

УДК 51-7:531:532:533

*К.Ю. Замотин, М.В. Мишин*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ПОКРЫТИЯ ТОНКИХ СЛОЕВ НАНОМАТЕРИАЛА**

*K.Y. Zamotin, M.V. Mishin*

### **MODELING OF COATING DEFECTS NANOMATERIAL THIN LAYERS**

В работе приведены результаты моделирования процесса изменения размера пылевых частиц в процессе их транспортировки из области синтеза к подложке. Рассматриваются процессы изменения размера частиц в результате коагуляции, происходящей при их движении в неоднородном электрическом поле. Изложены постановка задачи и метод решения, позволяющий рассчитать формирование дефектов покрытия — крупных шарообразных частиц микрометрового размера. Проведено параметрическое исследование распределения агломератов по размерам в зависимости от глубины потенциальной ямы, расхода реагентов и несущего газа.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; НАНОЧАСТИЦЫ; ПЫЛЕВАЯ ЧАСТИЦА; ДЕФЕКТ ПОКРЫТИЯ.

The paper draws on the results of modeling the process of dust particles size changing during their transportation from the synthesis area to the substrate. It is considered the process of particle size changing as a result of coagulation which occurs by their movement in the non-homogeneous electric field. It is given the problem statement and the solution method, which enable to calculate the formation of coating defects — large spherical particles of a micron size. The parametrical research of size distribution of agglomerates is conducted and it depends on the depth of the potential well, reagent consumption and carrier gas.

MATHEMATICAL MODELING, NANOPARTICLES, DUST PARTICLES, COATING DEFECTS

Нанопорошки различных материалов находят все более широкое применение в различных областях техники при получении современных композиционных материалов, керамики, катализаторов и т. д. Для синтеза наночастиц различных веществ пристальное внимание исследователей привлекают плазмохимические технологии. В частности, продемонстрировано их успешное применение для получения нанопорошков чистых металлов, нитридов и оксидов различных веществ в низкотемпературной плазме [1–10].

При выполнении экспериментальных исследований основных закономерностей процессов синтеза наночастиц диоксида кремния в высокочастотном (ВЧ) разряде атмосферного давления и формирования из них покрытия на поверхности подложек [6, 11–13] был выявлен факт присутствия в таких покрытиях дефектов,

представляющих собой крупные, микрометрового размера, сферические частицы.

Целью настоящей работы было моделирование процессов формирования частиц микрометрового размера из наночастиц.

Анализ СЭМ-изображений покрытий, полученных по методике, описанной в [6, 11, 13], показывает, что при некоторых параметрах эксперимента наблюдается образование отдельных частиц сферической формы, с размерами в диапазоне 0,5–3 мкм (рис. 1). Частицы микрометрового размера были обнаружены как непосредственно на поверхности кремниевых подложек (рис. 1, а), так и в толще (рис. 1, в) и на поверхности (рис. 1, б) формируемого покрытия из наночастиц. Форма и область обнаружения частиц микрометрового размера позволили выдвинуть предположение, что их формирование происходило не на подложке, а в пространстве

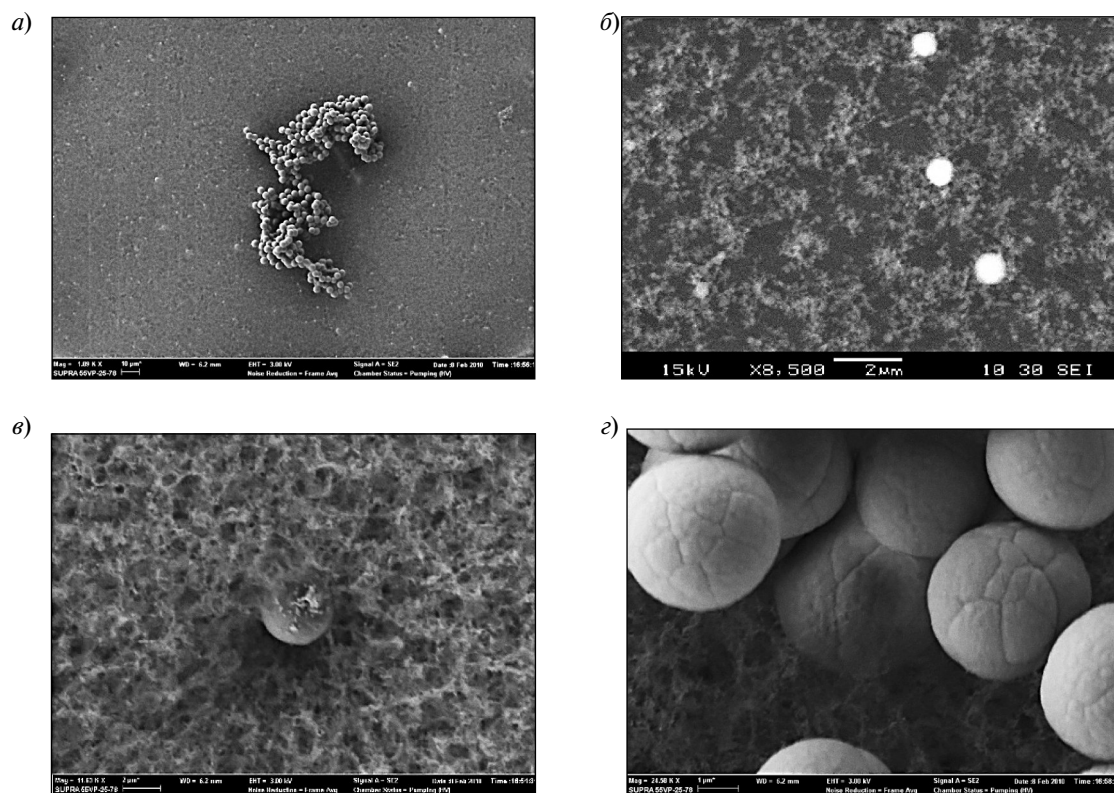


Рис. 1. СЭМ-изображения подложки с частицами микрометрового размера полученные в результате плазмохимического синтеза

реактора до нее. Характерная морфология поверхности крупных частиц (рис. 1, з), позволяет предположить, что они образовались в процессе слипания более мелких частиц.

Мы предположили, что в некоторой локальной области реактора возникают условия, при которых там скапливаются синтезируемые наночастицы минимального размера. В таких локальных областях реактора, отличающихся повышенной пространственной плотностью синтезированного материала [7], происходит рост их размера в результате коагуляции [14], т. е. физико-химический процесс слипания мелких нанометровых частиц, приводящий к формированию частиц большего размера. Подобные процессы наблюдались при различных механизмах синтеза [15–18].

В пользу такого предположения свидетельствует также наблюдаемая агломерация крупных частиц на поверхности сформированного покрытия (рис 1, а). Такая агломерация реализуется обычно в газовых потоках с высокой концентрацией крупных частиц [8].

Причиной появления областей с повышенной концентрацией синтезированного материала может быть неоднородность электрического потенциала [7, 19] в пространстве между областью синтеза и подложкой.

Перейдем к построению модели дефектов покрытия. Математическая модель формирования крупных частиц основана на решении уравнения движения наночастиц, обладающих электрическим зарядом, в области дрейфа — области от «разрядного промежутка», где осуществлялся синтез, до подложки, на которой происходит осаждение частиц. Заряд может быть приобретен частицей в результате химических реакций в процессе синтеза либо в результате взаимодействия с ионом. Как показано в [7, 19], концентрация положительных ионов в области транспортировки достигала значений  $10^6$ – $10^7$  см<sup>-3</sup>.

На движение частиц оказывает влияние поток газа-носителя, а также неоднородное электрическое поле, возникающее после разрядного промежутка вдоль по потоку в окрестности заземленного электрода. В модели учитывается

возможность столкновений подвижных частиц, в результате чего происходит необратимое укрупнение (слияние) более крупной частицы и уничтожение более мелкой.

При моделировании движения частиц будем полагать, что эти частицы не оказывают влияния на поток газа в силу их малой концентрации. Кроме того, число Рейнольдса для потока несущего газа (гелий) равно 0,25. Такое значение в силу его малости отвечает ламинарному характеру течения:

$$Re = \frac{\rho v l}{\eta}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность среды;  $v$  — скорость потока;  $l$  — характерное расстояние;  $\eta$  — динамическая вязкость среды.

Поскольку течение ламинарное и, как было сказано, частицы не оказывают на него влияние, параметры потока не изменяются во времени, и их удастся высчитать один раз, а затем задать в каждой точке пространства. Для нахождения траектории движения некоторой выделенной частицы используется уравнение движения в координатах Лагранжа:

$$\frac{d\vec{r}_i}{dt} = \vec{u}_p; \quad (2)$$

$$\frac{\pi d^2}{6} \rho \frac{d\vec{u}_p}{dt} = \sum \vec{F}_i, \quad (3)$$

где индекс  $p$  указывает на принадлежность частице;  $r$  — радиус-вектор положения,  $u$  — скорость,  $\rho$  — плотность,  $d$  — диаметр частицы. Правая часть уравнения (3) есть баланс всех сил, действующих на частицу. Раскроем знак суммирования в правой части уравнения (3) и учтем силы, делающие доминирующий вклад в движение частицы:

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D(\vec{u}_p - \vec{u}) + (\vec{F}_g + m_p \vec{g}) + \vec{F}_i + \vec{F}_e, \quad (44)$$

где  $u_p$  — скорость частицы,  $u$  — скорость среды;  $F_D(u_p - u)$  — сила сопротивления потоку с учетом субмикронного размера частиц [20, 21];  $(F_g + m_p g)$  представляет собой силу градиента давления и гравитационное воздействие [22];  $F_i$  — вклад термофоретической силы; наконец, последнее слагаемое,  $F_e$  — сила, действующая на частицу, обладающую зарядом в неоднородном

электрическом поле [22]. С учетом ламинарного характера течения можно исключить из рассмотрения турбулентную миграцию частиц и поперечные силы, вызванные неравномерным профилем скорости потока и вращением частицы.

Рассмотрим поведение системы из множества частиц. При моделировании эволюции такой системы возможна ситуация пересечения траекторий движения отдельных частиц, т. е. их столкновение. Сложность расчета столкновений заключается в том, что каждая из  $N$  частиц имеет  $N-1$  возможных партнеров для столкновения. Таким образом, число возможных пар столкновения составляет величину  $\frac{1}{2} N^2$ , где коэффициент  $1/2$  возникает из-за идентичности частиц  $A$  и  $B$  при столкновении, т. е. симметрия уменьшает количество возможных событий столкновения вдвое. Важно еще и то, что алгоритм расчета столкновений должен вычислять  $\frac{1}{2} N^2$  возможных столкновений на каждом шаге по времени. В реальности количество частиц, находящихся в расчетной области, таково, что проводить расчет столкновений путем перебора вариантов столкновений всех частиц невозможно. Для снижения вычислительной сложности задачи используется алгоритм О'Рурка (O'Rourke)[23]. В методе О'Рурка предлагается стохастически оценивать столкновения вместо того, чтобы следить за траекториями и отслеживать их пересечения. О'Рурк также делает предположение, что две частицы могут столкнуться только в случае, когда они находятся в одной ячейке сетки расчета газовой динамики. Эти два предположения справедливы в том случае, когда размер конечно-объемной сетки достаточно мал по сравнению с размером области движения частиц. Как только будет установлено, что два пакета сталкиваются, становится необходимым определить тип столкновения. Интересным с позиций данной работы типом столкновения будут считаться только слияние и рост частиц.

При проведении численных экспериментов с целью исследования влияния технологических параметров установки на скорость формирования и размер крупных частиц использовалась модельная задача. Расчетная область (рис. 2, а, в) представляет собой прямоугольник (решение задачи осуществлялось в двумерной постановке). Верх-

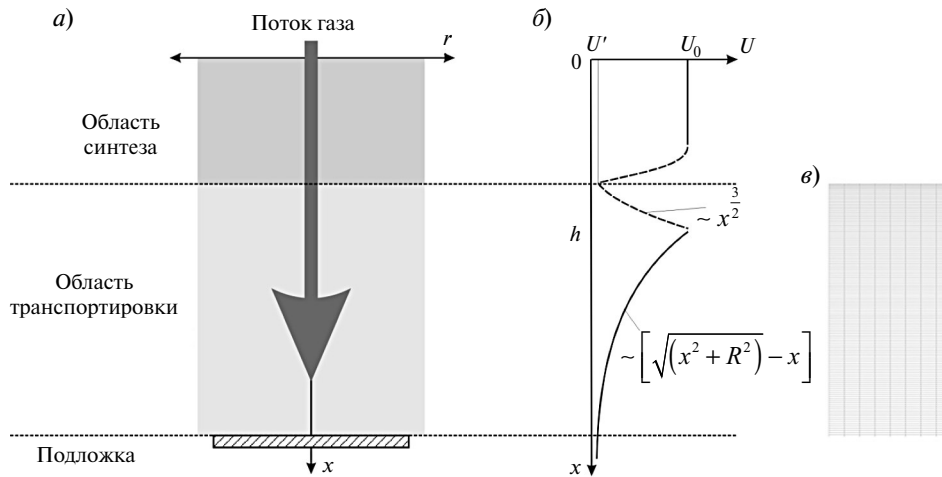


Рис. 2. Схематичное изображение областей синтеза и транспорта материала на подложку (а) и неоднородного электрического поля (б), а также используемой расчетной сетки (в) со сгущением в окрестности электрода

нее основание расчетной области расположено на уровне заземленной сетки и соответствует ячейке сетки с длиной ребра 1 мм. Высота области равна 10 см (общая длина реактора).

Для проведения численного эксперимента необходимо определить граничные условия для течения газа и условия подачи в расчетную область пакетов частиц. Скорость входного потока легко получить из рассмотрения величины расхода  $Q$  несущего газа и площади  $S$  сечения реактора:  $v = \frac{Q}{S}$ .

Температура подаваемого газа носителя определяется плазменной температурой и равна 573 К на подаче в расчетную область. На выходе из расчетной области в окрестности подложки ставится условие нулевого избыточного давления, а также экспериментально полученное значение температуры 300 К. На боковой стенке области ставятся условия периодичности и теплоотвода. Величина теплоотвода подбирается из соотношения начальной и конечной температуры для скорости потока 16,6 мм/с.

На вход расчетной области подаются заряженные частицы. Количество поступающих частиц определяется из условия сохранения массы подаваемых в реактор реагентов. При этом количество подаваемых частиц в единицу времени можно оценить исходя из следующих соображений. Шаг по времени для вычисления положения и скорости частицы может быть выбран малым, равным  $\Delta t = 0,0001$  секунды. Столь ма-

лый шаг по времени обеспечивает выполнение условия нахождения равномерно движущейся частицы в каждой ячейке расчетной сетки в течение по меньшей мере трех временных шагов. Полное время нахождения частицы внутри расчетной области приближенно можно оценить как  $T = \frac{L}{v}$ , где  $L$  — длина области,  $v$  — скорость потока газа. Тогда количество поступающих частиц за это время будет таково:  $M = \frac{T}{\Delta t}$ .

При этом посоображениям обеспечения приемлемого времени расчета в работе не может быть использовано более  $N = 10^7$  пакетов. Отсюда имеем количество участвующих на каждом временном шаге пакетов, равное

$$W = \frac{N}{M} = \frac{Nv\Delta t}{L}$$

Размер самой частицы определяется по законам сохранения. Пусть  $Q_M$  — массовый расход реагента (масса за единичный временной шаг). За единицу времени подается  $W$  пакетов.

Тогда масса пакета равна  $M_p = \frac{Q_M}{W}$ .

Расчет движения газа, его температура, движение частиц осуществляется в области, покрытой конечными объемами в количестве 20 тысяч ячеек структурированной гексаэдральной сетки. Ключевым моментом при дискретизации модели (рис. 2, в) было необходимое сгущение объемов вблизи области разворота положительных

ионов. Сгущение выполнялось с целью качественного воспроизведения движения частиц в области наибольшего влияния электрических сил. При этом разбиение производилось таким образом, чтобы объемы имели малый линейный размер по направлению потока. Вдали от области концентрации положительных ионов характерные размеры гексаэдров в горизонтальной плоскости увеличивались.

Решение газодинамической части выполнялось в специализированном программном комплексе ANSYS Fluent, предназначенном для математического моделирования в задачах аэрогидромеханики. Решение осуществлялось в рамках ламинарной модели течения, дополненной уравнением для температуры среды [24]. Благодаря предположению о том, что частицы не изменяют параметров течения потока в силу их малой концентрации и ввиду малости числа Рейнольдса, удается решать задачу в стационарной постановке.

Учет неоднородного электрического поля (рис. 2, б) для движущихся частиц выполнялся путем написания и компиляции отдельных пользовательских функций, определяющих величину и направление силы электрического поля, действующей на частицу. В качестве пользовательских сил задавались сила, действующая на частицу (диэлектрический шар) в неоднородном электрическом поле, и электростатическая, изменяющие свои значения в зависимости от по-

ложения частицы. Наличие у частицы заряда также определялось через функции (UDF, User Defined Functions). Все расчеты выполнялись на персональном компьютере со следующими техническими характеристиками: процессор *Intel Core i7 950*, имеющий 8 ядер и тактовую частоту 3,07 ГГц.

В качестве результатов моделирования рассмотрим поведение заряженной частицы в случае установившегося баланса действующих на нее сил. В таком равновесном случае может наблюдаться левитация частицы. При этом частица может продолжать испытывать соударения с разогнанными нейтральными частицами, причем результатом такого столкновения является агломерация частиц и их слияние. По мере роста частицы, увеличения ее массы и размера увеличиваются гравитационная сила и сила вязкости. Таким образом, баланс действующих на частицу сил нарушается, что приводит к прекращению левитации и выносу частицы из области локализации в сторону подложки, а соответственно, — к прекращению дальнейшего ее роста.

Критический размер частицы, при котором нарушается баланс сил и происходит вынос частицы из области потенциальной ямы, зависит от большого количества факторов: величины заряда, глубины потенциальной ямы, расхода реагента или газа-носителя, температуры газа и др. Исследование возможности зафиксировать все факторы, влияющие на агломерацию, по-

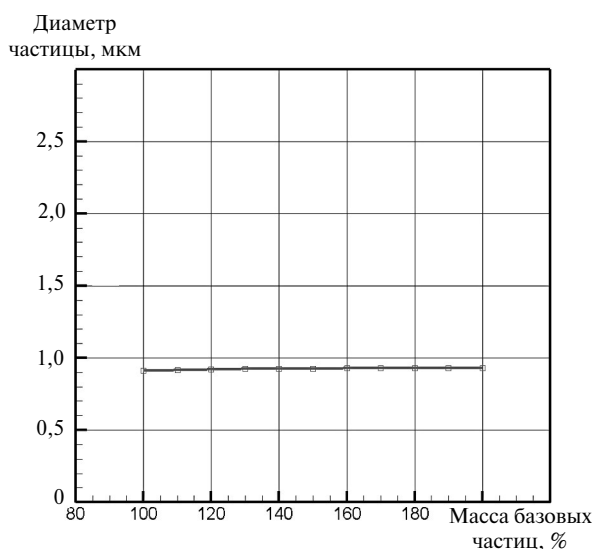


Рис. 3. Зависимость размера крупных частиц от массы поступающих базовых частиц в отношении к базовому случаю

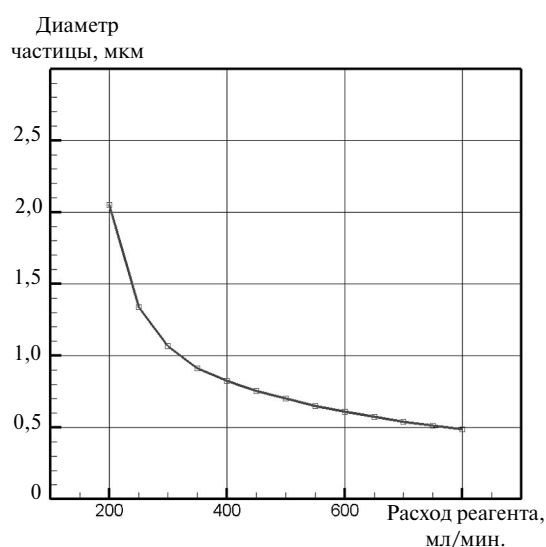


Рис. 4. Зависимость размера крупных частиц от величины расхода реагента (скорости потока)

родило так называемый базовый вариант, в рамках которого все вариации одного параметра происходили при фиксации остальных.

На рис. 3 и 4 представлены зависимости размера агломерата от расхода газа-носителя (гелий) и массового расхода TEOS, отнесенного к базовому случаю. Как видно из графиков, расход реагентов не влияет на размер формируемых крупных частиц. При варьировании же расхода несущего газа наблюдается формирование шарообразных частиц из всего спектра размеров от 0,3 до 2,2 микронметров. При этом влияние изменения потенциала плазмы  $U$  на размер агломерированных крупных частиц оказывается линейным (рис. 5).

В работе приведено описание модели, на основе которой выявлены основные механизмы формирования крупных сферических частиц. Показано, что причиной возникновения агломератов микронного размера является выход ионов, ускоренных разностью потенциалов между электродом и плазмой. Баланс сил, из-за которого частица левитирует, определяется в первую очередь электростатическим взаимодействием: для рассмотренных в работе величин расхода реагента (200–800 мл/мин) оно приблизительно на два порядка превышает силу увлечения потоком (Стокса). Рост сферической частицы возможен, например, из-за постоянного осаждения материала на поверхности частицы, агломерации. В результате указанного

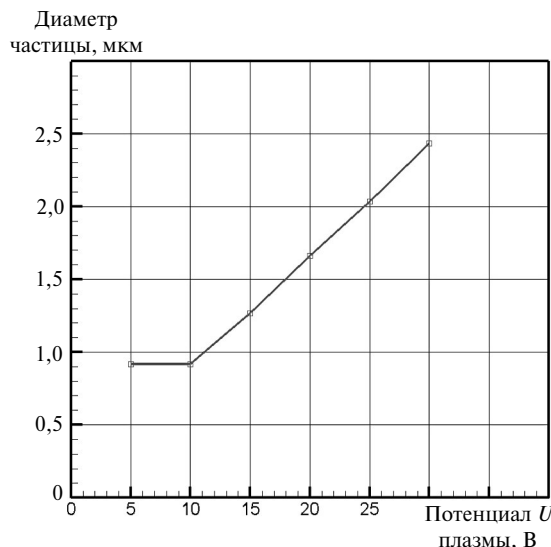


Рис. 5. Зависимость размера крупных частиц от величины потенциала плазмы

роста, увеличения массы и размера частицы баланс действующих на нее сил нарушается, что приводит к выносу частицы из области локализации и, соответственно, к прекращению дальнейшего роста.

На основе математического моделирования проведено решение задачи определения критических размеров таких агломератов в зависимости от скорости газового потока, массового расхода реагентов и глубины потенциальной ямы (5–30 В), наблюдаемой за заземленным электродом вниз по потоку.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Alexandrov S.E., Kretusheva I.V., Mishin M.V. Atmospheric pressure plasma enhanced CVD of Fe nanoparticles // *ECS Transactions*. 2009. Vol. 25. P. 943–951.
- Chen C., Bai H., Chein H.M., Chen T.M. Continuous generation of TiO<sub>2</sub> nanoparticles by an atmospheric pressure plasma-enhanced process // *Aerosol Science and Technology*. 2007. Vol. 41, № 11. P. 1018–1028.
- Zhu H., Lau Y.C., Pfender E. RF plasma synthesis of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> powders // *Journal of Superconductivity*. 1990. Vol. 3, № 2. P. 171–175.
- Barankin M.D., Creighton Y., Schmidt-Ott A. Synthesis of nanoparticles in an atmospheric pressure glow discharge // *Journal of Nanoparticle Research*. 2006. Vol. 8, Iss. 3–4. P. 511–517.
- McIlroy D.N., Huso J., Kranov Y., Marchinek J., Ebert C., Moore S., Marji E., Gandy R., Hong Y.-K., Grant Norton M., Cavaliere E., Benz R., Justus B.L., Rosenberg A. Nanoparticle formation in microchannel glass by plasma enhanced chemical vapor deposition // *Journal of Applied physics*. 2003. Vol. 93, № 9. P. 5643–5649.
- Aguas H., Silva V., Fortunato E. Large Area Deposition of Polymorphous Silicon by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition at 27.12MHz and 13.56MHz // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2003. Vol. 42. P. 4935–4942.
- Virzonis D., Sinkevicius V., Grigaliunas V., Tamulevicius S., Kaliasas R. Advanced Process Equipment for PECVD Silicon Nitride Deposition an Experimental Study // *Materials Science (Medziagotyra)*. 2006. Vol. 12. № 2. P. 97–100.
- Cho D.L., Min H., Kim J.-H., Cha G.-S. Photocatalytic Characteristics of TiO<sub>2</sub> Thin Films Deposited by PECVD // *J. Ind. Eng. Chem.* 2007. Vol. 13, № 3. P. 434–437.

9. **Chryssou C.E., Pitt C.W.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films by plasma-enhanced chemical vapour deposition using trimethyl-amine alane (ТМАО) as the Al precursor // *Appl. Phys. A*. 1997. Vol. 65. P. 469–475.

10. **Kouprine A., Gitzhofer F., Boulos M., Veres T.** Synthesis of ferromagnetic nanopowders from iron pentacarbonyl in capacitively coupled RF plasma // *Carbon*. 2006. Vol. 44. Iss. 13. P. 2593–2601.

11. **Мишин М.В., Александров С.Е., Кретушева И.В., Боричева И.К.** Формирование фрактальных структур микрометрового размера из наночастиц диоксида кремния // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2012. № 4. С. 105–110.

12. **Кретушева И.В., Мишин М.В., Александров С.Е.** Некоторые закономерности получения наночастиц диоксида кремния в низкотемпературной плазме атмосферного давления // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2013. № 2(171). С. 158–164.

13. **Мишин М. В.** Плазмохимический синтез : проведение процесса в низкотемпературной плазме атмосферного давления / М. В. Мишин, В. С. Протопопова, С. Е. Александров // *Российский Химический Журнал (ЖРХО им. Д. И. Менделеева)*. 2013. Т. 57, № 3/4. С. 5–16.

14. **Фукс Н.А.** *Механика аэрозолей*. М.: Изд-во АН СССР, 1955.

15. **Nitter T.** Levitation of dust in rf and dc glow discharges // *Plasma Sources Science and Technology*. 1996. Vol. 5. P. 93–111.

16. **Michau A., Lombardi G., Delacqua L.C., Redolfi M., Arnas C., Bonnin X. Hassouni K.** Modeling carbonaceous particle formation in an argon graphite cathode dc discharge // *Plasma Physics and Controlled Fusion* 2010. Vol. 52, P. 10.

17. **Белов И.А., Иванов А.С., Иванов Д.А. [и др.]**. Коагуляция заряженных частиц в пылевой плазме // *ЖЭТФ*. Том 117. Вып. 1. 2010. С. 105–114.

18. **Манкелевич Ю.А., Олеванов М.А., Паль А.Ф., Рахимова Т.В., Рябинкин А.Н., Серов А.О., Филиппов А.В.** Коагуляция пылевых частиц в аргоновой плазме ВЧ разряда // *Физика плазмы*. № 3. 2009. Том 35. С.219–228.

19. **Mishin M.V., Protopopova V.S., Uvarov A.A., Alexandrov S.E.** Spatial distribution of the electrical potential and ion concentration in the downstream area of atmospheric pressure remote plasma AIP Advances 4, 107130 (2014); doi: 10.1063/1.4898785.

20. **Лойцянский Л.** *Механика жидкости и газа*. М.: Наука, 1973. С. 904.

21. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** *Теоретическая физика*. Том 6. Гидродинамика. М.: Наука, 1986.

22. **Сивухин Д.В.** *Общий курс физики*. Рипол Классик, 2005.

23. **O'Rourke P.J.** Collective drop effects on vaporizing liquid sprays / Los Alamos National Lab., NM (USA). 1981.

24. **ANSYS FLUENT Theory Guide / ANSYS Inc., USA**. 2011.

## REFERENCES

1. **Alexandrov S.E., Kretusheva I.V., Mishin M.V.** Atmospheric pressure plasma enhanced CVD of Fe nanoparticles. *ECS Transactions*. 2009. Vol. 25. P. 943–951.

2. **Chen C., Bai H., Chein H.M., Chen T.M.** Continuous generation of TiO<sub>2</sub> nanoparticles by an atmospheric pressure plasma-enhanced process. *Aerosol Science and Technology*. 2007. Vol. 41. № 11. P. 1018–1028.

3. **Zhu H., Lau Y.C., Pfender E.** RF plasma synthesis of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> powders. *Journal of Superconductivity*. 1990. Vol. 3. № 2. P. 171–175.

4. **Barankin M.D., Creighton Y., Schmidt-Ott A.** Synthesis of nanoparticles in an atmospheric pressure glow discharge. *Journal of Nanoparticle Research*. 2006. Vol. 8. Iss. 3–4. P. 511–517.

5. **McIlroy D.N., Huso J., Kranov Y., Marchinek J., Ebert C., Moore S., Marji E., Gandy R., Hong Y.-K., Grant Norton M., Cavalieri E., Benz R., Justus B. L., Rosenberg A.** Nanoparticle formation in microchannel glass by plasma enhanced chemical vapor deposition. *Journal of Applied physics*. 2003. Vol. 93, № 9. P. 5643–5649.

6. **Aguas H., Silva V., Fortunato E.** Large Area Deposition of Polymorphous Silicon by Plasma Enhanced

Chemical Vapor Deposition at 27.12MHz and 13.56MHz. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2003. Vol. 42. P. 4935–4942.

7. **Virzonis D., Sinkevicius V., Grigaliunas V., Tamulevicius S., Kaliasas R.** Advanced Process Equipment for PECVD Silicon Nitride Deposition an Experimental Study. *Materials Science (Medziagotyra)*. 2006. Vol. 12. № 2. P. 97–100.

8. **Cho D.L., Min H., Kim J.-H., Cha G.-S.** Photocatalytic Characteristics of TiO<sub>2</sub> Thin Films Deposited by PECVD. *J. Ind. Eng. Chem.* 2007. Vol. 13. № 3. P. 434–437.

9. **Chryssou C.E., Pitt C.W.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films by plasma-enhanced chemical vapour deposition using trimethyl-amine alane (ТМАО) as the Al precursor. *Appl. Phys. A*. 1997. Vol. 65. P. 469–475.

10. **Kouprine A., Gitzhofer F., Boulos M., Veres T.** Synthesis of ferromagnetic nanopowders from iron pentacarbonyl in capacitively coupled RF plasma. *Carbon*. 2006. Vol. 44. Iss. 13. P. 2593–2601.

11. **Mishin M.V., Aleksandrov S.Ye., Kretusheva I.V., Boricheva I.K.** Formirovaniye fraktalnykh struktur mikro-metrovogo razmera iz nanochastits dioksida kremniya. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2012. № 4. S. 105–110. (rus.)

12. **Kretusheva I.V., Mishin M.V., Aleksandrov S.Ye.** Nekotoryye zakonomernosti polucheniya nanochastits dioksida kremniya v nizkotemperaturnoy plazme atmosfernogo davleniya. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 2(171). S. 158–164. (rus.)
13. **Mishin, M.V. Protopopova V.S., Aleksandrov S.Ye.** Plazmokhimicheskiy sintez : provedeniye protsessa v nizkotemperaturnoy plazme atmosfernogo davleniya. *Rossiyskiy Khimicheskiy Zhurnal (ZhRKhO im. D. I. Mendeleeva)*. 2013. T. 57, № 3/4. S. 5–16. (rus.)
14. **Fuks N.A.** Mekhanika aerorozley. M.: Izd-vo AN SSSR 1955. (rus.)
15. **Nitter T.** Levitation of dust in rf and dc glow discharges. *Plasma Sources Science and Technology*. 1996. Vol. 5. P 93–111.
16. **Michau A., Lombardi G., Delacqua L.C., Redolfi M., Arnas C., Bonnin X., Hassoun, K.** Modeling carbonaceous particle formation in an argon graphite cathode dc discharge. *Plasma Physics and Controlled Fusion* 2010. Vol. 52, P. 10.
17. **Belov I.A., Ivanov A.S., Ivanov D.A. [i dr.].** Koagulyatsiya zaryazhennykh chastits v pylevoy plazme. *ZhETF*. Vyp. 1. 2010. Tom 117. S. 105–114. (rus.)
18. **Mankelevich Yu.A., Olevanov M.A., Pal A.F., Rakhimova T.V., Ryabinkin A.N., Serov A.O., Filippov A.V.** Koagulyatsiya pylevykh chastits v argonovoy plazme VCh razryada. *Fizika plazmy*. 2009. T. 35, № 3 S. 219–228. (rus.)
19. **Mishin M.V., Protopopova V.S., Uvarov A.A., Alexandrov S.E.** Spatial distribution of the electrical potential and ion concentration in the downstream area of atmospheric pressure remote plasma. *AIP Advances* 4, 107130 (2014); doi: 10.1063/1.4898785.
20. **Loytsyanskiy L.** Mekhanika zhidkosti i gaza. M.: Nauka, 1973. S. 904.
21. **Landau L.D., Lifshits Ye.M.** Teoreticheskaya fizika. Tom 6: Gidrodinamika. M.: Nauka, 1986. (rus.)
22. **Sivukhin D.V.** Obshchiy kurs fiziki. Ripol Klassik, 2005. (rus.)
23. **O'Rourke P.J.** Collective drop effects on vaporizing liquid sprays. Los Alamos National Lab., NM (USA). 1981.
24. ANSYS FLUENT Theory Guide / ANSYS Inc., USA. 2011.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЗАМОТИН Кирилл Юрьевич** — начальник отдела Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: kirart@gmail.com

**МИШИН Максим Валерьевич** — кандидат физико-математических наук доцент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: vera\_protopopova@mail.ru

#### AUTHORS

**ZAMOTIN Kirill Yu.** — St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: kirart@gmail.com

**MISHIN Maksim V.** — St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: maximvmishin@gmail.com