

## Экспериментальный метод исследования гетерогенной нуклеации в ламинарной проточной камере

С.В. Валиулин<sup>1</sup>, В.В. Карасев<sup>1</sup>, А.Ю. Комаровских<sup>2</sup>, А.М. Бакланов<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт химической кинетики и горения СО РАН  
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3

<sup>2</sup>Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН  
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 3

Поступила в редакцию 23.01.2012 г.

Представлен метод исследования гетерогенной нуклеации в ламинарной проточной камере, позволяющий определить взаимосвязь между основными параметрами процесса: критическим размером затравочной частицы, пересыщением и температурой. Данный метод продемонстрирован при исследовании гетерогенной нуклеации пара серы на наночастицах оксида вольфрама.

*Ключевые слова:* гетерогенная нуклеация, затравочные частицы, сера, оксид вольфрама, проточная камера, пересыщение, пар, наноаэрозоль; heterogeneous nucleation, seed particles, sulfur, tungsten oxide, flow chamber, supersaturation, vapor, nanoaerosol.

### Введение

Интерес к гетерогенной нуклеации во многом обусловлен определяющей ролью данного процесса в атмосферных явлениях (образование облаков, тумана) [1]. Помимо этого, использование явления гетерогенной нуклеации может быть перспективным для получения (генерации) нанокompозитных материалов [2, 3].

Однако до настоящего времени теоретические представления о гетерогенной нуклеации остаются крайне ограниченными. Существующая теория гетерогенной нуклеации, разработанная Fletcher в 1958 г. [4], основывается на классических подходах, предложенных Фольмером [5] и Frenkel [6]. Одним из недостатков классической теории является капиллярное приближение, т.е. применение макроскопических параметров (поверхностное натяжение, плотность) к микроскопической фазе. Это не вполне корректно в случае, когда рассматриваются кластеры, состоящие из нескольких десятков атомов или молекул. В частности, для гетерогенной нуклеации конкретных систем показано [7, 8], что классическая теория дает систематическую ошибку в величине пересыщения, необходимого для протекания процесса гетерогенной нуклеации.

Отсюда следует актуальность разработки теории, способной обобщить современные представления о процессе нуклеации. Для разработки базиса такой теории требуется скрупулезное накопление экспериментальных данных по гетерогенной нук-

леации различных систем. В частности, необходимо установить зависимость скорости гетерогенной нуклеации от физико-химических свойств поверхности затравочных частиц и конденсирующегося вещества. Кроме того, необходимо найти связь между критическим размером затравочной частицы, пересыщением и температурой, при которых скорость гетерогенной нуклеации будет существенной.

Как правило, в экспериментах по гетерогенной нуклеации [9–11] с помощью анализатора дифференциальной подвижности (DMA) создают квази-монодисперсные распределения затравочных частиц, которые подают в реактор с заданным пересыщением рабочего вещества. Изменяя пересыщение, находят те критические условия, при которых гетерогенная нуклеация начинает протекать на частицах данного размера. Этот подход имеет ряд достоинств. Вместе с тем для работы DMA требуется зарядка наночастиц. А это затруднительно для частиц размером 1–5 нм, которые, как правило, и являются гетерогенными ядрами конденсации.

Использованная нами ламинарная проточная камера позволяет изучать процесс нуклеации в широком диапазоне скоростей ( $10^{-2}$ – $10^8$  см<sup>-3</sup>·с<sup>-1</sup>) [12]. Это во многом перекрывает диапазоны, доступные для устройств, основанных на методе адиабатического расширения ( $10^4$ – $10^{11}$  см<sup>-3</sup>·с<sup>-1</sup>) и термомодиффузионной камеры ( $10^{-3}$ – $10^2$  см<sup>-3</sup>·с<sup>-1</sup>) [12]. Кроме того, преимуществами ламинарной проточной камеры являются: возможность организации непрерывного производства наночастиц, высокая чистота целевого продукта, простота регулирования размера и концентрации.

В настоящей статье предлагается метод исследования гетерогенной нуклеации в ламинарной проточной камере, позволяющий определить взаи-

\* Сергей Владимирович Валиулин (sibinfonet@yandex.ru); Владимир Васильевич Карасев; Андрей Юрьевич Комаровских; Анатолий Максимович Бакланов.

мосвязь между основными параметрами данного процесса: критическим размером затравочной частицы, пересыщением и температурой. Работоспособность метода продемонстрирована на примере гетерогенной нуклеации пара серы на наночастицах оксида вольфрама.

## Методика эксперимента

Экспериментальная установка состоит из трех основных узлов (рис. 1): генератора затравочных аэрозольных частиц [13], ламинарной проточной конденсационной камеры [14] и диффузионного спектрометра аэрозолей (ДСА) [15–17] в качестве измерителя концентрации и распределения по размерам наночастиц.

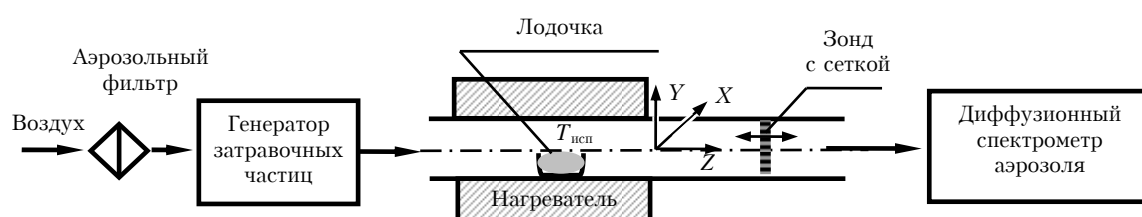


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

Ламинарная проточная камера представляет собой горизонтальную стеклянную трубку внутренним диаметром 0,64 см с внешним нагревателем. В изотермическую зону внутри этой камеры, где достигался максимум температуры испарения  $T_{исп}$ , помещали стеклянную лодочку с навеской элементарной серы марки «о.с.ч.» 15-3. Эту область образования пара назовем зоной испарения. Координата  $Z$  направлена по оси реактора в направлении потока. За ноль принята точка на выходном срезе нагревателя.

Из генератора затравочных частиц на вход в камеру подавали аэрозоль, состоящий из наночастиц оксида вольфрама. Эти частицы служили нуклеационными центрами. Работа генератора основана на возгонке оксида вольфрама [13]. Образец вольфрама нагревают электронагревателем до температуры около 900 °С, при этом он реагирует с кислородом и азотом воздуха с образованием нескольких оксидов и нитридов (объемная скорость потока  $U = 9 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ). Образующиеся оксиды вольфрама, вследствие высокого давления паров, сублимируют и нуклеируют в газовой фазе с образованием наночастиц оксида вольфрама. Изменяя температуру нагрева образца, можно регулировать концентрацию и спектр распределения по размерам частиц оксида вольфрама.

Поток воздуха, содержащий затравочные частицы и пар серы, движется в канале камеры. С уменьшением температуры после выхода из зоны нагрева пар становится сначала насыщенным, затем пересыщенным. Это приводит к частичной конденсации пара на внутренней поверхности трубки [14].

При достижении достаточной величины пересыщения происходит гетерогенная нуклеация серы на затравочных частицах с последующим конденсационным ростом аэрозольных частиц. Для выбранного нами рабочего диапазона температур  $T_{исп} = 345\text{--}395 \text{ К}$  скорость гомогенной нуклеации серы в камере пренебрежимо мала (т.е. при отсутствии в камере затравочных частиц спектрометр регистрировал нулевую концентрацию).

Спектрометр ДСА состоит из диффузионной батареи, конденсационного укрупнителя аэрозольных частиц и оптического счетчика частиц. Принцип действия прибора основан на восстановлении распределения наночастиц по размерам из известной зависимости коэффициента диффузии от их размера [18].

Для этого измеряются коэффициенты проскока аэрозольных частиц через наборы сеток (секции диффузионной батареи). Частицы, прошедшие данную секцию, направляются в конденсационную камеру, где укрупняются до оптически регистрируемого размера. Затем концентрация этого аэрозоля измеряется с помощью оптического счетчика. Аналогичная процедура выполняется для каждой секции. Разработаны математическая модель и компьютерный код решения обратной задачи [15], что позволяет восстанавливать распределения по размерам наночастиц из их коэффициентов проскока через секции диффузионной батареи. Спектрометр позволяет измерять концентрацию аэрозоля в диапазоне  $10 \text{ см}^{-3}\text{--}5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$  и распределения по размерам наночастиц в диапазоне 3–250 нм.

Приблизительное положение зоны гетерогенной нуклеации на затравочных частицах в камере находили экспериментально методом отсечки пересыщения [14, 19, 20]. Для этого в трубку перпендикулярно потоку вводили круглую металлическую сетку диаметром, равным внутреннему диаметру трубки (см. рис. 1). Конструкция позволяла устанавливать сетку в различных положениях по аксиальной координате  $Z$ . Методика состоит в следующем: пар серы и исходные частицы оксида вольфрама, проходящие с потоком воздуха через сетку, за счет большого коэффициента диффузии, частично осаждаются на сетке. Затравочные частицы, на которых прошла нуклеация с последующим конденсационным увеличением размера (т.е. имеющие более низкий коэффициент диффузии), практически не задерживаются сеткой. В экспериментах для

каждого положения сетки измеряли концентрацию аэрозоля на выходе из камеры. Набор таких измерений позволяет найти приблизительное место зоны гетерогенной нуклеации. Параметры сетки были подобраны экспериментально так, чтобы она диффузионно задерживала примерно половину исходных затравочных частиц.

Распределение массы осадка серы на стенке реактора по длине трубки (координате  $Z$ ) определяли экспериментально. Процедура измерения осадка состояла в следующем: при стационарных условиях эксперимента (номинальная скорость потока, температура  $T_{исп}$ ) в течение определенного времени происходило накопление осадка серы на стенке трубки реактора; далее, после выключения и охлаждения нагревателя камеры с внутренних участков трубки длиной по 2 см и фильтра, установленного на выходе из камеры ( $Z = 35$  см), осадок серы смывали гексаном. Оптическую плотность растворов измеряли на длине волны 264 нм [21] в спектрофотометре UV-2401 PC. Баланс массы между серой, испарившейся из лодочки, и серой, осевшей на стенке камеры и на фильтре, сводился с точностью 5%.

Профили температуры в камере измеряли с помощью хромель-алюмелевой термопары с диаметром спая 100 мкм.

## Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены распределения по размерам исходных затравочных частиц и частиц на выходе после гетерогенной нуклеации.

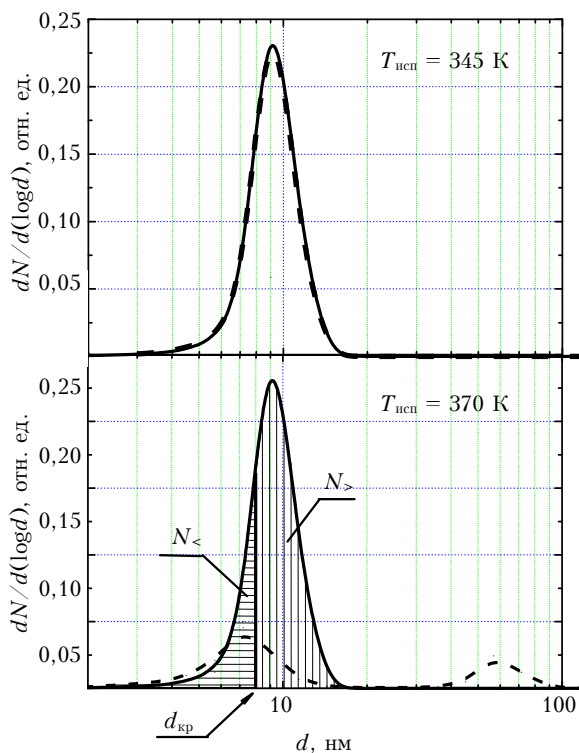


Рис. 2. Распределения по размерам исходных затравочных частиц (сплошная линия) и на выходе после гетерогенной нуклеации (штриховая линия)

В ходе экспериментов варьировали давление пара серы при неизменном спектре затравочных наночастиц, подаваемых в конденсационную камеру. Давление пара серы в камере задавалось температурой в зоне испарения  $T_{исп}$ . При низкой температуре в зоне испарения  $T_{исп} = 345$  К (соответственно низкое давление пара) нуклеация на затравочных частицах не происходит, поэтому распределения по размерам исходных затравочных наночастиц оксида вольфрама и частиц на выходе после контакта с паром серы идентичны. Это вызвано тем, что размеры всех затравочных частиц лежат ниже критического, соответствующего началу гетерогенной нуклеации.

При  $T_{исп} = 370$  К исходный пик распределения трансформируется в два пика (с модовыми размерами 7,5 и 60 нм). Очевидно, что мода 7,5 нм соответствует тем исходным частицам, размер которых при данных экспериментальных условиях был меньше критического, т.е. необходимого для гетерогенной нуклеации, поэтому нуклеация и конденсация пара на них не происходили. Мода 60 нм формируется из части распределения исходных частиц размером больше критического, на которых происходила нуклеация пара и которые в ходе конденсационного роста достигали размера много больше исходного.

Для определения минимального критического размера затравочных частиц, на которых протекает гетерогенная нуклеация, проделаем следующую процедуру. Введем для этого обозначения:  $N_{7,5}$  и  $N_{60}$  — парциальные концентрации в моде 7,5 и 60 нм соответственно. Рассечем кривую исходного распределения вертикальной прямой (см. рис. 2,  $T_{исп} = 370$  К) так, чтобы

$$\frac{N_{7,5}}{N_{60}} = \frac{N_{<}}{N_{>}}$$

где  $N_{<}$  и  $N_{>}$  — парциальные концентрации аэрозоля в исходном распределении слева и справа от секущей прямой соответственно. Тогда естественно считать, что точка пересечения этой прямой с осью абсцисс соответствует критическому размеру  $d_{кр}$ . На рис. 3 приведена зависимость этого размера  $d_{кр}$  от температуры зоны испарения ( $T_{исп}$ ), полученная в серии измерений.

Далее, для полноты экспериментального описания процесса необходимо найти температуру и пересыщение, при которых протекает гетерогенная нуклеация на частицах размером  $d_{кр}$ .

На рис. 4 представлена зависимость концентрации аэрозоля на выходе из камеры от положения сетки по координате  $Z$ , полученная методом отсеки пересыщения. Видно, что когда сетка находится при  $Z \geq 20$  см, концентрация аэрозольных частиц не зависит от  $Z$ . Это означает, что частицы размером больше  $d_{кр}$  конденсационно укрупнились до  $Z \approx 20$  см и не задерживаются сеткой. При положении сетки  $Z \approx 5$ –20 см протекает гетерогенная нуклеация, на что указывает рост концентрации частиц на выходе из реактора. Это соответствует тому, что диффузионный коэффициент проскока

через сетку монотонно растет с увеличением размера наночастиц. Наиболее крутой наклон кривой имеется вблизи  $Z \approx 15$  см. Это указывает на факт наиболее интенсивного протекания нуклеации именно на данном участке.

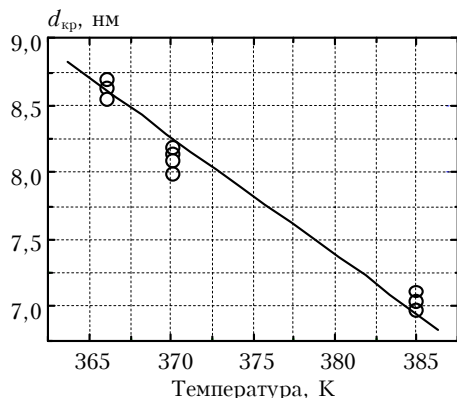


Рис. 3. Критический размер затравочных частиц как функция температуры  $T_{исп}$  зоны испарения

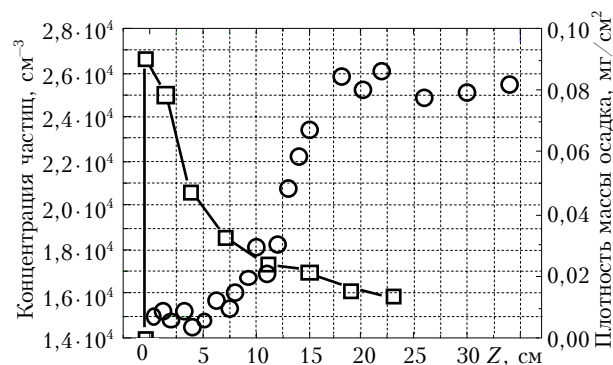


Рис. 4. Зависимости от координаты  $Z$  вдоль оси камеры ( $T_{исп} = 366$  К): концентрация аэрозольных частиц на выходе из камеры как функция координаты  $Z$  положения сетки в камере (кружки); плотность массы осадка серы на стенке трубки, накопленная за время эксперимента 200 мин (сплошная линия и квадратики)

На рис. 5 представлено экспериментально измеренное термодарой поле температуры при  $6 \text{ см} \leq Z \leq 25 \text{ см}$  для  $T_{исп} = 366$  К.

Чтобы определить пересыщение в области, где протекает гетерогенная нуклеация, необходимо знать распределение концентрации пара серы  $n(r, Z)$ , где  $r$  – радиальная координата. Для этого решали задачу массообмена, которая подобна задаче теплообмена, описываемой моделью Гретца – Нуссельта [22, 23]. Данная задача подразумевает: а) развитый ламинарный профиль скорости; б) однородный радиальный профиль концентрации пара в точке  $Z_k$  (начало конденсации на стенке); в)  $n(R, Z) = n_{нас}(R, Z)$  [24, 25], где  $R = 0,32$  см – радиус трубы,  $n_{нас}(R, Z)$  – концентрация насыщенного пара. Решение этой задачи, для больших значений разности  $Z - Z_k \gg 2R$ , имеет вид

$$n(r, Z) \approx n(0, Z)\Psi_0(r), \quad (1)$$

где функция  $\Psi_0(r)$  табулирована в [22];  $n(0, Z)$  – счетная концентрация пара на оси трубки в точке  $Z$ . Проверим условие применимости формулы (1). В наших экспериментах  $Z_k \approx -0,5$  см. Нас интересует область  $Z \geq 6$  см (см. рис. 4), тогда  $Z - Z_k \geq 6,5 \text{ см} \gg 2R$ .

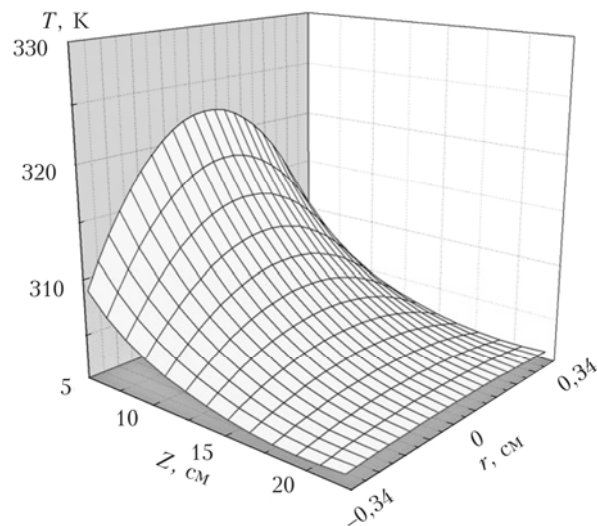


Рис. 5. Экспериментально измеренное поле температуры для  $T_{исп} = 366$  К

Зависимость  $n(0, Z)$  находили из уравнения

$$W(Z) = 2\pi \int_0^R u(r, Z)n(r, Z) \frac{M}{N_A} r dr, \quad (2)$$

где  $W(Z)$  – поток массы пара серы через сечение трубки;

$$u(r, Z) = \frac{2U}{\pi R^2} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \frac{T(r, Z)}{T_0} -$$

линейная скорость потока воздуха (уравнение Пуазейля с небольшой температурной поправкой);  $U$  – объемная скорость потока;  $T_0$  – комнатная температура;  $M$  – молярная масса пара серы. Отметим, что пар серы при температурах 300–395 К с точностью  $\pm 5\%$  состоит из молекул  $S_8$ ,  $S_7$ ,  $S_6$  в соотношении 67: 10: 23% [26] соответственно. С учетом этого получили, что средняя молярная масса пара серы  $M = 240,5 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$ . Поток массы серы  $W(Z)$  через сечение трубки был рассчитан из разницы масс между серой, испарившейся из лодочки, и серой, осевшей на стенку (см. рис. 4). Для наших экспериментальных условий было найдено, что скорость испарения серы из лодочки  $U_{исп}$  описывается уравнением  $\ln U_{исп}(\text{мг/мин}) = 24,68 - 10906,12/T_{исп}$ .

Из решения задачи массообмена было получено поле концентрации  $n(r, Z)$ . Далее, считая пар серы идеальным газом, из концентрации пара  $n(r, Z)$  и температуры можно рассчитать пересыщение

$$S(r, Z) = \frac{P(r, Z)}{P_{нас}(r, Z)},$$

где  $P(r, Z) = n(r, Z)kT(r, Z)$  – локальное давление пара серы;  $P_{\text{нас}}(r, Z)$  – локальное давление насыщенного пара серы ( $\ln P_{\text{нас}}(\text{Па}) = 24,3 - 8933,1/T(r, Z)$ ) [26, 27]). Результат расчета поля пересыщения приведен на рис. 6.

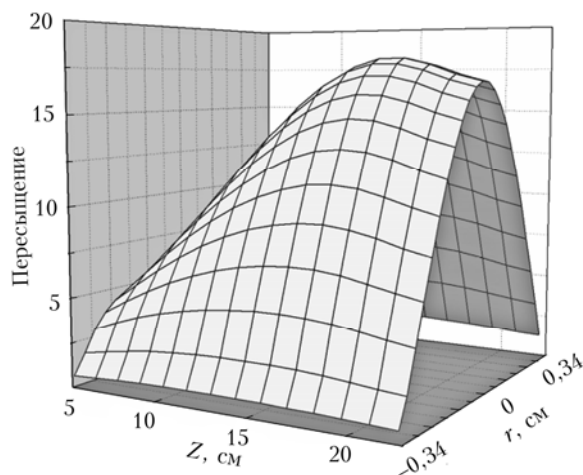


Рис. 6. Рассчитанное поле пересыщения для  $T_{\text{исп}} = 366$  К

Очевидно, что гетерогенная нуклеация на затравочных частицах в камере протекает начиная с наиболее крупных частиц, присутствующих в спектре распределения по размерам, при некоторой небольшой величине пересыщения. По мере увеличения пересыщения вдоль оси камеры (рис. 6) в процесс нуклеации вовлекаются все более мелкие затравочные частицы. Тогда максимальной величины пересыщения соответствует некоторый критический размер затравочных частиц, на которых еще протекает гетерогенная нуклеация. На частицах ниже данного размера гетерогенная нуклеация не протекает. Из рис. 6 видно, что максимум пересыщения  $S_{\text{нукл}} \approx 18$  достигается при координате  $Z \approx 16$  см,  $r \approx 0$  см. При этом согласно рис. 5  $T = 303$  К. Для данных экспериментальных условий ( $T_{\text{исп}} = 366$  К,  $S_{\text{нукл}} \approx 18$ ,  $T_{\text{нукл}} = 303$  К) критический размер затравочной частицы  $d_{\text{кр}} = 8,6$  нм (см. рис. 3).

В данной работе были выполнены три серии измерений при температурах в зоне испарения  $T_{\text{исп}} = 366, 370$  и  $385$  К. В таблице приведены значения критических размеров затравочных частиц  $d_{\text{кр}}$  и соответствующие им значения пересыщения  $S_{\text{нукл}}$  и температуры  $T_{\text{нукл}}$ .

$T_{\text{исп}}, \text{К}$	$d_{\text{кр}}, \text{нм}$	$S_{\text{нукл}}$	$T_{\text{нукл}}, \text{К}$
385	7	35	305
370	8	20	303
366	8,6	18	303

### Заключение

Разработанный метод исследования гетерогенной нуклеации в ламинарной проточной камере позволяет определить взаимосвязь между основными параметрами процесса: критическим размером затравочной частицы, пересыщением и температу-

рой. Работоспособность данного метода продемонстрирована на примере гетерогенной нуклеации пара серы на наночастицах оксида вольфрама. Установлено, что критический размер затравочных частиц оксида вольфрама, необходимый для протекания гетерогенной нуклеации пара серы, меняется в диапазоне 8,6–7 нм при изменении пересыщения от 18 до 35 и температуры 303–305 К.

Работа выполнена при финансовой поддержке: Междисциплинарного проекта № 3 Сибирского отделения Российской академии наук (СО РАН); проект сотрудничества № 7 СО РАН – Тайвань; проекта РФФИ № 11-08-01204-а и соглашения о сотрудничестве между CNR (Итальянский Национальный Исследовательский Совет) и РАН (Российская академия наук) на 2011–2013 годы.

1. Амелин А.Г. Теоретические основы образования тумана при конденсации пара. М.: Химия, 1972. 304 с.
2. Фролов Ю.В., Пивкина А.Н., Ульянов П.А., Завьялов С.А. Получение наноразмерных энергоемких материалов // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 6. С. 113–117.
3. Пивкина А.Н., Фролов Ю.В., Иванов Д.А. Наноразмерные компоненты высокоэнергетических систем: структура, термическое поведение и горение // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43, № 1. С. 60–65.
4. Fletcher N.H. Size effect in heterogeneous nucleation // J. Chem. Phys. 1958. V. 29, N 23. P. 572–576.
5. Фольмер М. Кинетика образования новой фазы. М.: Наука, 1986. 208 с.
6. Frenkel J. Kinetic Theory of Liquids. N.Y.: Oxford University Press, 1946. 403 p.
7. Helsper C., Niessner R. On the influence of the vapour substance on the behaviour of an expansion-type condensation nucleus counter // J. Aerosol Sci. 1985. V. 16, N 5. P. 457–461.
8. Porstendorfer J., Scheibel H., Pohl F., Preining O., Reischl G., Wagner P. Heterogeneous nucleation of water vapor on monodispersed Ag and NaCl particles with diameters between 6 and 18 nm // Aerosol Sci. Technol. 1985. V. 4, N 1. P. 65–79.
9. Mavliev R., Hopke P.K., Wang H.-C., Lee D.-W. Experimental studies of heterogeneous nucleation in the turbulent mixing condensation nuclei counter // J. Phys. Chem. B. 2004. V. 108, N 14. P. 4558–4564.
10. Smorodin V.Y., Hopke P.K. Condensation activation and nucleation on heterogeneous aerosol nanoparticles // J. Phys. Chem. B. 2004. V. 108, N 26. P. 9147–9157.
11. Winkler P.M., Hienola A., Steiner G., Hill G., Vrtala A., Reischl G.P., Kulmala M., Wagner P.E. Effects of seed particle size and composition on heterogeneous nucleation of n-nonane // Atmos. Res. 2008. V. 90, N 2–4. P. 187–194.
12. Hyvärinen A.P.S. Experiments on homogeneous nucleation and physicochemical properties related to atmospheric new particle formation // Report series in aerosol science. 2006. N 82. P. 1–38.
13. Reischl G.P., Makela J.M., Neece J. Performance of Vienna type differential mobility analyzer at 1.2–20 nanometer // Aerosol Sci. Technol. 1997. V. 27, N 6. P. 651–672.
14. Валиулин С.В., Карасев В.В., Онищук А.А., Восель С.В., Комаровских А.Ю., Бакланов А.М., Пуртов П.А., Болдырев В.В., Фомин В.М. Гомогенная

- нуклеация из пересыщенного пара серы в ламинарной проточной диффузионной камере // Докл. РАН. 2011. Т. 437, № 1. С. 60–64.
15. *Ankilov A., Baklanov A., Mavliev R., Eremenko S., Reichel G.P., Majerowicz A.* Comparison of the Novosibirsk automated diffusion battery with the Vienna electron mobility spectrometer // *J. Aerosol Sci.* 1991. V. 22, suppl. 1. P. S325–S328.
  16. *Мавлиев Р.А., Анкилов А.Н., Бакланов А.М., Горбунов А.М., Какуткина Н.А., Куценогий К.П., Пащенко С.Э., Макаров В.И.* Использование сетчатой диффузионной батареи для определения дисперсности аэрозоля // *Коллоид. ж.* 1984. Т. 46, № 6. С. 1136–1141.
  17. *Мавлиев Р.А., Анкилов А.Н.* Методы обработки данных для сетчатой диффузионной батареи // *Коллоид. ж.* 1985. Т. 47, № 3. С. 523–530.
  18. *Cheng Y.S., Yeh H.C., Brinsko K.J.* Use of Wire Screens as a Fan Model Filter // *Aerosol Sci. Technol.* 1985. V. 4, N 2. P. 165–174.
  19. *Рыбин Е.Н., Панкратова М.Е., Козан Я.И.* Экспериментальное определение скоростей спонтанной нуклеации // *Ж. физ. химии.* 1976. Т. 50, № 3. С. 769–773.
  20. *Ваганов В.С., Коднев Г.Г., Рубахин Е.А.* Экспериментальное изучение зародышеобразования в пересыщенных парах дибутилфталата. Препр. / Институт геологии и геофизики СО АН СССР. Новосибирск, 1985. № 14. С. 1–28.
  21. *Лазарев В.И., Костриков В.И.* Спектрофотометрическое определение серы // *Ж. анал. хим.* 1970. Т. 25, вып. 3. С. 553–555.
  22. *Петухов Б.С.* Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. М.: Энергия, 1967. 412 с.
  23. *Brown G.M.* Heat or mass transfer in a fluid in laminar flow in a circular or flat conduit // *AIChE J.* 1960. V. 6, N 2. P. 179–183.
  24. *Бринь А.А., Фисенко С.П.* Моделирование работы ламинарной диффузионной камеры для исследования гомогенной нуклеации. I // *Ж. техн. физ.* 2006. Т. 76, вып. 4. С. 26–30.
  25. *Barrett J.C., Baldwin T.J.* Aerosol nucleation and growth during laminar tube flow: maximum saturations and nucleation rates // *J. Aerosol Sci.* 2000. V. 31, N 6. P. 633–650.
  26. *Казенас Е.К., Цветков Ю.В.* Испарение оксидов. М.: Наука, 1997. 542 с.
  27. *Физические величины* / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоиздат, 1991. 1232 с.

*S.V. Valiulin, V.V. Karasev, A.Yu. Komarovskikh, A.M. Baklanov.* **The experimental method of studying the heterogeneous nucleation in laminar flow chamber.**

We developed a method for the study of heterogeneous nucleation in a laminar flow chamber, allowing to determine the relationship between the main parameters of the process: the critical size of the seed particles, supersaturation and temperature. The workability of this method is demonstrated for the heterogeneous nucleation of sulfur vapor on nanoparticles of tungsten oxide.