preferable (identical structural units composing the cluster framework should strive to stay in an indistinguishable state and position from each other).

The work applies the knowledge and skills laid down by students in the course of engineering and computer graphics to the study of the patterns of processes in the nanowire on the example of the principles of building nanoclusters along a tetrahedral line using three-dimensional modeling in the Autodesk 3ds Max environment. Visualization and visual representation of geometric images of nanoclusters will allow students to avoid a primitive geometric representation of nanoobjects and will serve as motivation to study other natural science subjects.

The content of the article is intended for specialists working in the fields of nanotechnology, solid-state electronics, micro- and nanoelectronics, micro- and nanosystem technology, thin-film sensors.

Keywords: three-dimensional modeling, nanoclusters, tetrahedral clusters.

Введение

За последние годы развитие получили нетрадиционные методы кристаллизации, включая ориентированное сращивание (*oriented attachment*) [20; 24; 34]. Представляет также интерес формирование мезокристаллов [20; 21] и мезокристаллов с минеральными мостиками [40].

Во всех этих новых нетрадиционных механизмах кристаллизации общим является использование не атомов и молекул, а первичных конструктивных элементов. Примером применения многоатомных первичных элементов является развитие физики клатратов, это направление особенно актуально для термоэлектрических материалов нового поколения. Клатраты для термоэлектричества были предложены в 90-х гг. XX в. и получили название «фононное стекло — электронный кристалл». Сущность концепции заключается в создании высокопроводящей оболочки из полых элементов, в заполнении внутреннего объема клатрата химически несвязанными атомами, обеспечивающими снижение теплопроводности за счет рассеяния фононов. Это приводит к увеличению коэффициента термоэлектрической эффективности [19].

Типичными примерами структур из первичных конструктивных элементов являются цеолиты [29].

В последнее время активно изучаются квазикристаллы. В работах [31–33] было показано, что описание структуры икосаэдрических квазикристаллов может быть проведено без использования геометрии шестимерного пространства. Модель четырех тел Мадисона позволяет построить структуру из четырех типов элементарных ячеек при заполнении пространства идентичными копиями элементарных ячеек по принципу самоподобия, а не трансляционной инвариантности. При этом разработаны алгоритмы расположения атомов на интерфейсе ячеек. Многоячеечный подход обсуждается как альтернатива многомерному кристаллографическому описанию икосаэдрических квазикристаллов. Четыре типа квазиэлементарных ячеек заполняют пространство без зазоров и перекрытий. Каждая ячейка во всей мозаике определенным образом украшена определенными атомами и связана с триадой: тип, положение и ориентация.

Можно привести и другие примеры практического применения в современном наноматериаловедении [22; 27–30; 36–39] конструктивных элементов в виде полиэдров одного или нескольких типов.

Из вышеизложенного следует, что актуальной задачей, представляющей научный и практический интерес, является разработка разделов, связанных с образованием полиэдрических нанокристаллов, связи морфологии нанобъектов с размерами, а также

переходы морфологических форм друг в друга в соответствии с принципами минимума энергии.

Современное наноматериаловедение [9; 10; 41–43] претерпевает большие изменения, появляется совершенно новый подход, заключающийся в нетрадиционных механизмах роста (за счет кластерного соединения). Методы нетрадиционной кристаллизации изучают процессы, над которыми не довлеет свойство того, что должны существовать только оси симметрии 1–4-го, 6-го порядков, и, так как рассматривается не бесконечно твердое тело, то могут существовать и оси 5-го порядка и т.д., поэтому рассматриваются энергетические формы, выгодные с учетом различных осей. Если раньше рассматривались все вопросы, связанные с ростом объектов за счет присоединения новых атомов, то теперь больше и больше рассматривается возможность привлечения механизмов сращивания и получения мезокристаллов [8; 20; 21].

Интерес к физике кластеров повысился на грани второй половины 20 века, при этом появилось само слово «кластер» (англ. cluster «скопление, кисть, рой») [11; 25; 26]. В последнее время понятие «кластер» [3–7; 35; 36; 44] становится актуальным в связи с тенденцией развития наноматериалов [17; 18; 41–43].

Такие наноматериалы, полученные с помощью нетрадиционных механизмов роста чрезвычайно интересны в области электроники, фотоники и представляют большой интерес для катализа. Например, новые страницы в области материаловедения термоэлектриков открывает новый класс материалов «фононное стекло — электронный кристалл» (класс веществ, который может проводить электричество так же хорошо, как кристаллический проводник, а тепло так же плохо, как стекло).

Известно, что нанокластеры и нанокристаллы представляют собой наноразмерные комплексы атомов или молекул (структурных единиц). Основное различие между ними заключается в характере расположения образующих их атомов или молекул, а также химических связей между ними. Нанокластеры по степени упорядоченности структуры подразделяются на упорядоченные, иначе называемые магическими, и неупорядоченные. В магических нанокластерах атомы или молекулы расположены в определенном порядке и довольно сильно связаны между собой. Благодаря этому обеспечивается сравнительно высокая устойчивость магических нанокластеров, их невосприимчивость к внешним воздействиям.

Особенность упорядоченных (магических [12; 23]) нанокластеров состоит в том, что для них характерны не произвольные, а строго определенные, энергетически наиболее выгодные — так называемые магические числа структурных единиц (в таблице

числа выделены жирным шрифтом). Как следствие, для них характерна немонотонная зависимость их свойств от размеров, то есть от числа образующих их атомов или молекул. Повышенная стабильность, присущая магическим кластерам, обусловлена жесткостью их атомной или молекулярной конфигурации, которая удовлетворяет требованиям плотной упаковки и соответствует завершенным геометрическим формам определенных типов.

Возможно существование различных конфигураций из плотно упакованных структурных единиц. На рис. 1 представлены конфигурации нанокластеров из N плотноупакованных структурных единиц.

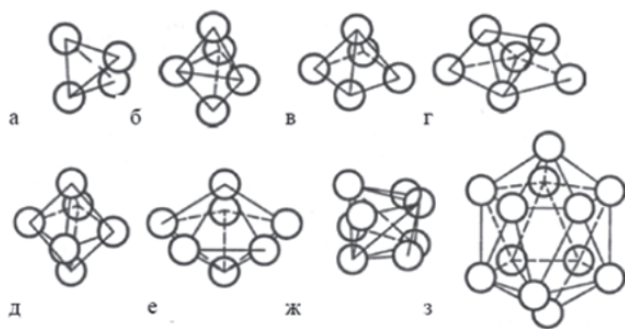


Рис. 1. Конфигурации нанокластеров из N плотноупакованных структурных единиц: а — тетраэдр ($N = 4$); б — тригональная бипирамида ($N = 5$) как сочетание двух тетраэдров; в — квадратная пирамида ($N = 5$); г — трипирамида ($N = 6$), образованная тремя тетраэдрами; д — октаэдр ($N = 6$); е — пентагональная бипирамида ($N = 7$); ж — звездообразный тетраэдр ($N = 8$) образован пятью тетраэдрами — к каждой из четырех граней центрального тетраэдра присоединен еще один тетраэдр; з — икосаэдр ($N = 13$) содержит центральную структурную единицу, окруженный 12 структурными единицами, объединенными в 20 равносторонних треугольников, и имеет шесть осей симметрии 5-го порядка.

Простейшей из таких конфигураций, соответствующей наименьшему нанокластеру, состоящему из четырех структурных единиц, является тетраэдр (рис. 1, а), который входит в качестве составной части в другие, более сложные конфигурации. Как видно из рис. 1, нанокластеры могут иметь кристаллографическую симметрию, для которой характерны оси симметрии 5-го порядка.

Это принципиально отличает их от кристаллов, структура которых характеризуется наличием кристаллической решетки и может иметь только оси симметрии 1-го, 2-го, 3-го, 4-го и 6-го порядков. В частности, наименьший устойчивый нанокластер с одной осью симметрии 5-го порядка содержит семь структурных единиц и имеет форму пентагональной бипирамиды (рис. 1, е), следующая устойчивая конфигурация с шестью осями симметрии 5-го порядка — нанокластер в форме икосаэдра из 13 структурных единиц (рис. 1, з).

Рассмотрим кластеры, построенные из одинаковых структурных единиц. Так как мы будем рассматривать гомоатомные кластеры, то длины связей должны быть в идеальном случае равны. Реально при изменении длины связи и валентного угла на несколько процентов энергия связи меняется на сотые доли процента [8]. Стремление к минимуму энергии может выражаться в тенденции к плотнейшему расположению структурных единиц в кластере. Эти допущения позволяют сформулировать следующие утверждения.

1. Кластеры стремятся к квазисферической форме.

То есть размеры кластера по трем декартовым осям по возможности должны быть близки. При этом образуются плотные структуры, поверхность которых минимальна, а число связей максимально. В кластере может возникать особое, выделенное направление, только в анизотропных внешних средах.

2. Кластеры с более высокой симметрией предпочтительнее.

Третье допущение сводится к тому, что одинаковые структурные единицы, слагающие каркас кластера, должны стремиться к пребыванию в неотличимом друг от друга состоянии и положении.

Стабильность и геометрическая конфигурация кластера являются функцией не только числа слагающих его структурных единиц, но и сорта структурных единиц. Отсюда вытекает следующее важное дополнение к третьему допущению, связанное с учетом электронного строения структурных единиц, слагающих кластер: при данном числе идентичных структурных единиц всегда существует конфигурация (может быть и не одна), удовлетворяющая требованию максимальной симметрии.

Нужно отметить, что строение и свойства нанообъектов, а также технологии их применения и модификации определяются составом, строением, комплексом физических (в том числе квантово-механических), химических свойств и закономерностей [1].

В настоящей работе применены средства компьютерной графики [2; 4; 13–16] для визуализации и наглядного представления геометрических образов нанокластеров, позволяющие избежать примитивно-геометрического представления о нанообъектах у студентов и служащие мотивацией к изучению других естественнонаучных предметов.

Поэтому целью настоящей работы являлось наглядное рассмотрение развития построения геометрических моделей кластеров по тетраэдрической линии с применением средств компьютерной графики с помощью трехмерного моделирования.

Построение геометрических моделей кластеров по тетраэдрической линии

Весь процесс моделирования в *3ds Max* условно разбивали на следующие этапы: настройка единиц измерения, построение правильного тетраэдра и усеченного тетраэдра (с отсечением от всех вершин тетраэдра четырех маленьких тетраэдров).

Библиотека объемных тел *Extended Primitives* («Расширенные примитивы») программы *3ds Max* (в отличие от других более простых программ) позволяет моделировать платоновские тела и гибко управлять последующим формообразованием, в частности правильный тетраэдр, а также усеченные правильные геометрические формы с применением модификатора *Edit Poly* («Редактировать как многоугольник»).

Единицы измерения настраивали следующим образом: в диалоговом окне *Units Setup* (Настройка единиц измерения) в разделе *Display Unit Scale* («Отображаемые единицы измерения») отмечали вариант *Metric* («Метрические») из соответствующего выпадающего списка и выбирали *Millimeters* («Миллиметры»), далее в диалоговом окне *System Unit Setup* («Настройка системной единицы измерения») задавали: 1 *Unit* = 1,0 *Millimeters*.

Моделирование тетраэдра в *3ds Max* проводили из примитива *Hedra* («Многогранник») из *Extended Primitives* («Расширенных примитивов»). Во вкладке *Modify* («Редактирование») устанавливали следующие параметры в области *Family Parameters* (Параметры семейства): *P* — 1,0; *Q* — 0,0; *Radius* (Радиус) — 20.

Полученный правильный тетраэдр усекали следующим образом: к тетраэдру применяли модификатор *Edit Poly* («Редактировать как многоугольник»), активировали уровень *Edge* («Ребро») и выделяли все ребра объекта. На панели *Edges* («Ребра») в поле *Number of Vertices* («Количество вершин») вводили значение «3» и выполняли команду *Insert Vertices* («Добавить вершины»). Все новые вершины, образующие основания малых тетраэдров, объединяли между собой с помощью команды *Connect* («Соединить»), а оставшиеся вершины малых тетраэдров удаляли с помощью команды *Remove* («Устранить»).

Тетраэдр (рис. 2, тетраэдр — простейший многогранник, гранями которого являются четыре треугольника; у тетраэдра 4 грани, 4 вершины и 6 ребер) является фрагментом плотнейшей шаровой упаковки, поскольку четвертая структурная единица лежит в углублении между плотно сдвинутыми тремя остальными.

Правильные тетраэдры не заполняют все пространство, поэтому только ими наращивать кластер до бесконечности невозможно. Появляются октаэдр (рис. 1, д) и квадратные сетки.

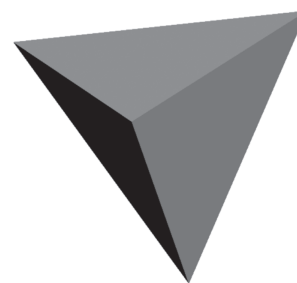


Рис. 2. Изображение тетраэдра

При достаточно больших размерах «острые» вершины тетраэдра энергетически невыгодны и стремятся к скруглению (усечению), что, помимо того, ведет к улучшению (убыванию) изопериметрического качества конфигурации (отношения площади боковой поверхности к объему многогранника).

С помощью системы последовательных усечений исходной (базовой) конфигурации можно получить все основные изометрические формы многослойных кристаллографических кластеров, что приводит к понятию системы «магических чисел».

Основным исходным параметром j является число структурных единиц на ребре тетраэдра.

$$N_j = \frac{1}{2}j(j+1) \quad \text{— треугольное число — число}$$

структурных единиц на грани тетраэдра.

$$\text{Например, } N_{j=3} = \frac{1}{2}j(j+1) = 6.$$

Число структурных единиц в тетраэдре N^T будет суммой j треугольных чисел:

$$N_j^T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^j i(i+1) \quad \text{при } q=0.$$

$$\text{Например, } N_{j=3}^T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{j=3} i(i+1) = \frac{1}{2}(2+6+12) = 10.$$

Отсекая от всех вершин тетраэдра четыре маленьких тетраэдра, содержащих q структурных единиц на ребре (должно выполняться условие $q \leq [j/2]$, где $j/2$ — целая часть числа), тогда число структурных единиц в усеченных кластерах:

$$N_j^T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^j i(i+1) - 2 \sum_{i=1}^q i(i+1) \quad \text{при } q \leq [j/2].$$

$$\text{Например: } N_{j=3}^T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{j=3} i(i+1) - 2 \sum_{i=1}^{q=1} i(i+1) = 10 - 2 \cdot 2 = 6.$$

В таблице представлены результаты расчетов числа структурных единиц в исходных тетраэдрических и различным способом усеченных кластерах.

Нужно отметить, что из таблицы видно, что $N_{j+1}^T = N_j^T + N_{j+1}$.

В качестве иллюстрирующего примера на рис. 3 и 4 представлены изображение геометрической модели четырехатомного тетраэдрического кластера с числом структурных единиц на ребре тетраэдра $j = 2$, числом структурных единиц на грани $N_j = 3$ и схематичное изображение расположения структурных единиц в геометрической модели этого кластера.

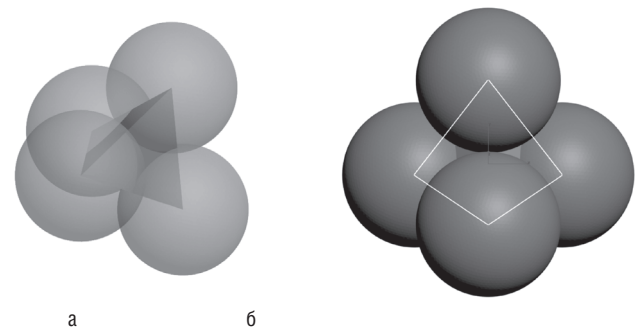


Рис. 3. Изображение геометрической модели четырехатомного тетраэдрического кластера с числом структурных единиц на ребре тетраэдра $j = 2$ (число структурных единиц на грани $N_j = 3$) (без отсечения при $q = 0$): а) прозрачная форма; б) непрозрачная форма

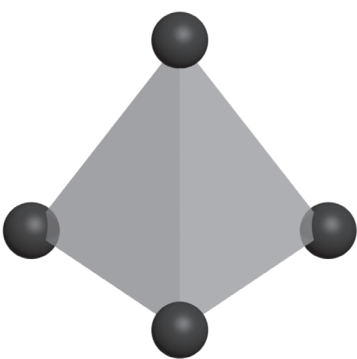


Рис. 4. Схематичное изображение расположения структурных единиц в геометрической модели четырехатомного кластера, изображенном на рис. 3

На рис. 5 и 6 представлены изображение геометрической модели десятиатомного тетраэдрического кластера с числом структурных единиц на ребре тетраэдра $j = 3$, числом структурных единиц на грани $N_j = 6$ (без отсечения при $q = 0$) и схематичное изображение расположения структурных единиц в геометрической модели этого кластера.

Таблица

Число структурных единиц в исходных тетраэдрических и различным способом усеченных кластерах												
j	N_j	N_j^T при значениях q										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1										
2	3	4										
3	6	10	6									
4	10	20	16	4								
5	15	35	31	19								
6	21	56	52	40	16							
6	21	56	52	40	16							
7	28	84	80	68	44							
8	36	120	116	104	80	40						
9	45	165	161	149	125	85						
10	55	220	216	204	180	140	80					
11	66	286	282	270	246	206	146					
12	78	364	360	348	324	284	224	140				
13	91	455		439	415	375	315	231				
14	105	560			520	480	420	336	224			
15	120	680			640	600	540	456	344			
16	136	816				736	676	592	480	336		
17	153	969				889	829	745	633	489		
18	171	1140					1000	916	804	660	480	
19	190	1330					1190	1106	994	850	670	
20	210	1540						1316	1204	1060	880	660

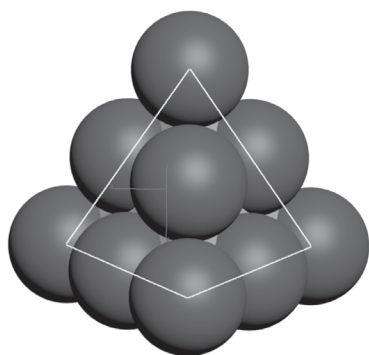


Рис. 5. Изображение геометрической модели десятиатомного тетраэдрического кластера с числом структурных единиц на ребре тетраэдра $j = 3$ (число структурных единиц на грани $N_j = 6$) (без отсечения при $q = 0$)

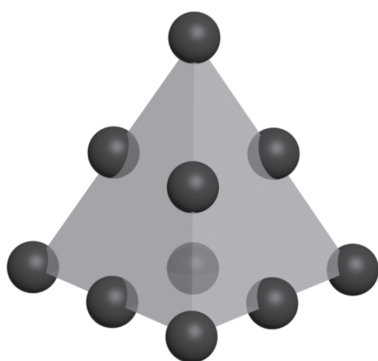


Рис. 6. Схематичное изображение расположения структурных единиц в геометрической модели десятиатомного кластера, изображенном на рис. 5

На рис. 7 и 8 представлены изображение геометрической модели шестиатомного тетраэдрического кластера с числом структурных единиц на ребре тетраэдра $j = 3$ с отсечением от всех вершин тетраэдра четырех маленьких тетраэдров, содержащих $q = 1$ структурную единицу на ребре и схематичное изображение расположения структурных единиц в геометрической модели этого кластера.

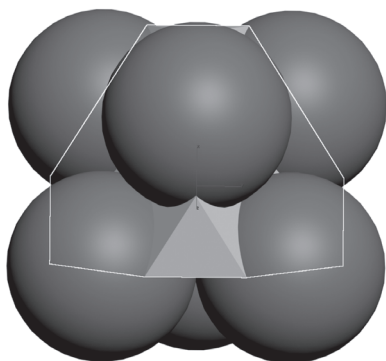


Рис. 7. Изображение геометрической модели шестиатомного тетраэдрического кластера с числом структурных единиц на ребре тетраэдра $j = 3$ (с отсечением при $q = 1$)

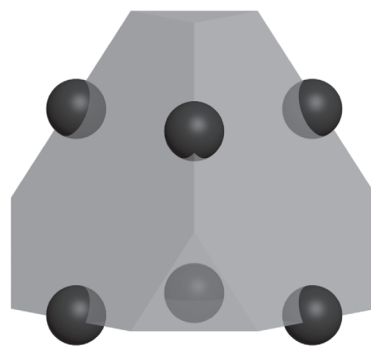


Рис. 8. Схематичное изображение расположения структурных единиц в геометрической модели шестиатомного кластера, изображенном на рис. 7

На рис. 9 и 10 представлены изображение геометрической модели двадцатиатомного тетраэдрического кластера с числом структурных единиц на ребре тетраэдра $j = 4$, числом структурных единиц на грани $N_j = 10$ (без отсечения при $q = 0$) и схематичное изображение расположения структурных единиц в геометрической модели этого кластера.

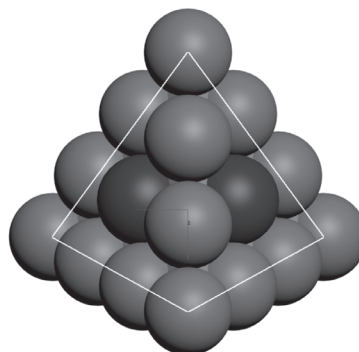


Рис. 9. Изображение геометрической модели двадцатиатомного тетраэдрического кластера с числом структурных единиц на ребре тетраэдра $j = 4$ (число структурных единиц на грани $N_j = 10$) (без отсечения при $q = 0$)

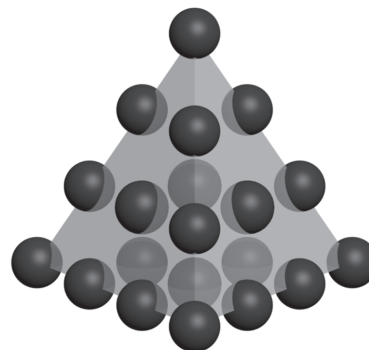


Рис. 10. Схематичное изображение расположения структурных единиц в геометрической модели двадцатиатомного кластера, изображенном на рис. 9

На рис. 11 и 12 представлены изображение геометрической модели шестнадцатиатомного тетра-

эдрического кластера с числом структурных единиц на ребре тетраэдра $j = 4$ с отсечением от всех вершин тетраэдра четырех маленьких тетраэдров, содержащих $q = 1$ структурную единицу на ребре и схематичное изображение расположения структурных единиц в геометрической модели этого кластера.

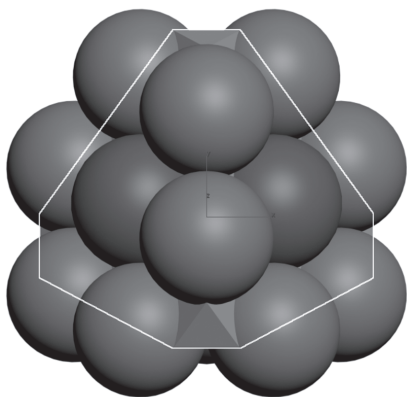


Рис. 11. Изображение геометрической модели шестнадцатиатомного тетраэдрического кластера с числом структурных единиц на ребре тетраэдра $j = 4$ (с отсечением при $q = 1$)

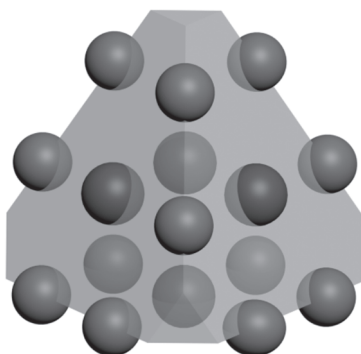


Рис. 12. Схематичное изображение расположения структурных единиц в геометрической модели шестнадцатиатомного кластера, изображенном на рис. 11

На рис. 13 представлено изображение геометрической модели четырехатомного тетраэдрического

кластера с числом структурных единиц на ребре тетраэдра $j = 4$ с отсечением от всех вершин тетраэдра четырех маленьких тетраэдров, содержащих $q = 2$ структурные единицы на ребре.

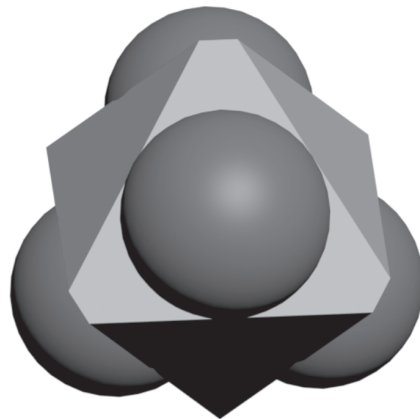


Рис. 13. Изображение геометрической модели четырехатомного тетраэдрического кластера с числом структурных единиц атомов на ребре тетраэдра $j = 4$ (с отсечением при $q = 2$)

Заключение

Таким образом, были применены знания и умения, закладываемые студентам в курсе инженерная и компьютерная графика к исследованиям геометрических закономерностей протекания процессов в наномире на примере принципов построения геометрических моделей нанокластеров по тетраэдрической линии с помощью трехмерного моделирования, что может быть использовано для оказания поддержки традиционным методикам обучения, а также для формирования межпредметных связей при изучении дисциплин «Наноматериаловедение», «Нанотехнология», «Начертательная геометрия, инженерная и компьютерная графика» и для развития у студентов пространственного представления и геометрического мышления.

Литература

1. Бобков А.А. Материаловедение микро- и наносистем. Иерархические структуры [Текст] / А.А. Бобков, И.Е. Кононова, В.А. Мошников // под ред. В. А. Мошникова. — СПб.: Изд-во ЛЭТИ, 2017. — 204 с.
2. Вышнепольский В.И. Цели и методы обучения графическим дисциплинам [Текст] / В.И. Вышнепольский, Н.А. Сальков // Геометрия и графика. — 2013. — Т. 1. — № 2. — С. 8–9. — DOI: 10.12737/777.
3. Дубов П.Л. Кластеры и матрично-изолированные кластерные сверхструктуры [Текст] / П.Л. Дубов, Д.В. Ко-

рольков, В.П. Петрановский. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 1995. — 256 с.

4. Иванов Г.С. Перспективы начертательной геометрии как учебной дисциплины [Текст] / Г.С. Иванов // Геометрия и графика. — 2013. — Т. 1. — № 1. — С. 26–27. — DOI: 10.12737/775.
5. Мясниченко В.С. Влияние внешнего давления на термодинамическую стабильность ГЦК нанокристаллов золота, серебра и меди с «магическим» числом атомов 147 [Текст] / В.С. Мясниченко, А.Ю. Колосов, Д.Н. Соколов, Н.Ю. Сдобняков // Сборник научных трудов VI международной научной конференции «Хи-

- мическая термодинамика и кинетика» под редакцией Ю.Д. Орлова. — 2016. — Тверь: Изд-во Тверского гос. ун-та. — С. 186–187.
6. Мясниченко В.С. Применение представления о структурных многогранниках заполнения координационных сфер в объемных кристаллах к проблеме поиска устойчивых форм нанокластеров. I [Текст] / В.С. Мясниченко, М.Д. Старостенков // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. — 2011. — Т. 8. — № 2. — С. 49–52.
 7. Мясниченко В.С. Применение представления о структурных многогранниках заполнения координационных сфер в объемных кристаллах к проблеме поиска устойчивых форм нанокластеров. II [Текст] / В.С. Мясниченко, М.Д. Старостенков // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. — 2012. — Т. 9. — № 3. — С. 284–288.
 8. Неорганическая химия [Текст]. В 3 т. Т. 1: Физико-химические основы неорганической химии: учебник для студ. высш. учеб. заведений / М.Е. Тамм, Ю.Д. Третьяков; под ред. Ю.Д. Третьякова. — М.: Академия, 2004. — 240 с.
 9. Плескунов И.В. Развитие исследований низкоразмерных металлосодержащих систем от П.П. Веймарна до наших дней [Текст] / И.В. Плескунов, А.Г. Сырков // Записки Горного института — 2018. — Т. 231. — С. 287. — DOI: 10.25515/PMI.2018.3.287.
 10. Поленов Ю.В. Физико-химические основы нанотехнологий: учеб. пособие [Текст] / Ю.В. Поленов, М.В. Лукин, Е.В. Егорова. — Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2013. — 196 с.
 11. Редель Л.В. Роль «магических» чисел при формировании структуры в малых нанокластерах серебра [Текст] / Л.В. Редель, Ю.Я. Гафнер, С.Л. Гафнер // Физика твердого тела. — 2015. — Т. 57. — № 10. — С. 2061–2070.
 12. Рыжкова Д.А. Роль «магических» ГПУ чисел в устойчивости внутреннего строения нанокластеров Ag₈₉ и Ag₁₅₃ [Текст] / Д.А. Рыжкова, С.Л. Гафнер, Ю.Я. Гафнер // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов — 2021. — № 13. — С. 593–603. — DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.593.
 13. Сальков Н.А. Геометрическое моделирование и начертательная геометрия [Текст] / Н.А. Сальков // Геометрия и графика. — 2016. — Т. 4. — № 4. — С. 8–9. — DOI: 10.12737/22841.
 14. Сальков Н.А. Качество геометрического образования при различных подходах к методике обучения [Текст] / Н.А. Сальков // Геометрия и графика. — 2016. — Т. 8. — № 4. — С. 47–60. — DOI: 10.12737/2308-4898-2021-8-4-47-60.
 15. Сальков Н.А. Место начертательной геометрии в системе геометрического образования технических вузов [Текст] / Н.А. Сальков // Геометрия и графика. — 2016. — Т. 4. — № 3. — С. 53–61. — DOI: 10.12737/21534.
 16. Сальков Н.А. Начертательная геометрия — база для компьютерной графики [Текст] / Н.А. Сальков // Геометрия и графика. — 2016. — Т. 4. — № 2. — С. 37–47. — DOI: 10.12737/19832.
 17. Спивак Л.В. Физико-химические основы процессов микро- и нанотехнологии [Электронный ресурс]: учеб. пособие: в 2 ч. — Ч. 1 / Л.В. Спивак, Н.Е. Щепина. — Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2018. — URL: <http://www.psu.ru> > book > uchebnie-posobiya (дата обращения: 11.07.2022).
 18. Суздалев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. — М.: КомКнига, 2006. — 592 с.
 19. Шевельков А.В. Химические аспекты создания термоэлектрических материалов [Текст] // Успехи химии. — 2008. — Т. 77. — С. 3–21. — DOI: 10.1070/RC2008v077n01ABEH003746.
 20. Cölfen H. Mesocrystals and Nonclassical Crystallization [Текст] / H. Cölfen; M. Antonietti. Wiley: Chichester, UK, Hoboken, NJ, USA, 2008. 276 p. DOI: 10.1002/9780470994603.1.
 21. Cölfen H. Mesocrystals: Inorganic superstructures made by highly parallel crystallization and controlled alignment [Текст] / H. Cölfen, M. Antonietti // Angew. Chem. Int. Ed. 2005. V. 44. Pp. 5576–5591. DOI: 10.1002/anie.200500496.
 22. Gasanly S.A. The concept of the phases ratio control during the formation of composite filamentary nanocrystals xInSe-(1-x) In₂O₃ on glass substrates [Текст] / S.A. Gasanly, V.V. Tomaev, T.V. Stoyanova // J. Physics: Conf. Ser. — 2017. V. 917. P. 32021. DOI: 10.1088/1742-6596/917/3/032021.
 23. Harbola M.K. Magic numbers for metallic clusters and the principle of maximum hardness [Текст] // PNAS. 1992. V. 89 (3). Pp. 1036–1039. DOI: 10.1073/pnas.89.3.103. 31.
 24. Jehannin M. New horizons of nonclassical crystallization [Текст] / M. Jehannin, A. Rao, H. Cölfen // J. Am. Chem. Soc. 2019. V. 141. Pp. 10120–10136. DOI: 10.1021/jacs.9b01883. 2.
 25. Jia Yu. Tetrahedral Pt₁₀ Cluster with Unique Beta Aromaticity and Superatomic Feature in Mimicking Methane [Текст] / Yu. Jia, X. Yu, H. Zhang, L. Cheng, Zh. Luo // The Journal of Physical Chemistry Letters. 2021. V. 12. Pp. 5115–5122. DOI: 10.1021/acs.jpclett.1c01178.
 26. Kaatz F.H. Magic Mathematical Relationships for Nanoclusters [Текст] / F.H. Kaatz, A. Bultheel, M. Engel, N. Vogel // Nanoscale Research Letters. 2019. V. 14. P. 150. DOI: 10.1186/s11671-019-2939-5.
 27. Kononova I.E. Development of a model for the formation of materials with a hierarchical pore structure produced under sol-gel processing conditions [Текст] / I.E. Kononova, V.A. Moshnikov, P.V. Kononov // Inorganic Materials. 2018. V. 54. № 5. Pp. 478–489. DOI: 10.1134/S0020168518050060.
 28. Kononova I. Fractal-Percolation structure architectonics in sol-gel synthesis [Текст] / I. Kononova, P. Kononov, V. Moshnikov, S. Ignat'ev // International Journal of Molecular Sciences. 2021. V. 22 (19). P. 10521. DOI: 10.1134/S0020168518050060.
 29. Kononova I.E. Influence of Binder on Porous Structure of Zeolite Compositions and Their Catalytic Activity [Текст] /

- E.V. Maraeva, S.A. Skornikova, V.A. Moshnikov // Glass physics and chemistry. 2020. V. 46. № 2. Pp. 162–169. DOI: 10.1134/S1087659620020066.
30. Krasnyy V.A. The use of nanomaterials to improve the wear resistance of machine parts under fretting corrosion conditions [Текст]. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering / V.A. Krasnyy // IOP Publishing. 2019. V. 560. Pp. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899x/560/1/012186.
 31. Madison A.E. Looking for alternatives to the superspace description of icosahedral quasicrystals [Текст] / A.E. Madison, P.A. Madison // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2019. V. 475. P. 20180667. DOI: 10.1098/rspa.2018.0667.
 32. Madison A.E. Structure of icosahedral quasicrystals within the multiple cell approach [Текст] / AE Madison, PA Madison // Structural Chemistry. 2020. V. 31 (1). Pp. 485–505. DOI: 10.1007/s11224-019-01430-w. 9.
 33. Madison A.E. Substitution rules for icosahedral quasicrystals [Текст] // RSC Adv. 2015. V. 5. Pp. 5745–5753. DOI: 10.1039/C4RA09524C.
 34. Niederberger M. Oriented attachment and mesocrystals: Non-classical crystallization mechanisms based on nanoparticle assembly [Текст] / M. Niederberger, H. Cölfen // Phys. Chem. Chem. Phys. 2006. V. 8. Pp. 3271–3287. DOI: 10.1039/B604589H.
 35. Reimann S.M. Magic triangular and tetrahedral clusters [Текст] / S.M. Reimann, M. Koskinen, H. Ha'kinen, P.E. Lindelof, M. Manninen // Physical review B. 1997. V. 56. № 19. Pp. 1247–1250. DOI: 10.1103/PhysRevB.56.12147.
 36. Salikhov K.M. Using Optical Activation to Create Hydrogen and Hydrogen-Containing Gas Sensors [Текст] / K.M. Salikhov, N.D. Stoyanov, T.V. Stoyanova // Key Eng. Mater. 2020. V. 854. Pp. 87–93. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.854.87.
 37. Smerdov R. Advances in Novel Low-Macroscopic Field Emission Electrode Design Based on Fullerene-Doped Porous Silicon [Текст] / R. Smerdov, Y. Spivak, I. Bizyaev, P. Somov, V. Gerasimov, A. Mustafaev, V. Moshnikov // Electronics. 2020. V. 10. P. 42. DOI: 10.3390/electronics10010042.
 38. Smerdov R. Functionalized nanostructured materials for novel plasma energy systems [Текст] / R. Smerdov, A. Mustafaev, Y. Spivak, V. Moshnikov // In Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019. CRC Press. 2019. Pp. 434–441. DOI: 10.1201/9781003014577-55.
 39. Spivak Yu.M. The architectonics features of heterostructures for IR range detectors based on polycrystalline layers of lead chalcogenides [Текст] / Yu.M. Spivak, I.E. Kononova, P.V. Kononov, V.A. Moshnikov, S.A. Ignat'ev // Crystals 2021. V. 11. Pp. 1143–1159. DOI: 10.3390/cryst11091143.
 40. Sturm E.V. Mesocrystals: Past, Presence, Future [Текст] / E.V. Sturm, H. Colfen // Crystals. 2017. V. 7. P. 207. DOI: 10.3390/cryst7070207.
 41. Syrkov A.G. On the priority of Saint-Petersburg Mining University in the field of nanotechnology science and nanomaterials [Текст] / A.G. Syrkov // J. Min. Inst. 2016. V. 221. Pp. 730–736. DOI: 10.1088/1742-6596/917/3/032021.
 42. Tomaev V.V. Formation of nanocomposite film (polypyrrole)/(aluminum) oxide on aluminum surface [Текст] / V.V. Tomaev, K.L. Levine, T.V. Stoyanova, A.G. Syrkov // In AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC. 2019. V. 2064. I. 030016. DOI: 10.1063/1.5087678.
 43. Tomaev V. Synthesis and Study of a Polypyrrole–Aluminum Oxide Nanocomposite Film on an Aluminum Surface [Текст] / V. Tomaev, K. Levine, T. Stoyanova, A.G. Syrkov // Glas. Phys. Chem. 2019. V. 45. Pp. 291–297. DOI: 10.1134/s1087659619040126.
 44. Wang J. Magic number colloidal clusters as minimum free energy structures [Текст] / J. Wang, Ch.F. Mbah, T. Przybilla, B.A. Zubiri, E. Spiecker // Nature communications. 2018. V. 9 (1). I. 5259. DOI: 10.1038/s41467-018-07600-4.

References

1. Bobkov A.A., Kononova I.E., Moshnikov V. A. *Materialovedenie mikro- i nanosistem. Ierarhicheskie struktury pod red. V.A. Moshnikova* [Material science of micro- and nanosystems. Hierarchical structures edited by V.A. Moshnikov]. SPb., Izd-vo LETI Publ., 2017. 204 p. (in Russian)
2. Vyshnepol'skij V.I. Celi i metody obucheniya graficheskimi disciplinami [Goals and methods of teaching graphic disciplines]. *Geometriya i grafika* [Geometry and graphics]. 2013, V. 1, I. 2, pp. 8–9. DOI: 10.12737/777. (in Russian)
3. Dubov P.L., Korol'kov D.V., Petranovskij V.P. Klastery i matrichno-izolirovannye klasternye sverhstruktury [Clusters and matrix-isolated cluster superstructures]. SPb., Izd-vo SPbGU Publ., 1995. 256 p. (in Russian)
4. Ivanov G.S. Perspektivy nachertatel'noj geometrii kak uchebnoj discipliny [Prospects for descriptive geometry as an academic discipline]. *Geometriya i grafika* [Geometry and graphics]. 2013, V. 1, I. 1, pp. 26–27. DOI: 10.12737/775. (in Russian)
5. Myasnichenko V.S., Kolosov A.Yu., Sokolov D.N., Sdobnyakov N.Yu. Vliyanie vneshnego davleniya na termodinamicheskuyu stabil'nost' GCK nanokristallov zolota, srebra i medi c «magicheskimi» chislom atomov 147 [Effect of External Pressure on the Thermodynamic Stability of FCC Gold, Silver, and Copper Nanocrystals with the «Magic» Number of Atoms 147]. *Sbornik nauchnykh trudov VI mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Himicheskaya termodinamika i kinetika» pod redakciej Yu.D. Orlova* [Collection of scientific papers VI of the international scientific conference «Chemical thermodynamics and kinetics» edited by Yu.D. Orlova]. Tver, Izd-vo Tverskogo gosudarstvennogo universiteta Publ., 2016, pp. 186–187. (in Russian)
6. Myasnichenko V.S., Starostenkov M.D. Primenenie predstavleniya o strukturnykh mnogogrannnikah zapolneniya koordinatsionnykh sfer v ob'emnykh kristallakh k probleme poiska ustojchivyykh form nanoklasteroev I [Application of the concept of structural polyhedra filling coordination spheres in bulk crystals to the problem of finding stable forms of nanoclusters. Part I]. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya* [Fundamental problems of

- modern materials science]. 2011, V. 8, I. 2, pp. 49–52. (in Russian)
7. Myasnichenko V.S., Starostenkov M.D. Primenenie predstavleniya o strukturnykh mnogogrannikah zapolneniya koordinatsionnykh sfer v ob'emnykh kristallakh k probleme poiska ustojchivyyh form nanoklasterov. II. [Application of the concept of structural polyhedrons filling coordination spheres in bulk crystals to the problem of finding stable forms of nanoclusters]. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya* [Fundamental problems of modern materials science]. 2012, V. 9, I. 3, pp. 284–288. (in Russian)
 8. *Neorganicheskaya himiya: V 3 t. T. 1: Fiziko-himicheskie osnovy neorganicheskoy himii: Uchebnik dlya stud. vyssh. ucheb. zavedenij. Pod red. YU.D. Tretyakova* [Inorganic chemistry: In 3 volumes. V. 1: Physical and chemical foundations of inorganic chemistry: A textbook for students of higher educational institutions. M.Ye. Tamm, Ed. Yu.D. Tretyakova]. Moscow, Akademiya Publ., 2004. 240 p. (in Russian)
 9. Pleskunov I.V., Syrkov A.G. Razvitie issledovaniy nizkorazmernykh metallosoderzhashchih sistem ot P.P. Vejmarina do nashih dnei [Development of research on low-dimensional metal-containing systems from P.P. Weymar to the present day]. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute]. 2018, I. 231, p. 287. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.287. (in Russian)
 10. Polenov Yu.V., Lukin M.V., Egorova E.V. *Fiziko-himicheskie osnovy nanotekhnologii: ucheb. posobie* [Physical and chemical bases of nanotechnologies: textbook. allowance]. Ivanovo, Ivanovo State University of Chemical Technology Publ., 2013. 196 p. (in Russian)
 11. Redel' L.V., Gafner Yu.Ya., Gafner S.L. Rol' «magicheskikh» chisel pri formirovanii struktury v mal'nykh nanoklasterakh serebra [The Role of "Magic" Numbers in Structure Formation in Small Silver Nanoclusters]. *Fizika tverdogo tela* [Solid state physics]. 2015, V. 57, I. 10, pp. 2061–2070. (in Russian)
 12. Ryzhkova D.A., Gafner S.L., Gafner YU.YA. Rol' «magicheskikh» GPU chisel v ustojchivosti vnutrennego stroeniya nanoklasterov Ag₈₉ i Ag₁₅₃ [The role of "magic" hcp numbers in the stability of the internal structure of Ag₈₉ and Ag₁₅₃ nanoclusters]. *Fiziko-khimicheskiye aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Physicochemical aspects of studying clusters, nanostructures and nanomaterials]. 2021, I. 13, pp. 593–603. (in Russian)
 13. Sal'kov N.A. Geometricheskoe modelirovanie i nachertatel'naya geometriya [Geometric modeling and descriptive geometry]. *Geometriya i grafika* [Geometry and graphics]. 2016, V. 4, I. 4, pp. 8–9. DOI: 10.12737/22841. (in Russian)
 14. Sal'kov N.A. Kachestvo geometricheskogo obrazovaniya pri razlichnykh podhodakh k metodike obucheniya [The Quality of Geometric Education with Different Approaches to Teaching Methods]. *Geometriya i grafika* [Geometry and graphics]. 2016, V. 8, I. 4, pp. 47–60. DOI: 10.12737/2308-4898-2021-8-4-47-60. (in Russian)
 15. Sal'kov N.A. Mesto nachertatel'noy geometrii v sisteme geometricheskogo obrazovaniya tekhnicheskikh vuzov [The place of descriptive geometry in the system of geometric education of technical universities]. *Geometriya i grafika* [Geometry and graphics]. 2016, V. 4, I. 3, pp. 53–61. DOI: 10.12737/21534. (in Russian)
 16. Sal'kov N.A. Nachertatel'naya geometriya — baza dlya komp'yuternoy grafiki [Descriptive geometry — the basis for computer graphics]. *Geometriya i grafika* [Geometry and graphics]. 2016, V. 4, I. 2, pp. 37–47. DOI: 10.12737/19832. (in Russian)
 17. Spivak L.V., Shchepina N.E. *Fiziko-himicheskie osnovy processov mikro- i nanotekhnologii [Elektronnyy resurs]: ucheb. posobie: v 2 ch.* [Physical and chemical foundations of micro- and nanotechnology processes Electronic resource: study guide in 2 parts]. Perm. gos. nac. issled. un-t [Perm State National Research University.]. 2018. Part 1. URL: <http://www.psu.ru> > book > uchebnie-posobiya (accessed 11 July 2020). (in Russian)
 18. Suzdalev I.P. *Nanotekhnologiya: fiziko-himiya nanoklasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Nanotechnology: physical chemistry of nanoclusters, nanostructures and nanomaterials.]. M.: KomKniga Publ., 2006. 592 p. (in Russian)
 19. Shevel'kov A. V. Himicheskie aspekty sozdaniya termoelektricheskikh materialov [Chemical aspects of the creation of thermoelectric materials]. *Uspekhi himii* [Advances in Chemistry]. 2008, V. 77, pp. 3–21. DOI: 10.1070/RC2008v077n01ABEH003746. (in Russian)
 20. Cölfen H., Antonietti M. Mesocrystals and Nonclassical Crystallization. Wiley: Chichester, UK; Hoboken, NJ, USA, 2008. 276 p. DOI: 10.1002/9780470994603.
 21. Cölfen H., Antonietti M. Mesocrystals: Inorganic superstructures made by highly parallel crystallization and controlled alignment. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2005, V. 44, pp. 5576–5591. DOI: 10.1002/anie.200500496.
 22. Gasanly S.A., Tomaev V.V., Stoyanova T.V. The concept of the phases ratio control during the formation of composite filamentary nanocrystals xInSe-(1-x)In₂O₃ on glass substrates. *J. Physics: Conf. Ser.* 2017, V. 917, p. 32021. DOI: 10.1088/1742-6596/917/3/032021.
 23. Harbola M. K. Magic numbers for metallic clusters and the principle of maximum hardness. *PNAS.* 1992, V. 89 (3), pp. 1036–1039. DOI: 10.1073/pnas.89.3.103.
 24. Jehannin M., Rao A., Cölfen H. New horizons of non-classical crystallization. *J. Am. Chem. Soc.* 2019, V. 141, pp. 10120–10136. DOI: 10.1021/jacs.9b01883.
 25. Jia Yu., Yu X., Zhang H., Cheng L., Luo Zhixun Tetrahedral Pt 10 Cluster with Unique Beta Aromaticity and Superatomic Feature in Mimicking Methane // *The Journal of Physical Chemistry Letters.* 2021, V. 12, pp. 5115–5122. DOI: 10.1021/acs.jpclett.1c01178.
 26. Kaatz F.H., Bultheel A., Engel M., Vogel N. Magic Mathematical Relationships for Nanoclusters. *Nanoscale Research Letters.* 2019, V. 14, I. 150. DOI: 10.1186/s11671-019-2939-5.
 27. Kononova I.E., Moshnikov V.A., Kononov P.V. Development of a model for the formation of materials with a hierarchical pore structure produced under sol–gel processing conditions. *Inorganic Materials.* 2018, V. 54, I. 5, pp. 478–489. DOI: 10.1134/S0020168518050060.

28. Kononova I., Kononov P., Moshnikov V., Ignat'ev S. Fractal-Percolation structure architectonics in sol-gel synthesis. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021, V. 22, pp. 10521–10537. DOI: 10.1134/S0020168518050060.
- Kononova I.E., Maraeva E.V., Skornikova S.A., Moshnikov V.A. Influence of Binder on Porous Structure of Zeolite Compositions and Their Catalytic Activity. *Glass physics and chemistry*. 2020, V. 46, I. 2, pp. 162–169. DOI: 10.1134/S1087659620020066.
29. Krasnyy V.A. The use of nanomaterials to improve the wear resistance of machine parts under fretting corrosion conditions. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*; IOP Publishing: 2019, V. 560, pp. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899x/560/1/012186.
30. Madison A.E., Madison P.A. Looking for alternatives to the superspace description of icosahedral quasicrystals. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2019, V. 475, p. 20180667. DOI: 10.1098/rspa.2018.0667.
31. Madison A.E., Madison P.A. Structure of icosahedral quasicrystals within the multiple cell approach. *Structural Chemistry*. 2020, V. 31, I. 1, pp. 485–505. DOI: 10.1007/s11224-019-01430-w.
32. Madison A.E. Substitution rules for icosahedral quasicrystals. *RSC Adv*. 2015, V. 5, pp. 5745–5753. DOI: 10.1039/C4RA09524C.
33. Niederberger M., Cölfen H. Oriented attachment and mesocrystals: Non-classical crystallization mechanisms based on nanoparticle assembly. *Phys. Chem. Chem. Phys*. 2006, V. 8, pp. 3271–3287. DOI: 10.1039/B604589H.
34. Reimann S.M., Koskinen M., Hakkinen H., Lindelof P.E., Manninen M. Magic triangular and tetrahedral clusters. *Physical review B*. 1997, V. 56, I. 19, pp. 1247–1250. DOI: 10.1103/PhysRevB.56.12147.
35. Salikhov K.M., Stoyanov N.D., Stoyanova T.V. Using Optical Activation to Create Hydrogen and Hydrogen-Containing Gas Sensors. *Key Eng. Mater.* 2020. V. 854, pp. 87–93. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.854.87.
36. Smerdov R., Spivak Y., Bizyaev I., Somov P., Gerasimov V., Mustafaev A., Moshnikov V. Advances in Novel Low-Macroscopic Field Emission Electrode Design Based on Fullerene-Doped Porous Silicon. *Electronics*. 2020, V. 10, p. 42. DOI: 10.3390/electronics10010042.
37. Smerdov R., Mustafaev A., Spivak Y., Moshnikov V. Functionalized nanostructured materials for novel plasma energy systems. In *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019*. CRC Press. 2019, pp. 434–441. DOI: 10.1201/9781003014577-55.
38. Spivak Yu. M., Kononova I.E., Kononov P.V., Moshnikov V.A., Ignat'ev S.A. The architectonics features of heterostructures for ir range detectors based on polycrystalline layers of lead chalcogenides. *Crystals*. 2021, V. 11, pp. 1143–1159. DOI: 10.3390/cryst11091143.
39. Sturm E.V., Colfen H. Mesocrystals: Past, Presence, Future. *Crystals*. 2017, V. 7, p. 207. DOI: 10.3390/cryst7070207.
40. Syrkov A.G. On the priority of Saint-Petersburg Mining University in the field of nanotechnology science and nanomaterials. *J. Min. Inst.* 2016, V. 221, pp. 730–736. DOI: 10.1088/1742-6596/917/3/032021.
41. Tomaev V.V., Levine K.L., Stoyanova T.V., Sirkov A.G. Formation of nanocomposite film (polypyrrol)/(aluminum) oxide on aluminum surface. In *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing LLC. 2019, V. 2064, I. 030016. DOI: 10.1063/1.5087678.
42. Tomaev V.V., Levine K.L., Stoyanova T.V., Syrkov A.G. Synthesis and Study of a Polypyrrole–Aluminum Oxide Nanocomposite Film on an Aluminum Surface. *Glas. Phys. Chem.* 2019, V. 45, pp. 291–297. DOI: 10.1134/s1087659619040126.
43. Wang J., Mbah C.F., Przybilla T., Zubiri B.A., Spiecker E. Magic number colloidal clusters as minimum free energy structures. *Nature communications*. 2018, V. 9, I. 5259. DOI: 10.1038/s41467-018-07600-4.