

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ИЗОЛЯЦИОННОГО СЛОЯ НА ЗОНДИРУЮЩЕЕ ОСТРИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА

ШЕЛКОВНИКОВ Е. Ю., ТЮРИКОВ А. В., ГУЛЯЕВ П. В., ЖУЙКОВ Б. Л.

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН,  
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

---

**АННОТАЦИЯ.** В статье рассмотрены вопросы исследования модели процесса изоляции платиновых зондов сканирующего электрохимического туннельного микроскопа. Для моделирования применен трехмерный метод гидродинамики сглаженных частиц с учетом температуры, температурной зависимости плотности, вязкости и поверхностного натяжения. Модель включает в себя погружение заготовки в кольцо, заполненное расплавом изолятора "апиезона L". Проведено большое число численных исследований по изучению влияния таких параметров как: угол заточки заготовки, начальная температура расплава, диаметр входного отверстия установки, диаметр проволоки заготовки. Выявлены оптимальные значения этих параметров для получения необходимых геометрических характеристик изолированного острия.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сканирующий электрохимический туннельный микроскоп, платиновая игла, изолированное зондирующее острие, метод гидродинамики сглаженных частиц.

---

### ВВЕДЕНИЕ

Применение сканирующих электрохимических туннельных микроскопов (СЭТМ) [1] при неразрушающем контроле структуры поверхности, а также процессов (в том числе, электрохимических), протекающих на ее поверхности, позволяет получать изображения с разрешением, приближающимся к атомному. Однако, СЭТМ-эксперимент значительно отличается от такового с использованием обычного сканирующего туннельного микроскопа (СТМ). Основное и самое существенное отличие состоит в том, что поскольку само исследование поверхности происходит в жидкости (чаще всего токопроводящей), зонд СЭТМ должен быть покрыт изолирующим составом за исключением небольшого участка на самом его конце. Такое покрытие обеспечивает отсутствие паразитных токов, протекающих между зондирующим острием и поверхностью [2, 3], и препятствующих регистрации туннельного тока, несущего полезную информацию о малом участке исследуемой поверхности. При этом величина неизолированного кончика острия в сущности определяет разрешение СЭТМ, поэтому контроль качества изоляции зондирующих острий имеет самое существенное значение при подготовке СЭТМ-эксперимента.

При изготовлении изолированных зондирующих острий СЭТМ применяются различные методики. Платиновые зонды изготавливают методом механического разрезания [4 – 7], а вольфрамовые при помощи химического или электрохимического травлений [8, 9]. Однако, само нанесение изоляции чаще всего проводится путем окунания острий в расплав изолирующего состава [1], в качестве которого обычно применяется "апиезон L". Его физические параметры (такие, как температура плавления, вязкость или поверхностное натяжение) хорошо известны, что позволяет разрабатывать методики нанесения изоляционного слоя при помощи математического моделирования. Необходимость такого моделирования подтверждается тем фактом, что само изготовление платиновых или вольфрамовых зондов является чрезвычайно кропотливым (а для платины еще и затратным, в силу ее высокой стоимости) процессом. Теоретические исследования процессов изготовления зондов СТМ подробно рассмотрены в работах [4, 5, 7], данное же исследование посвящено моделированию процесса изоляции платиновых зондирующих острий СЭТМ.

Ранее в работе [6] была рассмотрена возможность применения метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH) для моделирования изоляции поверхностей. Применение этого метода является весьма перспективным из-за возможности его гибридного использования как при моделировании взаимодействия твердого платинового острия с расплавом изолятора (с возможностью учета гидродинамических процессов), так и с его твердой фазой, появляющейся после застывания изолирующего состава. Последнее является весьма существенным, так как именно при застывании расплава, изменении его вязкости и поверхностного натяжения формируется непосредственно кончик острия, остающийся неизолированным и позволяющий регистрировать туннельный ток при СЭТМ-эксперименте.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Метод SPH применялся авторами ранее в работах [6, 7], в которых подробно описаны все принципы данного метода. Он является методом лагранжевой гидродинамики, а потому не нуждается в определении статической сетки. Основы метода заложены работами Монагана и его коллег [10–15]. Основные уравнения для состояния среды: уравнение неразрывности, сохранения импульса и энергии записываются в дискретной форме, описывая, тем самым, моделируемую среду, разбитую на дискретные частицы [11]. Все величины в произвольной точке среды  $\vec{r}$  (например, плотность) подвергаются усреднению-свертке в сглаживающем диапазоне  $h$  при помощи функции ядра  $W$ :

$$\rho(\vec{r}) = \sum_j m_j W(\vec{r} - \vec{r}_j, h), \quad (1)$$

где  $m_j$  – масса  $j$ -й частицы;  $W(\vec{r}, h)$  – функция ядра;  $h$  – параметр сглаживающей длины.

Уравнения движения гидродинамики Лагранжа (то есть уравнения баланса сил), представляющие собой аналог уравнений Навье-Стокса в гидродинамике Эйлера, запишутся для каждой частицы, таким образом, как [10]:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \mu \Delta \vec{v} - \vec{\nabla} p + \vec{F}_{ext}, \quad (2)$$

где  $\rho, \vec{v}, p, \mu$  – плотность, скорость, давление и вязкость моделируемой жидкости, соответственно;  $\vec{F}_{ext}$  – внешняя сила, действующая на частицу (представляет собой сумму двух слагаемых: гравитационной составляющей и силы поверхностного натяжения:  $\vec{F}_{ext} = \vec{F}_{grav} + \vec{F}_{surf}$ ). При этом, если величина силы гравитации вычисляется достаточно просто ( $\vec{F}_{grav} = \rho \vec{g}$ ), то для силы поверхностного натяжения необходимо вводить дополнительные условия. Внутри жидкости каждая молекула взаимодействует одинаково со своими соседями, что приводит к нулевой действующей на нее силе. Однако, поскольку молекулы свободной поверхности не имеют соседей со всех сторон, на них действует результирующая сила, направленная внутрь жидкости. Возникающее, таким образом, поверхностное натяжение минимизирует площадь поверхности в соответствии с законом Лапласа, что приводит к образованию, например, капель жидкости.

В данной работе используется модель поверхностного натяжения, предложенная в [16]. Определение влияния поверхностного натяжения в данной модели складывается из двух независимых членов: силы "сцепления"  $F_b$  (определяющей влияние дальнего порядка) и силы "кривизны"  $F_c$  (отвечающей за минимизацию площади поверхности моделируемой жидкости).

Сила сцепления между частицами задана таким образом, что для частиц, соседних с рассматриваемой,  $F_b < 0$ , поэтому фактически она отталкивает частицы друг от друга; в то же время для остальных частиц  $F_b \geq 0$ . Такое поведение силы позволяет уменьшить эффект кластеризации жидкости. Итоговое выражение для силы сцепления, действующей между двумя частицами, определено как:

$$F_b^{ij} = -\sigma m_i m_j W_b(\vec{r}_{ij}, h),$$

где  $i$  и  $j$  – индексы соседних частиц;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $m$  – масса частиц;  $\vec{r}_{ij} = \vec{r}_i - \vec{r}_j$  – радиус-вектор, направленный от частицы  $j$  до частицы  $i$ . Функция ядра SPH выбрана таким образом, чтобы обеспечить поведение силы, описанное выше [16]:

$$W_b(r, h) = \frac{32}{\pi h^9} \frac{r}{|r|} \begin{cases} 2(h-|r|)^3 |r|^3 - \frac{h^6}{64}, & 0 < |r| \leq \frac{h}{2}; \\ (h-|r|)^3 |r|^3, & \frac{h}{2} < |r| \leq h; \\ 0, & |r| > h. \end{cases} \quad (3)$$

Для определения силы кривизны, действующей на частицу, используется тот факт, что величина нормали  $n$  пропорциональна кривизне поверхности в области расположения частицы. Сначала определяется нормаль для каждой частицы в моделируемой жидкости, используя для этого SPH аппроксимацию градиента сглаженного "цветного" поля [7]:

$$n_i = h \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \vec{\nabla} W_\rho(\vec{r}_{ij}, h), \quad (4)$$

где  $\rho_j$  – плотность  $j$ -й частицы;  $W_\rho$  – ядро, используемое для расчета плотности. После этого возможно использовать рассчитанные нормали для того, чтобы определить силу кривизны, действующую на частицу  $i$  со стороны  $j$ :

$$F_c^{ij} = -\sigma m_i (n_i - n_j). \quad (5)$$

Необходимо отметить, что данная сила стремится к 0 в областях с низкой или отсутствующей кривизной, а также внутри жидкости. В то же время она увеличивается по мере увеличения кривизны поверхности.

В итоге результирующая сила поверхностного натяжения может быть записана как:

$$F_{surf}^{ij} = K_{ij} (F_b^{ij} + F_c^{ij}). \quad (6)$$

В (6) применен симметризованный корректирующий множитель [16]:

$$K_{ij} = \frac{2\rho'}{\rho_i + \rho_j}, \quad (7)$$

где  $\rho'$  – так называемая, остаточная плотность моделируемой жидкости (то есть плотность жидкости, взятая при температуре  $i$ -й частицы).

В работе также используется зависимость поверхностного натяжения апиэзона L от температуры, полученная авторами в [17]. Зависимость вязкости от температуры осуществлялась в соответствии с [18] (в зависимости от вязкостных параметров апиэзона L). Для моделирования температурного сжатия использовалась зависимость плотности от температуры:

$$\rho_T = \rho_{T_0} \frac{1}{1 + \beta(T - T_0)}, \quad (8)$$

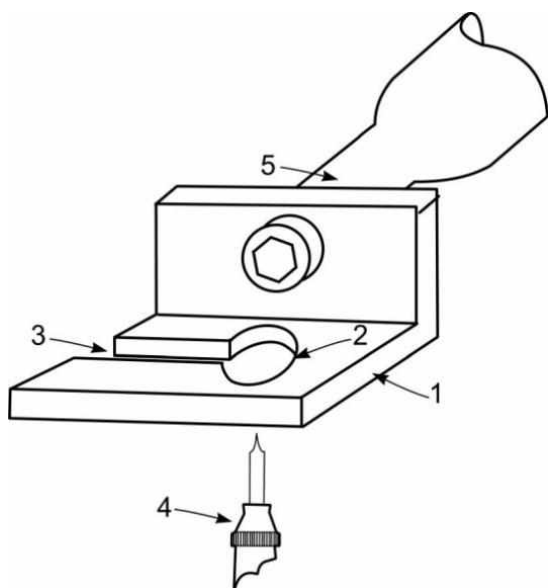
где  $\beta$  – коэффициент объемного расширения апиэзона L;  $T_0$  – начальная температура (293 K).

Также уравнения (2) необходимо дополнить уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla} T) = \chi \Delta T, \quad (9)$$

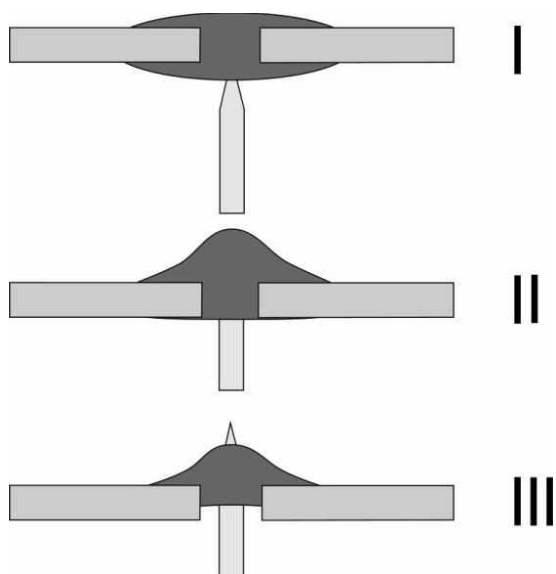
где  $\chi$  – температуропроводность жидкости, определяемая теплопроводностью, удельной теплоемкостью и плотностью материала, температурная зависимость которой определена выражением (8).

При расчетах использовалась модель установки, схема которой приведена на рис. 1. Основой является Г-образная пластина 1, внизу которой просверлено круглое отверстие 2, предназначенное для накопления изолятора апиезона  $L$  в расплавленном состоянии, удерживаемого в кольце за счет сил поверхностного натяжения. Также в пластине 1 выполнен горизонтальный пропил 3, предназначенный для извлечения готовой изолированной иглы из установки. Заготовка иглы 4 подается в отверстие 2 снизу, протыкая расплавленный апиезон, при этом необходимая температура изолятора поддерживается за счет нагревателя 5. Острие вводится в отверстие пластины 2, закрытое изолятором при температуре  $T$ , и выдерживается в пленке до достижения этой температуры. Затем острие выходит за пределы пленки апиезона, подогрев пленки прекращается, острие и пленка подвергаются охлаждению до температуры  $T_0$ . При этом пленка жидкого изолятора (целиком покрывающая острие под действием увеличения вязкости и связанным с ней увеличением силы поверхностного натяжения, а также тепловым сжатием) позволяет острию проткнуть образованную пленку и оголить его кончик. Наконец, готовое острие вытягивается через горизонтальный пропил 3. Схематично стадии процесса изоляции зондирующего острия отражены на рис. 2 (стадии I – III).



- 1 – Г-образная стальная пластина;
- 2 – круглое отверстие для заполнения расплавом изолятора;
- 3 – горизонтальный пропил для извлечения готового зонда;
- 4 – заготовка в держателе, подающаяся снизу;
- 5 – нагревательный элемент

**Рис. 1. Схема установки для нанесения изоляции на платиновую заготовку**



- I – начальная стадия введения заготовки в расплав; II – стадия задержки острия в расплаве для его охлаждения;
- III – завершающая стадия охлаждения острия, сопровождающаяся обнажением кончика

**Рис. 2. Стадии процесса изоляции зондирующих острий**

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основным критерием качества сформированных острий является размер (в данной работе – высота) конусовидного кончика, оголяющегося в процессе застывания изоляционного материала. Высота (а следовательно, и общая площадь поверхности неизолированной части острия) определяет величину информационно не задействованного тока, протекающего между изучаемой поверхностью и острием. Необходимо, чтобы величина этого тока была минимальной. Технологии изготовления игл СЭТМ в настоящее время предполагают получение острий с размерами, исчисляющимися десятками микрометров и, при этом уменьшение даже на несколько микрон острия позволяет достигать существенного преимущества при проведении СЭТМ-исследований.

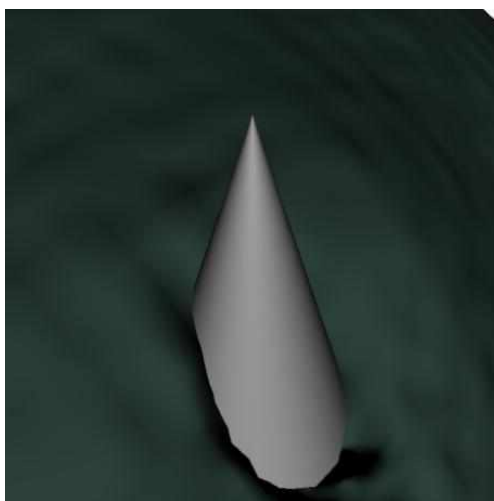
При изучении влияния параметров численного эксперимента на его результат значение каждого исследуемого параметра менялось в некотором диапазоне, при этом значения других параметров фиксировались в определенной "базовой" точке.

В работе исследовалась зависимость высоты сформированного изолированного острия от следующих основных параметров численного эксперимента:

- острота кончика (угол заточки иглы; варьировался в диапазоне 20 – 60 градусов, базовое значение 45 градусов);
- начальная температура расплава (конечная температура всегда  $T_0 = 293$  К; варьировалась в диапазоне 333 – 353 К, базовое значение 343 К);
- диаметр входного отверстия 2 (рис. 1) (варьировался в диапазоне 0.4 – 0.8 см, базовое значение 0.6 см);
- диаметр проволоки-заготовки (варьировался в диапазоне 0.15 – 0.25 мм, базовое значение 0.2 мм).

Выбор данных параметров обусловлен их существенным влиянием на качество результирующего изолированного острия. Так угол заточки и диаметр проволоки определяют количество налипающего изолятора и силу взаимодействия его и заготовки. Диаметр входного отверстия Г-образной пластины существенно регулирует толщину расплава в отверстии. Начальная же температура изолятора определяет скорость остывания и затвердевания и, тем самым, характер оголившегося кончика острия.

Пример результата моделирования при соблюдении базовых параметров численного эксперимента (угол заточки – 20°; начальная температура расплава – 343 К; диаметр входного отверстия пластины – 0.6 см; диаметр проволоки-заготовки – 0.20 мм) представлен на рис. 3. Высота сформированного острия – 55 мкм. Результаты проведенных экспериментов приведены в таблице.



**Рис. 3. Изображение оголившегося в результате остывания расплава зондирующего острия**

**Влияние параметров численного моделирования на высоту полученного после остывания расплава зондирующего острия**

Угол заточки острия, град.	Начальная температура расплава, К	Диаметр отверстия, см	Диаметр проволоки-заготовки, мм	Высота сформированного острия, мкм
20	343	0.6	0.20	38
45				55
60				95
45	333	0.6	0.20	24
	343			55
	353			67
45	343	0.4	0.20	24
		0.6		55
		0.8		83
45	343	0.6	0.15	56
			0.20	55
			0.25	28

Анализ изображений неизолированных кончиков сформированных зондирующих острий показал, что все 4 изменяемые параметры имеют следующее существенное влияние на размеры и симметричность острия:

- изменение угла заточки от 20 до 60 градусов ведет к появлению относительно симметричного кончика, при этом его длина пропорциональна углу заточки;
- увеличение начальной температуры расплава приводит к увеличению высоты его неизолированной части;
- диаметр входного отверстия Г-образной пластины при увеличении приводит к увеличению неравномерности растекания расплава по поверхности пластины, а также к изменению его толщины в кольце. Изменение этих факторов порождает увеличение асимметрии и длины неизолированного кончика с увеличением диаметра входного отверстия;
- увеличение диаметра проволоочной заготовки приводит к уменьшению высоты неизолированного кончика.

В целом, наиболее оптимальным для изготовления изолированных СТМ-зондов представляется использование проволоочной заготовки большой толщины и с малым углом заточки, с невысокой начальной температурой расплава, малым диаметром входного отверстия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nagahara L. A., Thundat T., Lindsay S. M. Preparation and characterization of STM tips for electrochemical studies // Review of Scientific Instruments, 1989, vol. 60, iss. 10, pp. 3128-3130.
2. Липанов А. М., Тюриков А. В., Гуляев П. В., Шелковников Е. Ю., Осипов Н. И. Исследование влияния геометрических характеристик зондирующего острия электрохимического СТМ на величину регистрируемого им фарадеевского тока // Химическая физика и мезоскопия. 2011. Т. 13, № 2. С. 215-219.
3. Шелковников Е. Ю., Гуляев П. В., Гафаров М. Р., Кизнерцев С. Р., Осипов Н. И., Тюриков А. В. Технология изоляции измерительных игл электрохимического туннельного микроскопа // Химическая физика и мезоскопия. 2011. Т. 13, № 4. С. 615-618.
4. Жуйков Б. Л., Шелковников Е. Ю., Тюриков А. В., Кизнерцев С. Р., Осипов Н. И. Исследование макроскопической формы зондов СТМ при их изготовлении методом механического среза // Химическая физика и мезоскопия. 2015. Т. 17, № 1. С. 138-142.

5. Тюриков А. В., Шелковников Е. Ю., Жуйков Б. Л. Особенности применения многопараметрических потенциалов межчастичного взаимодействия для моделирования изготовления зондов СТМ // *Материалы международной НТК "Измерения, контроль, информатизация"*. Барнаул: АлтГТУ, 2015. С. 53-56.
6. Жуйков Б. Л., Шелковников Е. Ю., Тюриков А. В., Гуляев П. В. Применимость метода гидродинамики сглаженных частиц для исследования процесса изготовления платиновых СТМ-зондов механическим способом // *Химическая физика и мезоскопия*. 2018. Т. 20, № 1. С. 145-150.
7. Жуйков Б. Л., Шелковников Е. Ю., Тюриков А. В., Гуляев П. В. Трехмерное SPH-моделирование процесса изготовления платиновых СТМ-зондов с использованием искусственных вязкости и напряжения // *Химическая физика и мезоскопия*. 2018. Т. 20, № 4. С. 623-627.
8. Шелковников Е. Ю., Тюриков А. В., Жуйков Б. Л., Липанов С. И. Исследование влияния процесса теплопереноса на геометрическую форму острий СТМ-зондов в процессе их травления // *Химическая физика и мезоскопия*. 2014. Т. 16, № 4. С. 632-636.
9. Тюриков А. В., Шелковников Е. Ю., Гуляев П. В., Жуйков Б. Л., Липанов С. И. Моделирование электрохимической стадии процесса формирования острий СТМ-зондов // *Химическая физика и мезоскопия*. 2016. Т. 18, № 2. С. 323-330.
10. Monaghan J. J. Simulating Free Surface Flows with SPH // *Journal of Computational Physics*, 1994, vol. 110, iss. 2, pp. 399-406.
11. Medin S. A., Parshikov A. N. Development of Smoothed Particle Hydrodynamics Method and its Application in the Hydrodynamics of Condensed Matter // *High Temperature*, 2010, vol. 48, no. 6, pp. 926-933.
12. Monaghan J. J. An introduction to SPH // *Computer Physics Communication*, 1998, vol. 48, iss. 1, pp. 89-96.
13. Randles P. W., Libersky L. D. Smoothed particle hydrodynamics: Some recent improvements and applications // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1996, vol. 139, iss. 1-4, pp. 375-408.
14. Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1992, vol. 30, iss. 1, pp. 543-574.
15. Monaghan J. J. On the problem of penetration in particle methods. *Journal of Computational Physics*, 1989, vol. 82, iss. 1, pp. 1-15.
16. Akinci N., Akinci G., Teschner V. Versatile Surface Tension and Adhesion for SPH Fluids // *Journal ACM Transactions on Graphics*, 2013, vol. 32, iss. 6, Article No.: 182.
17. Шелковников Е. Ю., Тюриков А. В., Гуляев П. В., Жуйков Б. Л., Липанов С. И. Особенности применения метода частиц для моделирования процесса изоляции зондирующих острий электрохимического СТМ // *Химическая физика и мезоскопия*. 2016. Т. 18, № 1. С. 154-159.
18. Фогельсон Р. Л., Лихачев Е. Р. Температурная зависимость вязкости // *Журнал технической физики*. 2001. Т. 71, № 8. С. 128-131.

---

## **Simulation of Application of an Insulating Layer to the Probe of a Scanning Electrochemical Tunnel Microscope**

Shelkovnikov E. Yu., Tyurikov A. V., Gulyaev P. V., Zhuykov B. L.

Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

**SUMMARY.** The article deals with the study of the isolation model of platinum probes for scanning electrochemical tunnel microscope. Such studies are necessary to develop a technique for isolating the tips, allowing to obtain an uninsulated tip with the desired geometric parameters. The three-dimensional method of smoothed particles hydrodynamics is applied for modeling, taking into account temperature, temperature dependence of density, viscosity and surface tension. The model includes immersion of the blank in a ring filled with melted insulator "apiezon L". After that, the temperature of the insulator is lowered to the freezing point, exposing the uninsulated part of its tip. A large number of numerical studies have been carried out to study the influence of such parameters as: sharpening angle of the blank, initial temperature of insulator, the diameter of the inlet hole of the installation, the diameter of the blank wire. In this case, each of the parameters varies within certain limits. The optimal values of these parameters for obtaining the necessary

geometric characteristics of the isolated tip are revealed. The positive effect of reducing the sharpening angle of the blank, the initial insulator temperature, the diameter of the inlet hole of the installation, as well as increasing the diameter of the platinum wire on the size of the resulting uninsulated tip. was established.

**KEYWORDS:** scanning electrochemical tunnel microscope, platinum tip, insulated probe, smoothed particles hydrodynamics method.

## REFERENCES

1. Nagahara L. A., Thundat T., Lindsay S. M. Preparation and characterization of STM tips for electrochemical studies. *Review of Scientific Instruments*, 1989, vol. 60, iss. 10, pp. 3128-3130. <https://doi.org/10.1063/1.1140590>
2. Lipanov A. M., Tyurikov A. V., Gulyaev P. V., Shelkovnikov E. Yu., Osipov N. I. Issledovanie vliyaniya geometricheskikh harakteristik zondiruyuschego ostriya elektrohimičeskogo STM na veličinu registriruemogo im faradeevskogo toka [Investigation of the effect of the geometric characteristics of the probe of the electrochemical STM on the value of the Faradean current recorded by him]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopija* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2011, vol. 13, no. 2, pp. 215-219.
3. Shelkovnikov E. Yu., Gulyaev P. V., Gafarov M. R., Kiznertsev S. R., Osipov N. I., Tyurikov A. V. Tekhnologiya izolyacii izmeritelnyh igl elektrohimičeskogo tunnelnogo mikroskopa [Technology of insulation of measuring tips of electrochemical tunnel microscope]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopija* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2011, vol. 13, no. 4, pp. 615-618.
4. Zhuykov B. L., Shelkovnikov E. Yu., Tyurikov A. V., Kiznertsev S. R., Osipov N. I. Issledovanie makroskopicheskoj formy zondov STM pri ih izgotovlenii metodom mekhanicheskogo sreza [Studying the macroscopic shape of the STM-probe at its producing with a method of the mechanical cutting]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopija* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2015, vol. 17, no. 1, pp. 138-142.
5. Tyurikov A. V., Shelkovnikov E. Yu., Zhuykov B. L. Osobennosti primeneniya mnogoparametricheskikh potencialov mezhchastichnogo vzaimodejstviya dlya modelirovaniya izgotovleniya zondov STM [Peculiarities of application of multiparametric potentials of interparticle interaction for simulation of production of CTM probes]. *Materialy mezhdunarodnoj NTK "Izmereniya, kontrol, informatizaciya"* [Materials of the international STC "Measurements, control, informatization"]. Barnaul: AltGTUPubl., 2015, pp. 53-56.
6. Zhuykov B. L., Shelkovnikov E. Yu., Tyurikov A. V., Gulyaev P. V. Primenimost' metoda gidrodinamiki sglazhennyh chastic dlya issledovaniya processa izgotovleniya platinovyh STM-zondov mekhanicheskim sposobom [Applicability of the smoothed particles hydrodynamics method for the research of process of mechanical manufacture of the platinum STM-probes]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopija* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2018, vol. 20, no. 1, pp. 145-150.
7. Zhuykov B. L., Shelkovnikov E. Yu., Tyurikov A. V., Gulyaev P. V. Trekhmernoe SPH-modelirovanie processa izgotovleniya platinovyh STM-zondov s ispol'zovaniem iskusstvennyh vyazkosti i napryazheniya [3D SPH-model for operation of manufacture of platinum STM-probes with use the artificial viscosity and stress]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopija* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2018, vol. 20, no. 4, pp. 623-627.
8. Tyurikov A. V., Shelkovnikov E. Yu., Zhuykov B. L., Lipanov S. I. Issledovanie vliyaniya processa teploperenosa na geometricheskuyu formu ostrij STM-zondov v processe ih travleniya [Study of the influence of heat transfer on the geometric forms of the tip of STM probe while their etching]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopija* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2014, vol. 16, no. 4, pp. 632-636.
9. Shelkovnikov E. Yu., Tyurikov A. V., Gulyaev P. V., Zhuykov B. L., Lipanov S. I. Modelirovanie ehlektrohimičeskoi stadii processa formirovaniya ostrij STM-zondov [Modelling of the electrochemical stage of process of formation the probes of STM]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopija* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2016, vol. 18, no. 2, pp. 323-330.
10. Monaghan J. J. Simulating Free Surface Flows with SPH. *Journal of Computational Physics*, 1994, vol. 110, iss. 2, pp. 399-406. <https://doi.org/10.1006/jcph.1994.1034>
11. Medin S. A., Parshikov A. N. Development of Smoothed Particle Hydrodynamics Method and its Application in the Hydrodynamics of Condensed Matter. *High Temperature*, 2010, vol. 48, no. 6, pp. 926-933. <https://doi.org/10.1134/S0018151X10060210>
12. Monaghan J. J. An introduction to SPH. *Computer Physics Communications*, 1998, vol. 48, iss. 1, pp. 89-96. [https://doi.org/10.1016/0010-4655\(88\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0010-4655(88)90026-4)



13. Randles P. W., Libersky L. D. Smoothed particle hydrodynamics: Some recent improvements and applications. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 139, iss. 1-4, pp. 375-408. <https://doi.org/10.1016/S0045-7825%2896%2901090-0>
14. Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1992, vol. 30, iss. 1, pp. 543-574. <https://doi.org/10.1146/annurev.aa.30.090192.002551>
15. Monaghan J. J. On the problem of penetration in particle methods. *Journal of Computational Physics*, 1989, vol. 82, iss. 1, pp. 1-15. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(89\)90032-6](https://doi.org/10.1016/0021-9991(89)90032-6)
16. Akinci N., Akinci G., Teschner V. Versatile Surface Tension and Adhesion for SPH Fluids. *Journal ACM Transactions on Graphics*, 2013, vol. 32, iss. 6, Article No.: 182. <https://doi.org/10.1145/2508363.2508395>
17. Shelkovnikov E. Yu., Tyurikov A. V., Gulyaev P. V., Zhuykov B. L., Lipanov S. I. Osobennosti primeneniya metoda chastic dlya modelirovaniya processa izolyacii zondiruyushchih ostrij ehlektrohimicheskogo STM [Features of application of the method of particles for modelling the process of isolation probes for electrochemical STM]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2016, vol. 18, no. 1, pp. 154-159.
18. Fogel'son R. L., Likhachev E. R. Temperature dependence of viscosity. *Technical Physics*, 2001, vol. 46, no. 8, pp. 1056-1059. <https://doi.org/10.1134/1.1395131>
- 

*Шелковников Евгений Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института механики УдмФИЦ УрО РАН, профессор кафедры "Вычислительная техника" ИЖГТУ имени М.Т. Калашикова, e-mail: [evshelk@mail.ru](mailto:evshelk@mail.ru)*

*Тюриков Александр Валерьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт механики УдмФИЦ УрО РАН, e-mail: [alex.tyurikov@mail.ru](mailto:alex.tyurikov@mail.ru)*

*Гуляев Павел Валентинович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт механики УдмФИЦ УрО РАН, e-mail: [lucac@e-izhevsk.ru](mailto:lucac@e-izhevsk.ru)*

*Жуйков Богдан Леонидович, исполнитель темы УдмФИЦ УрО РАН, e-mail: [fastblood@mail.ru](mailto:fastblood@mail.ru)*