

## Применение метода испарения вещества высокоэнергетическим пучком электронов для получения нанопорошка вольфрама

Д. Ю. Труфанов<sup>1</sup>, К. В. Зобов<sup>1</sup>, С. П. Бардаханов<sup>1</sup>  
А. П. Завьялов<sup>2</sup>, И. К. Чакин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН  
Новосибирск, Россия*

<sup>2</sup> *Дальневосточный федеральный университет  
Владивосток, Россия*

<sup>3</sup> *Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН  
Новосибирск, Россия*

### Аннотация

Метод получения нанопорошка испарением высокоэнергетическим пучком электронов имеет большой потенциал применения для тугоплавких веществ, так как пучок электронов дает возможность получить высокую плотность мощности в пятно взаимодействия не больше 3–4 см<sup>2</sup> и, как следствие, высокие градиенты температуры. Ускоритель и пучок электронов имеет высокий КПД передачи энергии от электросети в испарение (до 70 %). Электронный пучок не вносит загрязнения и не избирателен к материалу. Специфика работы с ускорителем электронов связана с радиационным излучением, вызванным торможением электронов и большими температурами. Эти явления значительно осложняют наблюдение за процессами, происходящими в зоне испарения. Поэтому в настоящее время метод требует развития и адаптации к конкретным материалам. В данной работе исследовался процесс получения наноразмерного порошка вольфрама указанным методом. Экспериментально апробированы методы, позволяющие получать данные о процессах синтеза нанопорошков по калориметрии зоны испарения и измерениям уровня радиации вблизи нее. Отработана технология и определены параметры полученных нанопорошков вольфрама. Показаны пути увеличения производительности данного метода применительно к вольфраму.

### Ключевые слова

нанопорошок, вольфрам, испарение, электронный пучок, ускоритель электронов, радиация

### Источник финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проектов № 18-29-11044 «Синтез и характеристика керамических нанопорошков оксида иттрия» и № 16-31-60076 «Оптимизация технологических параметров испарения порошков оксидов релятивистским пучком электронов».

### Для цитирования

Труфанов Д. Ю., Зобов К. В., Бардаханов С. П., Завьялов А. П., Чакин И. К. Применение метода испарения вещества высокоэнергетическим пучком электронов для получения нанопорошка вольфрама // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 4. С. 17–27. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-4-17-27

# Application of the Method of Evaporation of a Substance by High-Energy Electron Beam to Produce Tungsten Nanopowder

D. Yu. Trufanov<sup>1</sup>, K. V. Zobov<sup>1</sup>, S. P. Bardakhanov<sup>1</sup>  
A. P. Zavyalov<sup>2</sup>, I. K. Chakin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS  
Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>2</sup> *Far Eastern Federal University  
Vladivostok, Russian Federation*

<sup>3</sup> *Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS  
Novosibirsk, Russian Federation*

## Abstract

The method of producing nanopowder by evaporation by a high-energy electron beam has a great potential for refractory substances, since the electron beam makes it possible to obtain high the power density in the interaction spot is not more than 3–4 cm<sup>2</sup> and, as a result, high temperature gradients. The accelerator and electron beam have a high efficiency of transferring energy from the power grid to evaporation (up to 70 %). The electron beam does not introduce pollution and is not selective to the material. Work specifics with an electron accelerator is associated with radiation caused by electron deceleration and high temperatures. These phenomena greatly complicate the monitoring of processes occurring in the evaporation zone. Therefore, at present, the method requires development and adaptation to specific materials. In this work, we studied the process of obtaining nanosized tungsten powder by the indicated method. Experiments were tested that allow obtaining data on the processes of nanopowder synthesis by calorimetry of the evaporation zone and measurements of the radiation level near it. The technology was developed and the parameters of the obtained tungsten nanopowders were determined. Showing ways to increase productivity This method is applied to tungsten.

## Keywords

nanopowder, tungsten, evaporation, electron beam, electron accelerator, radiation

## Funding

This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research in the framework of projects no. 18-29-11044 and no. 16-31-60076

## For citation

Trufanov D. Yu., Zobov K. V., Bardakhanov S. P., Zavyalov A. P., Chakin I. K. Application of the Method of Evaporation of a Substance by High-Energy Electron Beam to Produce Tungsten Nanopowder. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 4, p. 17–27. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-4-17-27

## Введение

Одной из актуальных задач производства нанопорошков является получение наночастиц тугоплавких материалов. В данной статье предлагается использование универсального метода получения нанопорошков при помощи испарения непрерывным высокоэнергетическим пучком электронов с последующей конденсацией паров в газе-носителе при атмосферном давлении [1] для получения наночастиц вольфрама.

Создание и развитие методов производства часто приводит к получению нанопорошков, сходных по размерам и составу, но различных по свойствам. Это может приводить как к расширению области их применения, так и к невозможности применения в уже известных процессах. Интерес к наноразмерным порошкам поднимает все больше вопросов об их классификации и свойствах, на которые может оказать влияние метод их производства [2].

В связи с этим возникает вопрос о контроле параметров производственного процесса и определении их влияния на количество и свойства получаемых наночастиц. В случае получения нанопорошков при помощи испарения исходного сырья пучком высокоэнергетических электронов радиация и температура мешают непосредственному наблюдению за параметрами процесса. Не представляется возможным измерять температуру в зоне испарения как контактными, так и пирометрическими методами. Чтобы лучше представлять процессы, проис-

ходящие в области плавления материала, необходимо развивать косвенные методы анализа параметров процесса в зоне испарения.

Малый размер наночастиц также препятствует измерению параметров получаемого продукта непосредственно во время его синтеза или фильтрации. Тем не менее исследование полученного наноматериала методами ПЭМ и рентгеноסקопии показывает множество особенностей структуры, которые говорят об условиях в испарительной камере.

Данная работа посвящена апробации метода испарения вещества электронным пучком для случая получения нанопорошков вольфрама. Описываются важные элементы производственного процесса и характеристики получаемых порошков.

### Методы и оборудование

Работы проводились в ИЯФ СО РАН на экспериментальном стенде на базе промышленного ускорителя электронов ЭЛВ-6 предназначенным для обработки материалов концентрированным электронным пучком, выпущенным в атмосферу. Ускоритель имеет ускоряющее напряжение 1,4 МэВ. Генерируемый ускорителем электронный пучок фокусируется и выходит в атмосферу через отверстие площадью 2–3 мм<sup>2</sup>. Ускоритель имеет уникальную систему выпуска сфокусированного пучка электронов в атмосферу, что позволяет без существенных потерь энергии получать на выходе из ускорителя мощность пучка до 100 кВт. Так как ускорение электронов происходит при давлении 10<sup>-6</sup> Торр, то для поддержания необходимого градиента давления между ускорительной трубкой и выходным отверстием электронный пучок проходит через систему дифференциальной вакуумной откачки, состоящей из трех ступеней [3].

В данной работе электронный пучок используется в качестве нагревательного элемента для процесса испарения вольфрамового материала. Длина свободного пробега электронов пучка в воздушной атмосфере составляет 6 м, в работе же исследовалось воздействие пучка на вольфрамовую мишень на расстоянии 10–15 см, это позволяет нам пренебрегать потерями энергии электронов при взаимодействии с молекулами газа в испарительно-конденсационной камере (сублиматоре). С другой стороны, газ при атмосферном давлении, который не является существенной преградой для пучка электронов, является хорошим носителем для отвода паров испаряемого вещества. При взаимодействии пара с холодным газом происходит резкое охлаждение пара, препятствующее росту частиц получаемого нанопорошка, использование теплопроводящего газа при давлении, близком к атмосферному, позволяет существенно увеличить производительность установки по получению наноразмерных порошков. Чтобы защитить выходное отверстие ускорителя от попадания на него продуктов испарения и кипения сырья, между выпускным отверстием и испаряемым сырьем находится камера повышенного давления, из которой часть газа попадает в выпускное отверстие и откачивается системой насосов, а другая часть попадает в сублиматор, создавая поток газа, отталкивающий пары испаряемых веществ.

Несмотря на преимущества применения ускорителя в качестве нагревателя, особенность, обусловленная тормозным излучением электронов, является основным препятствием для непосредственного наблюдения за процессами, происходящими в сублиматоре. Помещение должно иметь необходимую радиационную защиту, а измерительные и регулирующие устройства – радиационную стойкость. Энергия электронов такова, что возникновение изотопов элементов исключено, и наличие тормозного излучения приводит лишь к трудностям, связанным непосредственно с радиацией, но не влечет радиационной активации продукта. Тормозное излучение способствует разрушению молекул кислорода в воздухе вокруг реактора с последующим образованием озона. Это препятствует работе персонала непосредственно после прекращения генерации электронного пучка, требует дополнительного времени для удаления озона системой вентиляции и/или использования средств индивидуальной защиты (противогазов).

Тормозное излучение при взаимодействии электронов с вольфрамом может быть использовано для наблюдения процесса. Уровень ионизирующего излучения контролировался с помощью датчиков радиации, основанных на фотодиоде ФД-24К. Фотодиод подключается в запирающем направлении потенциала и закрывается светонепроницаемой оболочкой. Таким образом, на фоточувствительный элемент могут попасть лишь фотоны тормозного излучения. При их попадании на фотодиод происходит формирование носителей заряда, и в схеме появляется ток, регистрируемый в виде напряжения на последовательно подключенном сопротивлении. Датчик был тарирован в предыдущих экспериментах. При подаче запирающего напряжения 10 В и подключении измерительного сопротивления 11 кОм уровня чувствительности достаточно, чтобы различать изменение толщины слоя материала при размещении датчика соосно с электронным пучком за слоем испаряемого материала.

Сила тока пучка электронов регулируется штатными системами ускорителя, расход газа – контрольно-измерительными системами GFC Aalborg (США). Для измерения температуры охлаждающей сублиматор жидкости использовалась система дополнительно тарированных термодатчиков ТМ-106 (Россия).

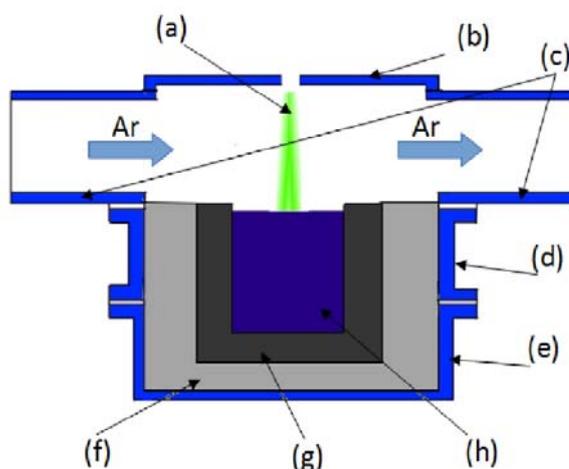
Для исследования качества нанопорошка применялся рентгенофазовый анализ на рентгеновском дифрактометре HZG-4 (Freiberger Präzisionsmechanik, Германия) при использовании  $Co K_{\alpha}$  линии. Для экспресс-оценки размерных характеристик нанопорошка использовалось измерение удельной поверхности по многоточечному методу БЭТ при адсорбции и десорбции азота при температуре жидкого азота на приборе Sorbi-M (Meta, Россия). Определение геометрии частиц порошка и более тщательное изучение их размерных характеристик проведено при анализе изображений, полученных методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на JEM-100CX (Япония, ускоряющее напряжение 100 кВ).

Элементный примесный состав сырья и полученного нанопорошка определялся методом атомно-эмиссионной спектроскопии на спектрометре с индуктивно связанной плазмой iCAP-6500 Duo (Thermo Scientific, США).

### Экспериментальная часть

Для изучения воздействия пучка высокоэнергетических электронов на мишень были проведены работы по испарению вольфрамовой мишени. С испарением такого тугоплавкого вещества возникает ряд трудностей. Первое – необходимость изолировать расплавленный материал от стенок сублиматора, так как водяное охлаждение его стальных стенок не в состоянии справиться с воздействием кипящего вольфрама. Кроме того, нужно понимать, что вольфрам, как и все металлы, имеет довольно высокую теплопроводность. Для того чтобы избежать разрушения сублиматора, вольфрамовый порошок был помещен в графитовый тигель, а сам графитовый тигель – в графитовый порошок. Это было сделано, чтобы замедлить передачу тепла из зоны воздействия на мишень электронным пучком к стенкам сублиматора. Тем не менее такое устройство испарительной камеры не решало все проблемы, связанные с тугоплавкостью вольфрама, так как температура кипения вольфрама (5 555 °С) значительно выше температуры сублимации графита (4 200 °С). В связи с этим было решено воздействовать электронным пучком на вольфрам непродолжительное время, чтобы избежать разрушения тигля. На рис. 1 представлена схема сублиматора, в котором проводились эксперименты.

Все стенки сублиматора были водоохлаждаемыми, на каждый из контуров водяного охлаждения были установлены датчики температуры и расхода. Такая схема позволяет не только вовремя предотвращать необратимые разрушения в сублиматоре, но и получать данные о происходящих в нем процессах. Отметим, что пары вольфрама, распределенные в атмосфере, взрывоопасны из-за большой площади реакции окисления, поэтому, чтобы получать наноразмерные порошки таких веществ, испарение необходимо проводить в инертной атмосфере, в данной работе использовался газ аргон.



*Рис. 1.* Схема реактора для испарения вольфрама:  
*a* – электронный пучок; *b* – верхняя секция водоохлаждаемая; *c* – секция с патрубками для отводящего газового потока; *d* – нижняя секция водоохлаждаемая;  
*e* – дно испарительной камеры водоохлаждаемое; *f* – графитовый порошок;  
*g* – графитовый тигель; *h* – вольфрамовое сырье

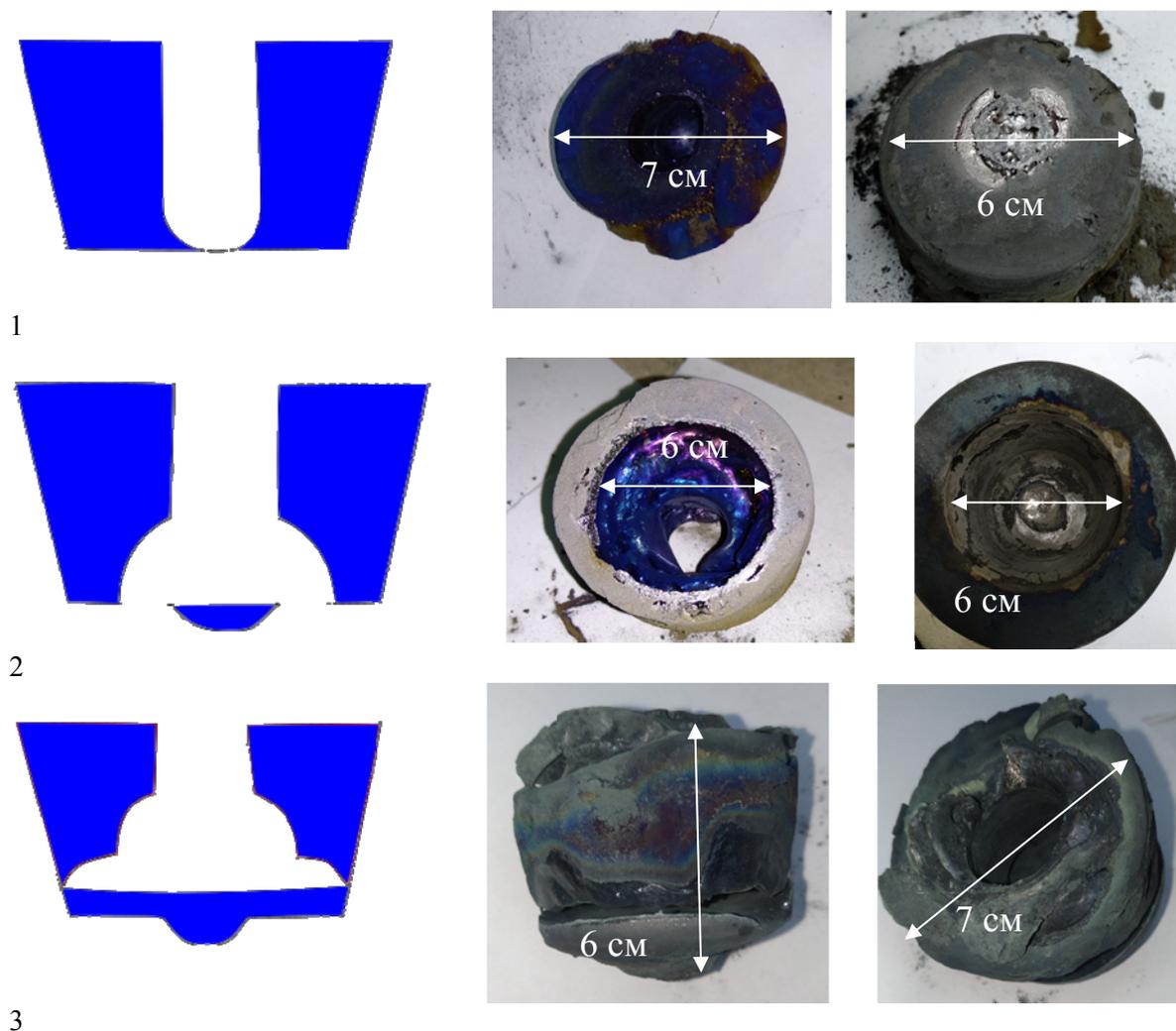
*Fig. 1.* Scheme of the reactor for the evaporation of tungsten:  
*a* – the electron beam; *b* – the upper section is water-cooled; *c* – section with branch pipe for exhaust gas flow; *d* – lower section water-cooled; *e* – the bottom of the evaporation chamber is water-cooled; *f* – graphite powder; *g* – a graphite melting pot; *h* – tungsten raw materials

Первым этапом в работе было установление характерных картин плавления вольфрамового порошка под действием пучка высокоэнергетических электронов. Для этого материал нагревался электронным пучком, а после определенного времени, которое варьировалось, ускоритель останавливался, и проводилось визуальное наблюдение результатов воздействия. Были получены слитки из вольфрама, определяющие характерные картины плавления в сублиматоре, которые зависели от времени воздействия и от мощности, генерируемой ускорителем. Полученные слитки из порошкового вольфрамового материала представлены на рис. 2. Видно, что форма слитка существенно зависит от времени воздействия электронного пучка на материал и от мощности, с которой электронный пучок воздействует на мишень.

В ходе этой серии экспериментов разрушение графитового тигля не происходило даже при достижении пучком дна тигля. Было установлено три основных характерных режима воздействия на мишень: испарение и плавление вещества по ходу движения электронного пучка; достижение пучком дна тигля и плавление вольфрама около дна, испарение графита в зоне контакта с электронным пучком; плавление вольфрамового слитка около дна тигля, рост уровня расплавленного металла на дне тигля. Эти данные дают нам качественную картину процессов, происходящих в сублиматоре, но не позволяют сделать каких-либо выводов о временных интервалах, в которые происходят те или иные процессы. А это необходимо знать для своевременного предотвращения разрушения тигля или стенок сублиматора.

Качественные данные о временных процессах, происходящих в сублиматоре, были получены при помощи измерения температуры и расхода воды от охлаждающих сублиматор контуров. На рис. 3 представлен пример калориметрии реактора. Видно, что верхняя секция и секция с патрубками, получающие тепло главным образом от теплового излучения материала, и зависимость отводимой мощности имеет форму, соответствующую мощности подводимой пучком электронов, в то время как остальные части сублиматора имеют плавный рост отводимой водой мощности с заметным запаздыванием по времени. По этим данным

нет возможности судить о разрушении тигля, но резкий рост отводимого тепла с нижних контуров будет свидетельствовать о присутствии расплавленного вольфрама вблизи стенок сублиматора.



*Рис. 2.* Схематическое изображение слитка вольфрама, образованного в тигле после испарения вещества при воздействии на исходное сырье электронным пучком:

- 1 – ток пучка 13 мА, время воздействия 5 минут (фото – вид слитка сверху и снизу);  
 2 – ток пучка 15 мА, время воздействия 5 минут (фото – вид слитка снизу и тигля сверху после изъятия слитка); 3 – ток пучка 15 мА, время воздействия 6 минут (фото – вид слитка сбоку и сверху)

*Fig. 2.* Schematic representation of a tungsten ingot formed in a crucible after evaporation of a substance when exposed to the raw material by an electron beam:  
 1 – beam current 13 mA, exposure time 5 minutes (photo – view of the ingot from above and below);  
 2 – beam current 15 mA, exposure time 5 minutes (photo – view of the ingot from below and the crucible from above after removal of the ingot); 3 – beam current 15 mA, exposure time 6 minutes (photo – view of the ingot side and top)

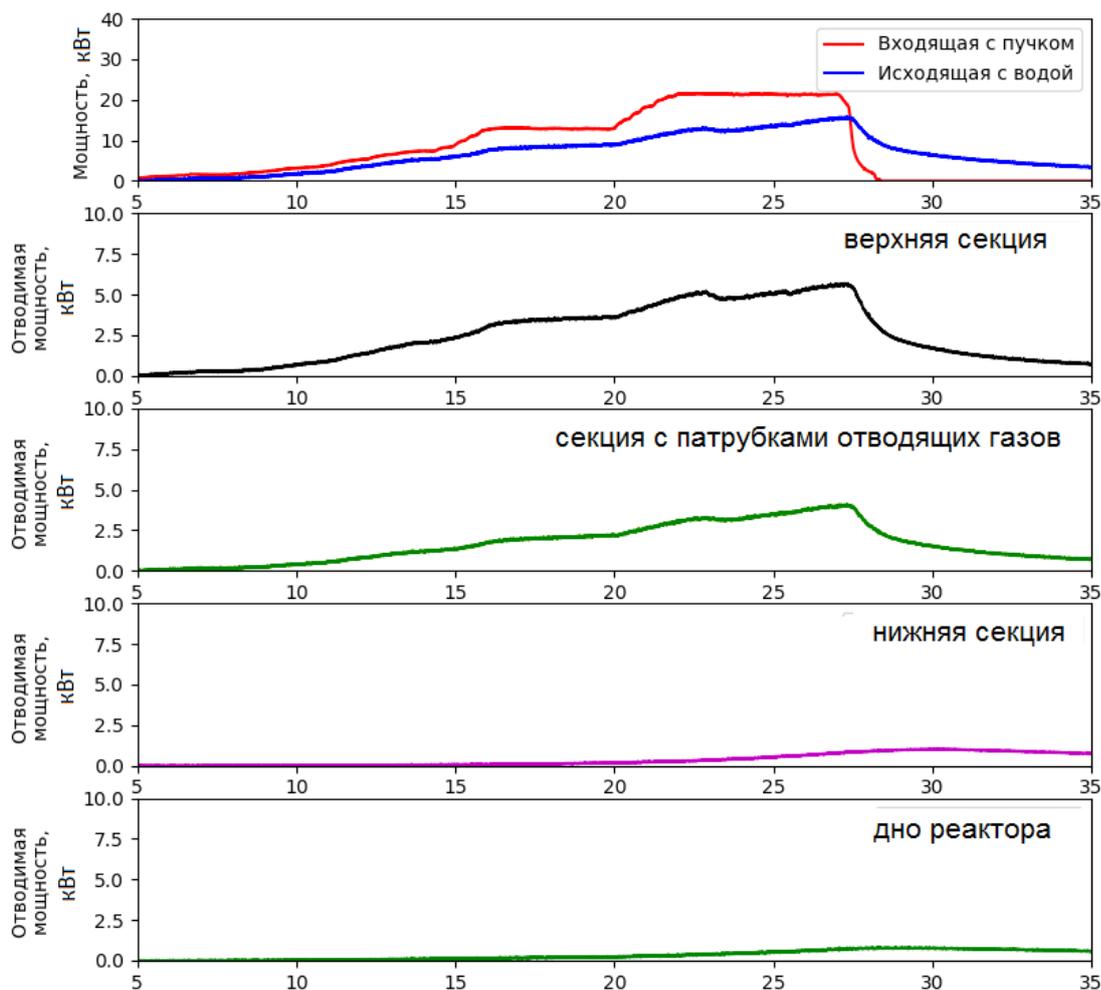


Рис. 3. Измерение тепла отводимого водой и сопоставление его с мощностью пучка  
 Fig. 3. Measurement of heat removed by water and its comparison with the power of the beam

Для еще более детального анализа использовался датчик гамма-радиации, измеряющий тормозное излучение электронов. Датчик помещался под сублиматором соосно воздействию на мишень электронному пучку, и его показания регистрировали толщину слоя вольфрама, которая отделяет датчик от места торможения электронов. На рис. 4 представлены данные об испарении вольфрама в течение 6 минут при 15 мА тока пучка (общее время эксперимента, включая нагрев материала, около 25 минут).

Видно, что вначале достаточно продолжительное время толщина слоя порошка вольфрама, отделяющего датчик от пучка электронов, остается постоянной. Эту стадию мы связываем с нагреванием исходного материала. Далее происходит плавный рост, связанный с тем, что вольфрам начинает закипать, испаряя и выплескивая капли вещества вдоль канала воздействия пучка. Если остановить нагрев в этот момент, мы получим слиток, похожий на тот, что изображен на рис 2, 1. С какого-то момента начинается взрывной рост, на графике это соответствует резкому пику. Этот процесс мы связываем с образованием и углублением кра-

тера в испаряемом материале. Дальнейшее плавное падение уровня радиации обусловлено плавлением стенок вольфрамового слитка и стеканием вольфрама на дно тигля.

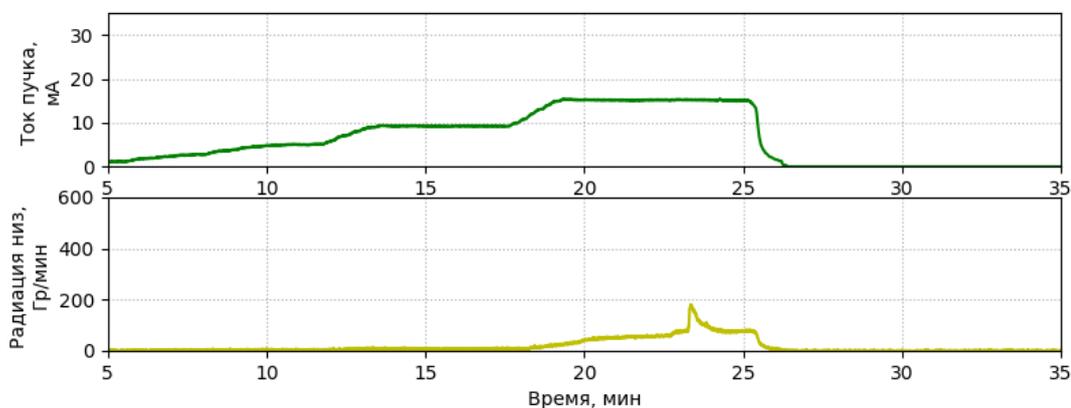


Рис. 4. Сопоставление данных мощности энергии, подводимой пучком электронов, и данных по гамма-излучению под реактором

Fig. 4. Comparison of the power data of the energy supplied by the electron beam, and data on gamma radiation under the reactor

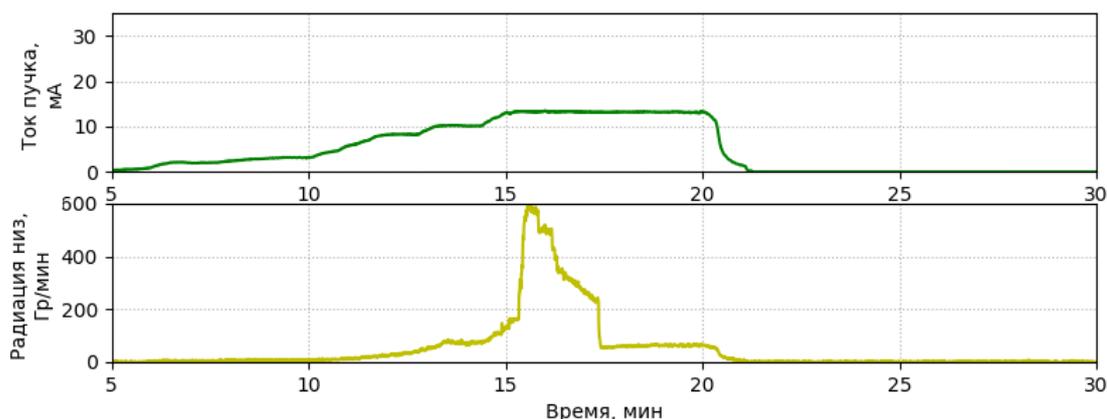


Рис. 5. Проверка данных, полученных при помощи датчика гамма-радиации в конфигурации с более высоким тиглем

Fig. 5. Verification of data obtained using a gamma radiation sensor in configuration with a higher crucible

Для проверки результата и получения более наглядной картины был изготовлен тигель с более высокими стенками, что позволило увеличить толщину слоя вольфрама, отделяющего пучок электронов от датчика радиации. В этом эксперименте мы наблюдали точно такую же картину: экспоненциальный рост уровня радиации, достижение пучком дна тигля, частичное разрушение и испарение дна тигля, плавное повышение уровня расплавленного вольфрама. Но в данном случае было замечено резкое падение уровня радиации на стадии повышения уровня расплавленного вольфрама (рис. 5), этот этап мы объясняем падением стенок еще не расплавленного вещества в расплав, из-за чего возникло резкое повышение уровня вольфрама. Кроме того, как можно заметить, обрушение стенок слитка уменьшило

уровень радиации даже ниже того, что был в самом начале. Это объясняется тем, что вольфрам испаряется достаточно медленно, не более 1–2 г за все время эксперимента, поэтому количество вольфрама в тигле можно считать примерно постоянным. После достижения пучком дна он сделал в нем углубление. При этом плавление вольфрама продолжается на стенках прожженного канала. Расплавленный вольфрам заполнил углубление в дне графитового тигля, что привело к увеличению толщины слоя вольфрама между датчиком и зоной максимального торможения пучка. Из проведенного эксперимента видно, что данные, которые позволяют нам получать датчик радиации, не только своевременно предупреждают нас о необратимых процессах разрушения тиглей, но и дают представление о непосредственной конфигурации испаряемого материала. При дальнейшем развитии установки, подобные датчики позволят наладить обратную связь для автоматического добавления материала в реактор и выбрать наиболее благоприятный режим испарения.

### Характеристики полученного наноразмерного порошка

Был проведен всесторонний анализ получаемого наноразмерного порошка. Рентгенофазовый анализ показал, что порошок состоит из смеси нескольких фаз: W (рентгенограмма эталонного образца 22-959),  $WO_3$  (32-1395),  $WO_3$  (20-1324) и  $WO_3$  (20-1323). Наличие оксидных компонентов обусловлено сложностью организации инертной атмосферы в данной конфигурации сублиматора, в результате чего в поток несущего газа попадает кислород. Проблема может быть устранена при дальнейшей модификации установки.

Также важно знать чистоту получаемого нанопорошка, для этого было проведено исследование элементного состава (см. таблицу).

Результаты исследования примесного состава исходного материала и синтезированного наноразмерного порошка

Элемент	Примесный состав, %	
	исходный материал	нанопорошок
Al	$1,7 \cdot 10^{-2}$	0,14
Ca	0,12	0,13
Cu	$6,3 \cdot 10^{-2}$	0,12
Fe	$< 8 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$
Mo	~1,5	~0,4
Si	$\sim 3 \cdot 10^{-2}$	~0,2

По результатам исследования примесного состава видно, что в ходе синтеза наноразмерного порошка не вносятся существенных загрязнений. Небольшой рост примесей в порошке обусловлен тем, что большинство элементов (в чистой или, возможно, оксидной форме) имеет более низкую, чем вольфрам, температуру кипения, из-за чего начинают испарение раньше. Но в ходе продолжительной работы чистота получаемого порошка будет расти, в результате чего последние фракции образцов будут иметь очищенный по сравнению с исходным материалом состав. Удельная поверхность полученных образцов составила  $11 \text{ м}^2/\text{г}$ .

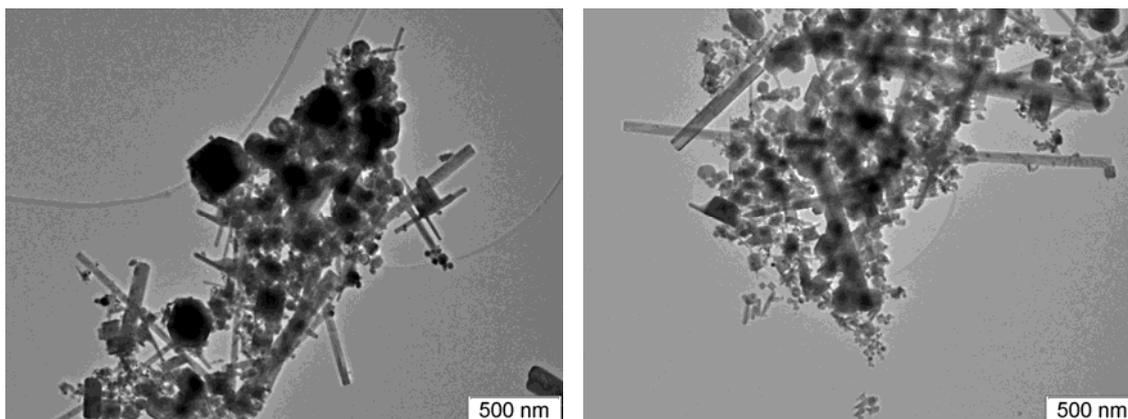


Рис. 6. Внешний вид наноразмерного порошка вольфрама (ПЭМ)  
 Fig. 6. Appearance of nanoscale tungsten powder (TEM)

На рис. 6 приведены изображения, полученные методом ПЭМ. Видно, что в порошке присутствуют два типа частиц: одна группа представляет собой многогранники, по форме близкой к сферической, вторая имеет вытянутую геометрию.

### Заключение

В результате данной серии экспериментов получены нанопорошки вольфрама и оксидов вольфрама. Были проведено всестороннее изучение свойств наноразмерного порошка. На основе данных, полученных по изменению температуры и расхода воды, проведено качественное описание теплового баланса в реакторе. Получены данные по радиационному фону в нижней полусфере от сублиматора. На основе наблюдаемых данных описан ход плавления порошка вольфрама под действием электронного пучка. В результате проведенных экспериментов была создана система контроля процесса испарения веществ под действием электронного пучка высокой мощности. Показано что данные хорошо описывают процессы, происходящие в сублиматоре, и могут служить основой не только для качественного описания но и для построения теоретических моделей

Работа выполнена в ИЯФ СО РАН на стенде ЭЛВ-6, входящем в список Уникальных установок РФ.

### Список литературы

1. Бардаханов С. П., Корчагин А. И., Куксанов Н. К., Лаврухин А. В., Салимов Р. А., Фадеев С. Н., Черепков В. В. Получение нанопорошков испарением исходных веществ на ускорителе электронов при атмосферном давлении // Докл. Академии наук. 2006. Т. 409, № 3. С. 320–323.
2. Syzrantsev V. V., Zavyalov A. P., Bardakhanov S. P. The role of associated liquid layer at nanoparticles and its influence on nanofluids viscosity. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, May 2014, vol. 72, p. 501–506. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.12.082
3. Корчагин А. И. Электронно-лучевая технология получения нанодисперсных порошков диоксида кремния при атмосферном давлении: Дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2003. 150 с.

## References

1. **Bardakhanov S. P., Korchagin A. I., Kuksanov N. K., Lavrukhin A. V., Salimov R. A., Fadeev S. N., Cherepkov V. V.** Nanopowders obtained by evaporating initial substances in an electron accelerator at atmospheric pressure. *Doklady Physics*, 2006, vol. 51, no. 7, p. 353–356.
2. **Syzrantsev V. V., Zavyalov A. P., Bardakhanov S. P.** The role of associated liquid layer at nanoparticles and its influence on nanofluids viscosity. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, May 2014, vol. 72, p. 501–506. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.12.082
3. **Korchagin A. I.** Electron beam technology for producing nanodispersed powders silicon dioxide at atmospheric pressure: Dissertation tech. Sciences. Tomsk, 2003. (in Russ.)

Материал поступил в редколлегию

Received

01.07.2019

## Сведения об авторах / Information about the Authors

**Труфанов Дмитрий Юрьевич**, научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск, Россия)

**Dmitry Yu. Trufanov**, Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

trufanov@itam.nsc.ru

**Завьялов Алексей Павлович**, научный сотрудник, Дальневосточный федеральный университет, Школа естественных наук (Владивосток, Россия)

**Alexey P. Zavyalov**, Researcher, Far Eastern Federal University, School of Natural Sciences (Vladivostok, Russian Federation)

Zav\_Alexey@list.ru

**Зобов Константин Владимирович**, младший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск, Россия)

**Konstantin V. Zobov**, Junior Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

zobov.kv@gmail.com

**Бардаханов Сергей Прокопьевич**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, профессор, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск, Россия)

**Sergey P. Bardakhanov**, Doctor of Physics and Mathematics, Chief Scientific, Associate Professor, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

bard@itam.nsc.ru

**Чакин Иван Константинович**, инженер, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

**Ivan K. Chakin**, engineer, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

chak\_in2003@bk.ru