ИЗВЕСТИЯ РАН. МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА, 2021, № 1, с. 106–114

УДК 533

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ ГАЗА, АКТИВИРОВАННОГО В МИКРОВОЛНОВОМ РАЗРЯДЕ, ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ АЛМАЗА

© 2021 г. А. А. Емельянов[a,*], М. Ю. Плотников[a,], А. К. Ребров[a,***], Н. И. Тимошенко[a,****], И. Б. Юдин[a,*****]**

[a] *Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

**E-mail: alemelyanov@gmail.com*

***E-mail: plotnikov@itp.nsc.ru*

****E-mail: rebrov@itp.nsc.ru*

*****E-mail: vika@itp.nsc.ru*

******E-mail: yudinib@gmail.com*

Поступила в редакцию 15.04.2020 г.
После доработки 21.06.2020 г.
Принята к публикации 21.06.2020 г.

Рассматривается газоструйный метод осаждения алмазных структур с использованием для активации газов сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда. Методом прямого статистического моделирования (ПСМ) проведен анализ газодинамических процессов, происходящих в условиях газоструйного осаждения алмазных структур. Исследовано течение активированного газа в сопле, установлено существенное влияние процессов в сжатом слое, формируемом вблизи подложки, на скорость синтеза алмазных структур. Определены режимы течения активированных в разрядной камере компонент смеси к подложке, показано заметное торможение тяжелых компонент в сжатом слое. Показано, что при увеличении давления в камере осаждения от 10 до 80 торр скорость роста кристаллов возрастает в 4 раза за счет увеличения удельного потока активированных компонент к подложке.

Ключевые слова: газоструйный метод, осаждение алмазов, метод ПСМ

DOI: 10.31857/S0568528121010035

Использованию микроволнового излучения для активации газовых смесей, содержащих водород и углерод, для синтеза алмаза посвящено большое количество публикаций [1, 2]. Общей особенностью этих работ является создание над подложкой плазменного облака, из которого к поверхности подложки диффундируют активные фрагменты, участвующие в строительстве алмазных кристаллов. Особенностью представленной работы является использование струйного расширения плазмы – сверхзвукового при достаточно высоком перепаде давления между разрядной камерой и камерой осаждения. Это обеспечивает ряд новых возможностей:

активация газа в разрядной камере в широком диапазоне давлений, не зависящих от давления в камере осаждения при сверхзвуковом истечении из разрядной камеры;

возможность реализации режимов в широком диапазоне удельных массовых потоков к подложке;

возможность газодинамического ускорения тяжелых частиц типа C_mH_n потоком смеси $H_2 + H$, приводящего к высокой энергии столкновения этих частиц с поверхностью осаждения (подложки).

Устройства для использования высокоскоростного потока при осаждении алмазных структур из СВЧ-разряда во многом аналогичны используемым в космических движителях с рабочим телом, создаваемым при генерации микроволновой плазмы [3, 4] и расширением в сверхзвуковом сопле.

Метод использования высокоскоростного потока для доставки активных компонент возник в данной работе как развитие исследований осаждения алмазных покрытий при расширении газовых смесей из цилиндрического канала [5, 6]. Анализ течения смесей газов для таких режимов осаждения проведен в [6, 7]. В работах [8–10] развивается газоструйный метод осаждения алмаз-

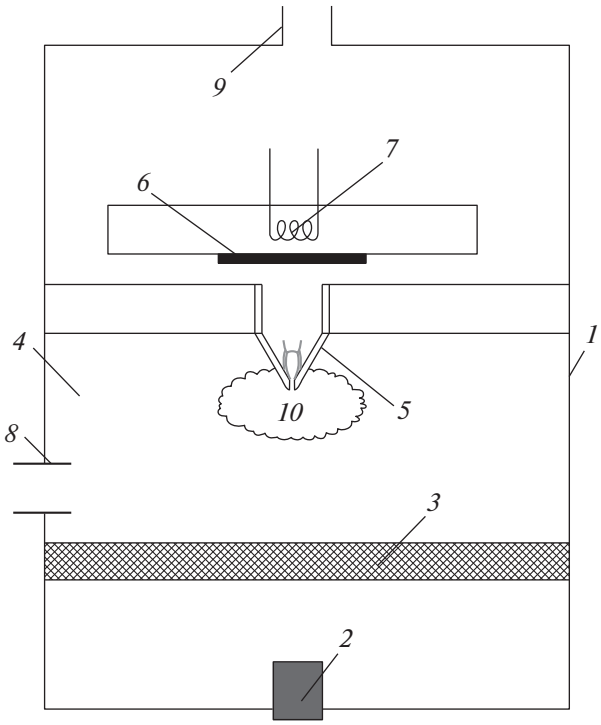

Рис. 1. Схема СВЧ-реактора с подложкой в камере осаждения. *1* – корпус реактора, *2* – антенна магнетрона, *3* – перегородка из диэлектрика, *4* – разрядная камера, *5* – конусное сопло, *6* – подложка, *7* – нагреватель подложки, *8* – магистраль подачи смеси газов, *9* – подключение вакуумного насоса, 10 – облако плазмы.

ных структур с использованием для активации газов СВЧ-разряда. В частности, в [10] представлены данные эксперимента, где достигнута скорость осаждения 78 мкм/час при исходной концентрации метана 1%.

Процессы формирования течения активированного газа в сопле оказывают существенное влияние на осаждение алмаза. Представленная работа посвящена детальному анализу газодинамических процессов, в частности, формированию течения активированного газа в сопле. Анализ параметров газового потока за соплом проводился методом прямого статистического моделирования (ПСМ). Результаты и выводы данной работы основаны на моделировании течения и экспериментах по синтезу алмазных структур при разных давлениях в камере осаждения, и при постоянном расходе газовой смеси.

1. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА И ЕГО РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 1 приведена схема реактора, используемого в экспериментах. В корпусе реактора *1* установлена антенна *2*, излучающая электромагнитные волны от магнетрона. Камера разделена перегородкой *3* из диэлектрика (кварц) для защиты антенны от воздействия плазмы. Плазма *10* расширяется из разрядной камеры *4* в камеру осаждения через сопло *5*. Геометрия разрядной камеры оптимизирована так, что напряженность электрического поля максимальна у входа в сопло. В камере осаждения установлена подложка *6*, температура которой регулируется водяным охлаждением и нагревателем *7*. Исходная смесь газов подается в разрядную камеру через магистраль *8*. Низкое давление в камере осаждения обеспечивается вакуумным насосом по каналу *9*.

Условия экспериментов: диаметр звукового сопла 2 мм, расстояние сопло-подложка 20 мм, диаметр канала, подводящего струю к подложке – 13 мм. Расход подаваемого водорода составлял 8000 нсм^3/мин, расход метана – 80 нсм^3/мин. Время осаждения – 1.5 часа. В качестве материала подложки использовалась молибденовая фольга. Температура подложки поддерживалась на уровне 950°C во всех проведенных экспериментах. Более подробное описание установки и методики проведения экспериментов приведено в [9].

Давление в разрядной камере определялось расходом газов, диаметром сопла и параметрами плазмы. Одно из преимуществ данной схемы – возможность менять условия в камере осаждения

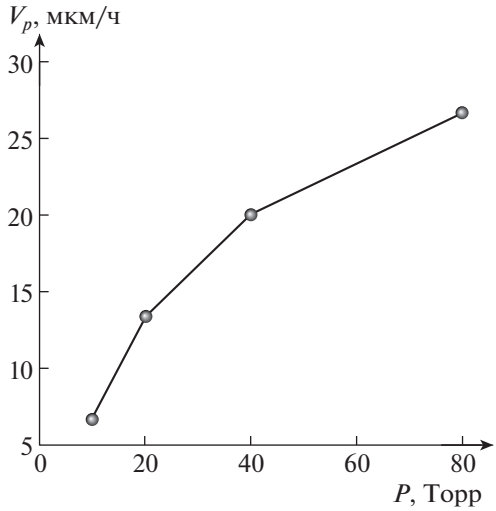

Рис. 2. Скорость роста грани алмаза для различного давления в камере осаждения.

без изменения условий в разрядной камере при сверхзвуковом перепаде давления на сопле. В выполненной серии экспериментов давление в камере осаждения изменялось от 10 до 80 торр, что обеспечивало сверхзвуковое течение. При давлении 10 торр сплошная пленка за время эксперимента не формировалась. Осаждались отдельные кристаллы алмаза с характерным размером ребра грани до 10 мкм. При давлении 20 торр и выше плотная алмазная пленка покрывала всю поверхность с максимальной толщиной в центре. Важной характеристикой в представленном исследовании является скорость роста алмазных структур. На рис. 2 представлены данные о скорости роста грани алмаза. Размер граней алмаза определялся по микрофотографиям центральной части осажденных пленок. Значительный рост скорости при увеличении давления очевиден.

Точность экспериментальных данных определялась приборной погрешностью. Разброс значений не превышал нескольких процентов.

2. ПРЯМОЕ СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В методе ПСМ [11] моделируемый объем физического пространства разбивается на ячейки и в каждой ячейке моделируется некоторое количество частиц. Непрерывный процесс движения и столкновений частиц расщепляется на два последовательных этапа: движение частиц в течение временного интервала Δt в соответствии с их скоростями и моделирование столкновений между частицами в этом интервале. Временной шаг Δt выбирается малым в сравнении со средним временем между столкновениями частиц. На каждом временном шаге производится суммирование выборочных значений, необходимых для вычисления макропараметров течения газа.

Расчеты проводились в осесимметричной постановке с использованием для моделирования числа столкновений частиц схемы мажорантной частоты [12]. На рис. 3 показана схема расчетной области. Она включает сопло 1, продолженное цилиндрическим каналом 2, и камеру осаждения с подложкой 3. Геометрические размеры выбраны близкими к используемым в экспериментах. Выбор граничных условий важен для результатов расчетов.

Оценка параметров смеси газов (температура и состав) перед критическим сечением была проведена в предположении равновесного течения перед соплом, что можно считать достаточно обоснованным при высоком давлении в разрядной камере (порядка 100 торр и выше). Для оценки макропараметров течения использовались данные о расходах водорода и метана и давления в разрядной камере, полученные при проведении экспериментов по осаждению алмазных покрытий. Температура смеси и степень диссоциации водорода оценивались по результатам газодинамического расчета температуры торможения [10]. Параметры потока взяты из экспериментальных данных: расход водорода 8000 нсм^3/мин, расход метана 80 нсм^3/мин, давление в камере торможения при подаче только водорода – 172 торр, при подаче водорода и метана – 180 торр. Для смеси $H+H_2$ при давлении 175 торр температура торможения 3420 K и степень диссоциации во-

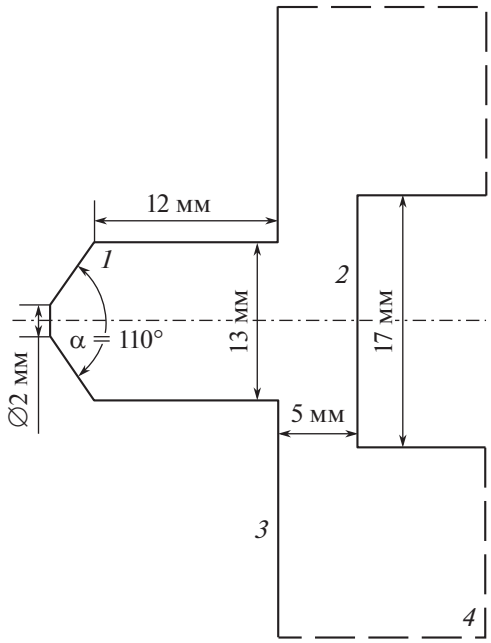

Рис. 3. Схема расчетной области для метода ПСМ: *1* – стенки конуса и цилиндра, *2* – поверхность подложки, *3* – поверхность камеры осаждения, *4* – свободная граница.

дорода ~0.4. Добавление 1% метана внесло незначительные изменения: давление повысилось до 180 торр, температура торможения – до 3470 K, степень диссоциации – 0.49 (с учетом атомарного водорода из продуктов разложения метана). При рассматриваемых условиях течение перед соплом можно считать сплошным. В этом случае температура и среднемассовая скорость одинаковы у всех компонентов смеси. Наиболее значимые концентрации среди тяжелых компонентов имеют фрагменты C_2H_2, C_2H, C_3H и C. В результате оценок концентраций всех фрагментов при моделировании принято использовать осредненное значение Cx с молярной массой 22 г/моль и показателем адиабаты 1.2. Было принято, что в звуковое сопло втекает смесь H_2, H и Cx с температурой в критическом сечении для смеси 2833 K и степенью диссоциации водорода 50%. Поток углеродной компоненты Cx задавался 40 нсм^3/мин. Возможность газофазных реакций при моделировании течения методом ПСМ не рассматривалась, т.е. состав газов принимался замороженным.

На границе расчетной области 4 в камере осаждения (штриховая линия) были заданы давление P_1 и температура T_1. Температура T_1 во всех расчетах равнялась 300 K, значения давления задавались 0, 2, 20 и 80 торр для различных случаев. Предполагалось, что с этой границы в камеру осаждения диффундирует только молекулярный водород в соответствии с заданными давлением и температурой. Все частицы, достигшие этой границы, поглощаются.

Температура цилиндрической стенки канала 1 принималось равной 300 K, температура стенок сопла (конуса) – 900 K. Этот выбор температур соответствует оценкам по экспериментальным данным. В расчетах были использованы коэффициенты аккомодации, представленные в табл. 1. При выборе коэффициентов аккомодации использовались данные работ [13–15]. Возможность диссоциации водорода на поверхностях при означенных температурах не рассматривалась. Вероятность рекомбинации H на стенках канала 1 принята равной 0.02. Предварительные расчеты показали незначительное влияние рекомбинация атомарного водорода на стенках сопла 1 на состав смеси у подложки.

Особую сложность представляет учет взаимодействия струи с поверхностью подложки. Для молекулярного водорода принят коэффициент аккомодации, равный 0.5. Вероятность рекомбинации атомарного водорода на подложке 2 принята равной 0.12 [16]. Молекулы H_2, возникшие в результате рекомбинации, улетают с энергией, соответствующей температуре подложки. Рассматривались два варианта взаимодействия частиц Cx с подложкой: их полное поглощение на подложке и диффузное отражение от подложки. Отметим, что анализ экспериментальных и чис-

Таблица 1

Коэффициенты аккомодации	H_2	H	Cx
Стенки канала 1	0.04	0.02	1
Подложка 2	0.5	0.1	1
Стенка 3	0.5	0.875	1

ленных результатов показал, что на синтез алмаза идет меньше одной сотой из подлетающих к подложке углеродсодержащих частиц.

Несмотря на модельность выбранных условий, проведенные расчеты позволили выявить ряд важных закономерностей формирования потока частиц на подложку.

В ходе вычислений определялись макропараметры потока: плотность, скорость, расход и температура каждого компонента смеси. При моделировании на каждом временном шаге использовалось от 5×10^6 до 7×10^6 частиц. Временной шаг составлял 2.5 наносекунды, шаг по пространству варьировался от 0.04 до 0.7 мм. Всего для расчета использовалось 150000 ячеек. Точность расчетов контролировалась путем выбора различных шагов сетки и временных интервалов алгоритма ПСМ. Решение считалось точным, если дальнейшее уменьшение шага сетки и временного интервала не приводило к выходящему за пределы статистической погрешности изменению вычисляемых параметров. Число временных шагов на стационарном этапе моделирования составляло 10^5.

3. АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЯ СМЕСИ ГАЗОВ МЕЖДУ СОПЛОМ И ПОДЛОЖКОЙ

Взаимодействие плазмы с подложкой в традиционной схеме газофазного осаждения с использованием почти покоящейся СВЧ-плазмы и в данном методе газоструйного осаждения, использующего сверхзвуковую струю для транспортировки активных компонент к подложке, существенно различаются. Пример взаимодействия струи с подложкой приведен в [10], где показано сверхзвуковое течение за звуковым соплом. Эту область течения можно разделить условно на 3 участка: свободное расширение в затопленное пространство до замыкающей ударной волны (диска Маха), течение между диском Маха и зоной взаимодействия струи с подложкой, и собственно зона смешения газа струи и потока со стороны подложки (сжатый слой). Поведение газа существенно зависит от давления в камере осаждения, взаимодействия с подложкой и возможного взаимодействия с окружающими поверхностями.

3.1. Анализ течения

Расчеты были выполнены для истечения в вакуум и затопленное пространство с давлением фонового газа 2, 20 и 80 торр. На рис. 4 показано распределение скоростей (а, б) и поступательных температур (в, г) H и Cx на оси струи для различных давлений при диффузном отражении и полном поглощении Cx. Отметим близкие значения макропараметров течения для истечения в вакуум и затопленное пространство с давлением фонового газа 2 торра. При низких давлениях (вакуум и 2 торра) на начальном участке струи наблюдается разгон тяжелых частиц легкими. Далее наблюдается торможение частиц в сжатом слое, более эффективное для легких частиц. Для более плотных течений характерным являются разгон частиц Cx до диска Маха и выравнивание скоростей за ним. Очевидно слабое влияние отраженных тяжелых частиц на скорость течения. Анализ данных по температуре компонент указывает на существенное термическое равновесие в потоке за ударной волной.

Для увеличения скорости синтеза алмаза необходима организация эффективной транспортировки компонент из разрядной камеры к подложке. В ходе истечения газа наблюдается радиальный разлет частиц, приводящий к уменьшению потока активных компонент на подложку. На рис. 5 приведено радиальное распределение потока атомарного водорода и Cx на расстоянии 2/3 расстояния между выходом из канала и подложкой ($X = 25.33$). Увеличение фонового давления приводит к формированию более плотного ядра струи, что обеспечивает больший удельный поток активных частиц к подложке.

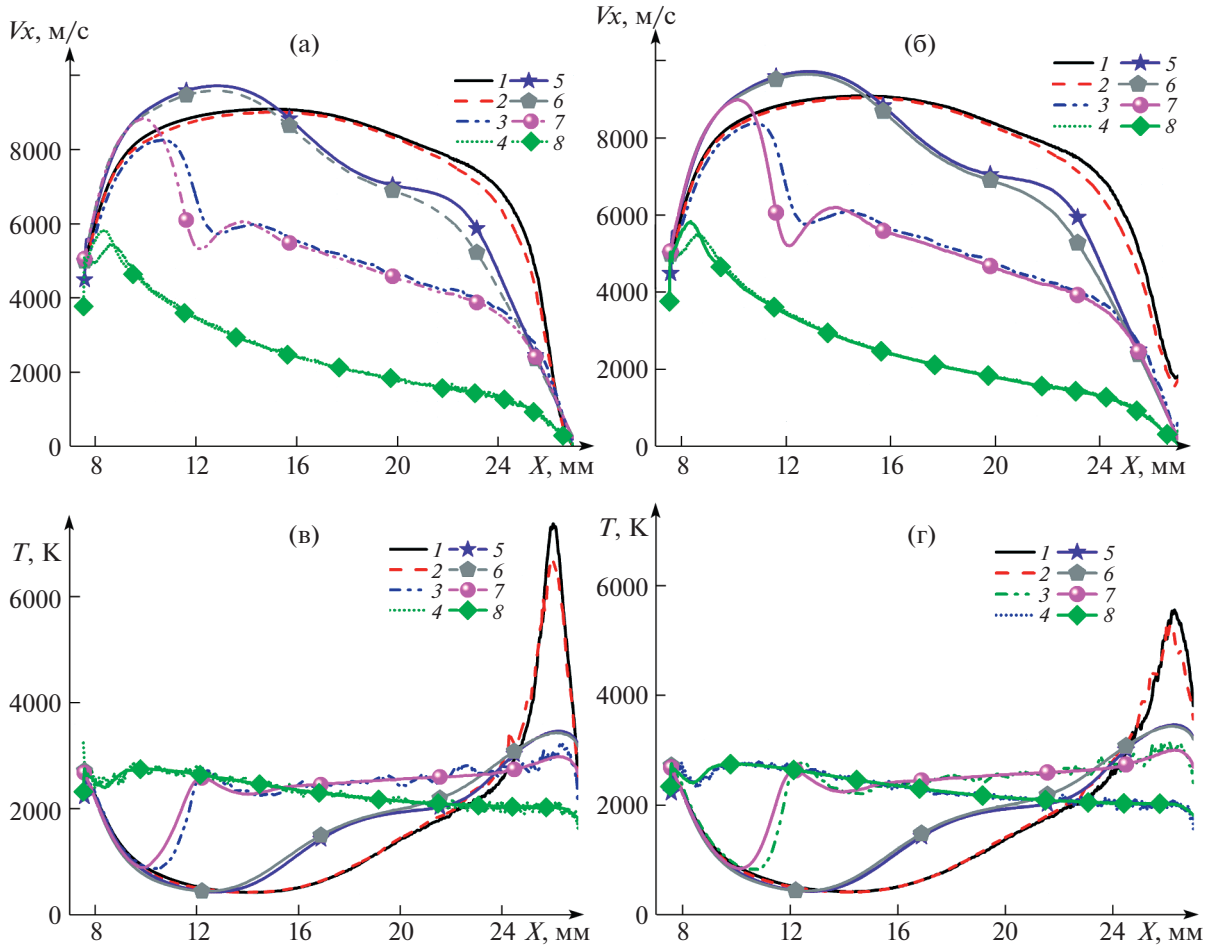

Рис. 4. Распределение скоростей и температуры углеродной компоненты Cx (линии *1–4*) и атомарного водорода (линии *5–8*) вдоль оси для различных давлений (для *1–4* и *5–8*: 0, 2, 20 и 80 торр, соответственно) при диффузном отражении Cx (а, в) и полном поглощении Cx (б, г).

3.2. Анализ потоков частиц на подложку

Для оценки вклада отдельных компонент в процесс синтеза алмаза важно знать их удельный поток на поверхность и энергетическое состояние, включая функцию распределения скоростей. При отсутствии надежных данных о физической механике построения поверхностных алмазных структур приходится ограничиваться оценкой условий с использованием допущений о взаимодействии отдельных молекул с поверхностью алмаза. Несмотря на всю модельность представленных данных, они содержат информацию, полезную для качественной характеристики процесса осаждения.

Отдельный интерес представляет функция распределения скоростей тяжелых частиц при столкновении с подложкой (рис. 6а). Обращает на себя внимание достаточно узкое и почти одинаковое распределение при давлении 20 и 80 торр с наиболее вероятной скоростью около 1000 м/с. Распределения для истечения в вакуум и в область с давлением 2 торра имеют высокоэнергетичный хвост (для варианта с диффузным отражением). Это является подтверждением сохранения частью частиц высокой кинетической энергии (см., например, [17, 18]). Там же представлены данные для случая полного поглощения тяжелых частиц. Оказывается, что истечение в затопленную среду при полном поглощении тяжелых частиц на подложке мало отличается от истечения с полным диффузным отражением. Это может свидетельствовать о слабом влиянии отраженных частиц на скорость подлетающих к подложке. Вероятно, вследствие процессов в сжатом слое.

Углеродсодержащие частицы слабо влияют на функцию распределения по скоростям атомарного водорода при давлении 2, 20 и 80 торр (рис. 6б). Существенное влияние наблюдается только

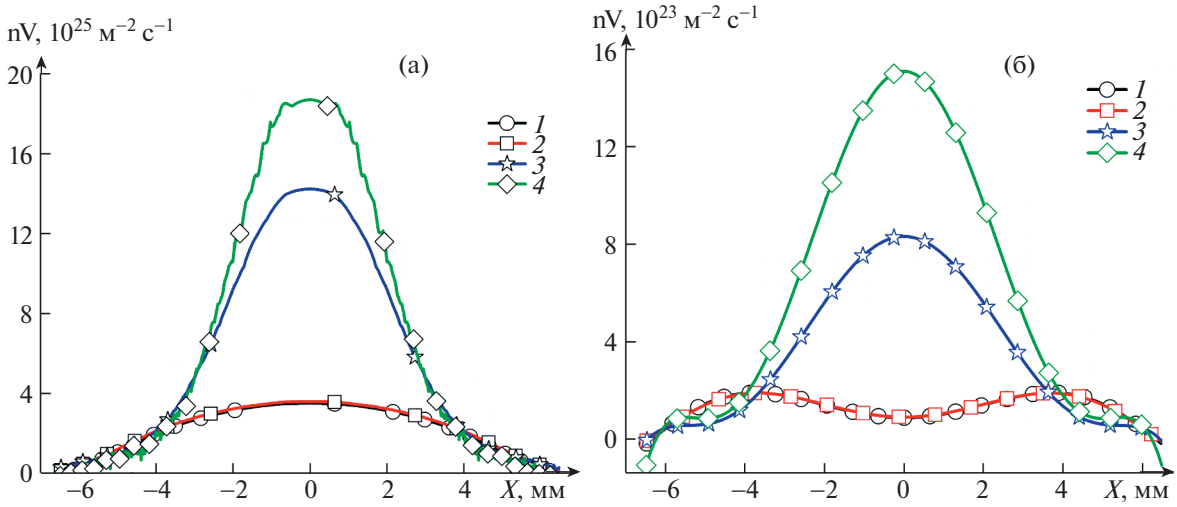

Рис. 5. Радиальное распределение потока атомарного водорода (а) и Cx (б) на расстоянии 2/3 расстояния между выходом из канала и подложкой: $P = 0$, 2, 20, 80торр (линии *1–4*).

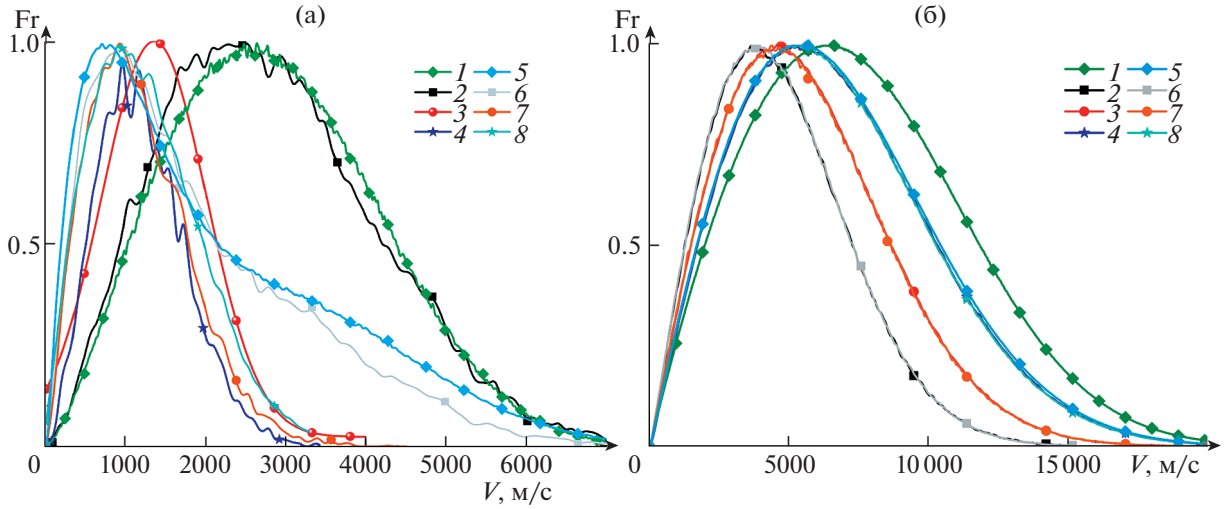

Рис. 6. Функции распределения тяжелых частиц Cx (а) и атомарного водорода (б): (а) – $P = 0$, 2, 20, 80 торр (линии *1–4*) и (линии *5–8*); (б) – $P = 0$, 2, 20, 80 торр (линии *1–4*) и (линии *5–8*); Линии *1–4* – для случая полного поглощения Cx, линии *5–8* – для случая диффузного отражения Cx.

при истечении в вакуум. Это означает, что торможение атомарного водорода происходит в основном на молекулярном и атомарном водороде в сжатом слое. Следует подчеркнуть, что данные для истечения в вакуум и затопленное пространство с давлением 2 торра фактически совпадают для расчета с полным диффузным отражением углеродсодержащих частиц. Это свидетельствует об ограничении возможностей получения высокоэнергетичного потока углеродсодержащих частиц на подложку.

При анализе толщины осажденной пленки важна оценка распределения потоков компонентов по радиусу. На рис. 7 показано распределение удельного потока двух важных компонент при синтезе алмаза – углеродсодержащей компоненты Cx и атомарного водорода по диаметру подложки при полном поглощении Cx на подложке и при его диффузном отражении. В расчетах с давлением более 20 торр наблюдается пик в центре подложки. Аналогичный пик наблюдается в экспериментах. Расчеты истечения в вакуум и при 2 торра показывают формирование некоторого провала в центре для Cx, что обусловлено формированием уплотненного слоя тяжелых частиц. При диффузном отражении плотность и скорость для истечения в вакуум практически сов-

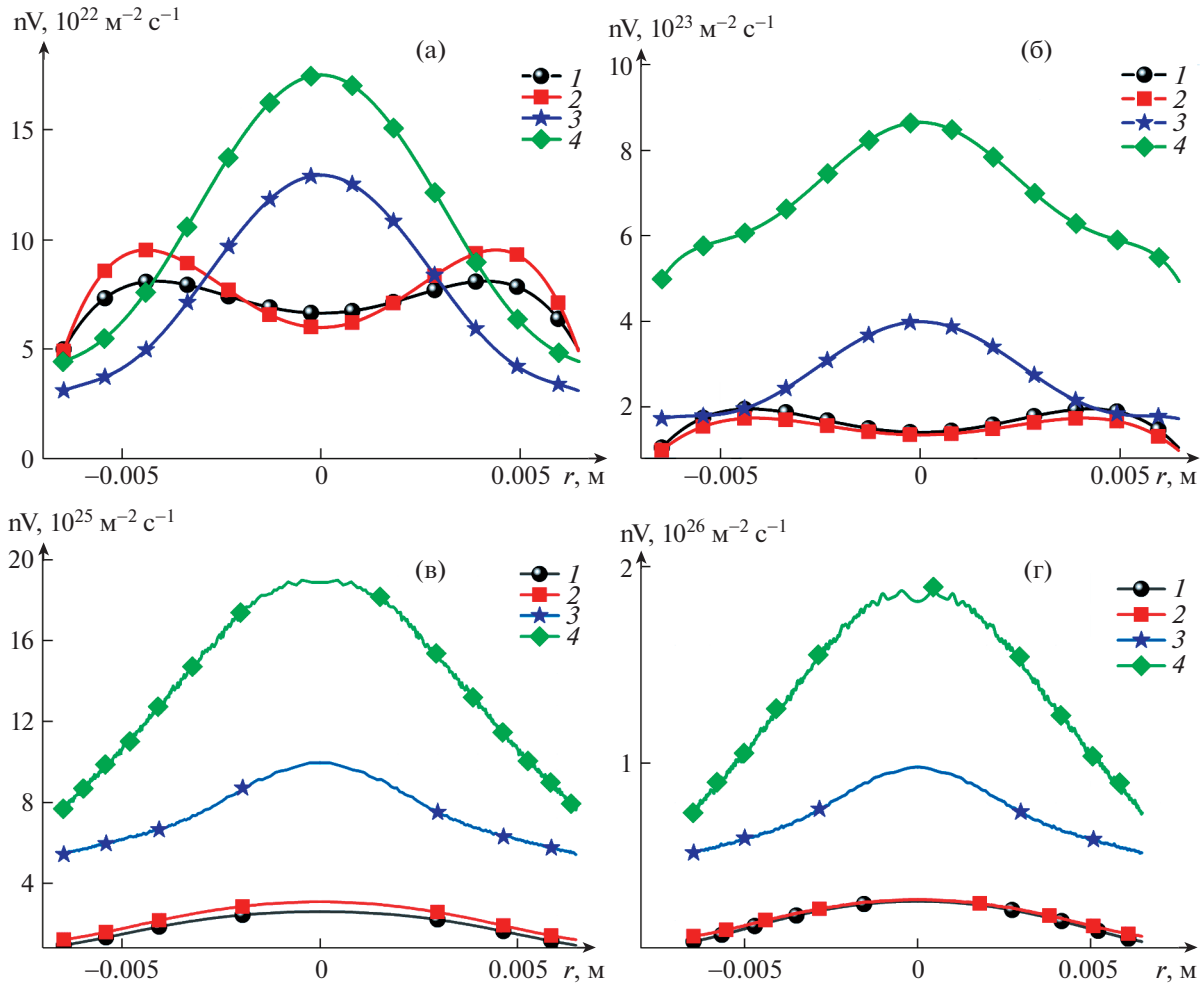

Рис. 7. Аппроксимированные распределения удельного потока Cx (а, б) и атомарного водорода (в, г) по диаметру подложки, при полном поглощении Cx на подложке (а, в) и при диффузном отражении Cx (б, г) для различных давлений фонового газа: $P = 0$, 2, 20, 80 торр (линии *1–4*).

падают с аналогичными данными для случая истечения в затопленное пространство с давлением 2 торра. При дальнейшем увеличении давления фонового газа торможение газов на пути к подложке происходит в условиях диффузии. Оценки потока частиц атомарного водорода на подложку (табл. 2), выполненные по формуле ($n_2V_2/4$) (n_2 и V_2 – осредненные плотность и средняя тепловая скорость атомарного водорода у подложки при температуре T_2), дают величины, близкие к полученным в расчете (рис. 7). Это также подтверждает транспортировку активных частиц к подложке в режиме диффузии.

Существенно, что при повышении давления в 4 раза (с 20 до 80 торр) поток атомарного водорода на подложку повышается в 2 раза, как и поток углеродсодержащей компоненты. Это согласуется с приведенными на рис. 2 экспериментальными данными о скорости роста граней кристаллов алмаза.

Таблица 2. Макропараметры течения атомарного водорода вблизи подложки

P, торр	T_2, К	n_2, м$^{-3}$	поток, м$^{-2}$с$^{-1}$
0	3213	1.3×10^{22}	2.7×10^{25}
2	3195	1.4×10^{22}	2.9×10^{25}
20	2692	5.1×10^{22}	9.7×10^{25}
80	1813	1.2×10^{23}	1.9×10^{26}

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчетно-экспериментальное исследование влияния давления в камере осаждения на процесс газоструйного осаждения алмазных структур показало важные особенности процесса:

1) существенное влияние процессов в сжатом слое, формируемом вблизи подложки, на скорость синтеза алмазных структур;

2) возможность эффективной транспортировки активированных в разрядной камере компонент смеси до сжатого слоя;

3) торможение тяжелых компонент смеси в сжатом слое даже при истечении в вакуум;

4) сильное влияние давления в камере осаждения на диффузный отток атомарного водорода из ядра струи.

Экспериментально показано, что увеличение давления в камере осаждения от 10 до 80 торр приводит к росту скорости синтеза алмазных структур примерно в 4 раза (при сохранении исходной подачи метана и водорода). Анализ расчетных данных показал, что подобный рост возможен за счет увеличения транспортировки строительного материала к сжатому слою у подложки и диффузионной транспортировке к подложке.

Полученные сведения важны для концептуального обоснования принципиальной схемы аппарата для синтеза алмаза.

Авторы благодарят Н.А. Дворникова за предоставленные результаты расчетов по разложению метана при высокой температуре.

Работа выполнена в рамках государственного задания (бюджетные гранты № АААА-А17-117030110017-0, АААА-А17-117022850029-9) и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-29-19069).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Balmer R.S., Brandon J.R., Clewes S.L., Dhillon H.K., Dodson J.M., Friel I., Inglis P.N., Madgwick T.D., Markham M.L., Mollart T.P., Perkins N., Scarsbrook G.A., Twitchen D.J., Whitehead A.J., Wilman J.J. and Woollard S.M.* Chemical vapour deposition synthetic diamond: materials, technology and applications // Journal of Physics Condensed Matter. 2009. V. 21. № 36. P. 364221:1–23.
2. *May P.W.* Diamond thin films: a 21st-century material // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 2000. V. 358. P. 473–495.
3. *Rutledge T.S., Micci M.M., Bilen S.G.* Design and initial tests of a low power radio-frequency electrothermal thruster // 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. 2008. Published Online: 15 Jun 2012.
4. *Clemens D.E.* Performance evaluation of the microwave electrothermal thruster using nitrogen, simulated hydrazine, and ammonia. A Dissertation in Aerospace Engineering. For the Degree of Doctor of Philosophy. 2008. 93 p.
5. *Емельянов А.А., Ребров А.К., Юдин И.Б.* Осаждение алмазных структур из взаимодействующих газовых струй // ЖТФ. 2016. Т. 86. № 12. С. 56–59.
6. *Ребров А.К., Емельянов А.А., Плотников М.Ю., Юдин И.Б.* Синтез алмазных структур из струи смеси $H_2 + CH_4$ в спутном осесимметричном потоке водорода // ПМТФ. 2017. Т. 58. № 5 (345). С. 142–150.
7. *Rebrov A., Plotnikov M., Mankelevich Y., Yudin I.* Analysis of flows by deposition of diamond-like structures // Phys. Fluids. 2018. V. 30. № 16106. P. 1–11.
8. *Ребров А.К., Исупов М.В., Литвинцев А.Ю., Буров В.Ф.* Синтез алмазов из микроволновой плазмы с использованием сверхзвуковых потоков газа // ПМТФ. 2018. Т. 59. № 5. (351). С. 5–12.
9. *Rebrov A.K., Bobrov M.S., Emelyanov A.A., Timoshenko N.I., Hrebtov M.Yu., Yudin I.B.* Experience in the synthesis of diamond from a supersonic microwave plasma jet // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2019. V. 7. № 2. P. 131–137.
10. *Ребров А.К., Емельянов А.А., Плотников М.Ю., Тимошенко Н.И., Юдин И.Б.* Синтез алмаза из высокоскоростного потока СВЧ плазмы // ДАН, Технические науки. 2020. Т. 490. № 1. С. 48–51.
11. *Bird G.A.* Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows. Oxford: Clarendon Press, 1994. P. 458.
12. *Ivanov M.S., Rogasinsky S.V.* Analysis of numerical techniques of the direct simulation Monte Carlo method in rarefied gas dynamics // Soviet J. Numer. Anal. Math. Modelling 1988. V. 3. № 6. P. 453–466.
13. *Коленчиц О.А.* Тепловая аккомодация систем газ–твердое тело. Минск: Наука и техника, 1977. 126 с.
14. *Song S., Yovanovich M.M.* Correlation of Thermal Accomodation Coefficient for Engineering Surface // ASME HTD 1987. V. 69. P. 107–115.
15. *Goodman F.O., Wachman H.Y.* Formula for Thermal Accommodation Coefficients // J. Chem. Phys. 1967. V. 46. № 6. P. 2376–2386.
16. *Krasnoperov L.N., Kalinovski I.J., Chu H.N., Gutman D.* Heterogeneous Reactions of H Atoms and CH3 Radicals with a Diamond Surface in the 300–1133 K Temperature Range // J. Phys. Chem. 1993. V. 97. P. 11787–11796.
17. *Maltsev R.V., Plotnikov M.Yu., Rebrov A.K.* Shock structure in low density gas mixture flows over cylinders and plates // Phys. Fluids. 2007. V. 19. № 10. P. 10106102.
18. *Плотников М.Ю., Ребров А.К.* Релаксационные процессы при гиперзвуковом обтекании цилиндра бинарной смесью разреженных газов // Изв. РАН. МЖГ. 2008. № 3. С. 178–188.