

ОТЗЫВ

на диссертацию Быкова Николая Юрьевича на тему “Моделирование процессов образования и роста наноразмерных кластеров в разреженных струйных течениях”, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – “Механика жидкости, газа и плазмы”.

Диссертация Быкова Николая Юрьевича “Моделирование процессов образования и роста наноразмерных кластеров в разреженных струйных течениях” посвящена построению математических моделей процессов кластеризации и численному исследованию газодинамики конденсирующихся разреженных струй.

Актуальность работы связана с приложениями в областях (i) аэрокосмической техники (формирование кластеров в дальнем поле струй ракетных двигателей, работающих в верхних слоях атмосферы; воздействие разреженных струй с кластерной фракцией на поверхности космических летательных аппаратов); (ii) вакуумной техники (оптимизация существующих и разработка новых вакуумных газоструйных технологий синтеза кластеров и нанокластерных покрытий); (iii) исследования природных феноменов, таких как динамика разреженных атмосфер комет, формирующихся при испарении газов с поверхности кометного ядра. В широком смысле образование малых субнаноразмерных кластеров предшествует формированию макрокапель конденсата в любом конденсирующемся течении, что потенциально расширяет круг возможных приложений выполненного исследования.

Расчет пространственных течений химически-реагирующей смеси газов, к которым относятся течения с протекающими процессами конденсации, представляет собой сложную вычислительную задачу и требует создания соответствующих моделей и алгоритмов. Вопросам разработки моделей конденсации в приложении к разреженным течениям газа посвящена центральная часть диссертационной работы Быкова Н.Ю. Автором предложен комплекс моделей образования кластеров в объеме струи как на основе кинетического подхода, так и модификаций классической теории нуклеации. Модели, разработанные для метода прямого статистического моделирования, являются новыми, физически адекватно описывают рассматриваемые процессы, позволяют проводить расчеты течений с учетом образования кластеров в широком диапазоне определяющих параметров. Результаты, полученные с использованием предложенного комплекса алгоритмов и моделей, показывают хорошее совпадение с имеющимися экспериментальными данными. Достоинством разработанных компьютерных алгоритмов является возможность проведения моделирования на суперкомпьютерах, обеспечивая минимальное время счета для определенных параметров задачи. Созданный комплекс моделей образования кластеров может быть использован для расчетов конкретных приложений, таких как технологии синтеза кластерных материалов при импульсной лазерной абляции в вакууме, вакуумном газоструйном осаждении наноструктурных пленок и пр.

С использованием разработанного пакета моделей и алгоритмов автор выполнил численное исследование следующих классов задач: стационарное расширение атомарных

09/2-303 от 27.12.2018

и молекулярных паров в вакуум с учетом процессов формирования и роста кластеров. стационарное течение разреженного конденсирующегося пара в смеси с несущим инертным газом, нестационарное расширение атомарного пара в вакуум с учетом процессов кластеризации.

В ходе анализа и теоретического обобщения данных установлены важные для понимания физики явления закономерности. Показано, что для разреженных струй, истекающих в вакуум, в объеме течения формируются кластеры субнаноразмерного диапазона. Скорости и поступательные температуры кластеров в стационарной струе близки к скорости и поступательной температуре пара мономеров. Внутренние температуры кластеров выше поступательной температуры пара. Влияние конденсации на параметры пара становится существенным при объемной доле кластеров в струе более одного процента и сводится к увеличению скорости и поступательной температуры пара, снижению его плотности. Процесс роста кластеров замораживается на расстоянии нескольких радиусов от выходного отверстия источника стационарной струи. В работе выполнены сравнения с экспериментальными данными по конденсации в стационарных струях водяного пара и паров меди. Для паров меди проведено сравнение с экспериментально полученными законами подобия. Результаты сравнений показали хорошее совпадение с указанными данными, что подтверждает правильность разработанных алгоритмов и моделей.

Важное прикладное значение для исследования динамики процессов роста наноструктурных пленок в технологиях вакуумного газоструйного осаждения имеет рассмотренная в диссертации задача формирования кластеров металлов в струе смеси пар металла – инертный газ. Автором работы показан эффект роста как степени кластеризации струи, так и размера наблюдаемых кластеров в случае дополнительной подачи несущего инертного газа в источник паров металла. Для высокотемпературного источника паров серебра реальной геометрии установлен диапазон технологических параметров, для которого характерно появление кластеров в струе.

В диссертации выполнено исследование и нестационарных конденсирующихся течений разреженного газа. Нестационарная задача рассмотрена в постановке, характерной для лазерной абляции металлов в вакууме наносекундными импульсами излучения умеренной интенсивности. Автор диссертации разработал модель и численный алгоритм расчета согласованных тепловой задачи прогрева облучаемой мишени и газодинамической задачи движения пара для исследования процессов конденсации в расширяющихся в вакуум продуктах лазерной абляции. Применение алгоритма для расчета лазерного испарения ниобиевой мишени позволило получить данные о параметрах формирующихся в струе кластеров и сделать важные выводы о влиянии процесса конденсации на параметры течения. Установлен эффект уменьшения осевой направленности лазерной струи и увеличения ее поперечных размеров при протекании процессов формирования и роста кластеров в объеме струи.

В диссертационной работе представлены новые модели конденсации для расчетов разреженных течений с процессами формирования кластеров, разработаны высокопроизводительные компьютерные алгоритмы метода прямого статистического моделирования. Выполнено численное исследование, анализ и теоретическое обобщение

широкого класса задач формирования кластеров в стационарных и импульсных разреженных струях атомарных и молекулярных паров. Работа вносит существенный вклад в область механики реагирующего разреженного газа и вычислительной газовой динамики.

Диссертация Быкова Николая Юрьевича на тему: «Моделирование процессов образования и роста наноразмерных кластеров в разреженных струйных течениях» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 01.09.2016 № 6821/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Быков Николай Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Ястребов Сергей Гурьевич,

доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, ул.Политехническая, д.26, Санкт-Петербург, Россия, 194021

тел +79112352130 электронная почта Yastrebov@mail.ioffe.ru

