

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации **Кадочникова Ильи Николаевича** «*Исследование термически неравновесных физико-химических процессов в азотной и воздушной плазме с использованием детальных уровневых и модовых кинетических моделей*» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Развитие универсальных моделей физико-химических процессов в гиперзвуковых потоках химически реагирующего газа является актуальной задачей. В этой связи кинетические модели, позволяющие описывать процессы с участием высоко возбуждённых частиц, электронно-возбуждённых состояний в отсутствие термического равновесия, плазмохимические реакции представляет особый интерес. В рецензируемой работе предложены новые кинетические уровневые и модовые модели, которые использованы для численного моделирования физико-химических процессов в одномерных течениях азотной и воздушной плазмы, даны рекомендации по выбору приближения при описании нарушения равновесия при возбуждении высоко лежащих колебательных состояний реагирующих молекул.

Одним из важнейших результатов, полученных автором, является детальная уровневая модель физико-химических процессов для воздушной плазмы, в которой уравнения поуровневой кинетики решаются для молекул  $N_2$ ,  $O_2$  и  $NO$  не только в основном, но и в возбуждённых электронных состояниях, и учитывается широкий набор химических и плазмохимических реакций. Это наиболее полная модель элементарных процессов в неравновесной воздушной плазме, известная на текущий момент. В рецензируемой работе сопоставлены результаты численного моделирования по модели поуровневой кинетики и модели так называемого модового подхода, который существенно экономит вычислительные ресурсы. Показаны предельные условия, за которыми модовый подход даёт результат, существенно отличающийся от модели поуровневой кинетики. Безусловным достоинством работы является сопоставление результатов моделирования с существующими экспериментальными данными. Одна из глав работы посвящена применению модифицированных автором модовых моделей, описывающих параметры азотной и воздушной плазмы за фронтом сильной ударной волны. Показано, что удалось добиться точности близкой к точности уровневых моделей.

К содержанию работы имеется два замечания:

1) В отличие от представленных в литературе уровневых моделей в данной работе в моделях не учитывается нарушение максвелловского распределения электронов по энергии;

2) При моделировании релаксационных процессов за фронтом ударной волны в качестве граничных условий использовались параметры газа непосредственно за фронтом, определяемые из законов сохранения в предположении, что при переходе через фронт состав смеси и заселённости уровней атомов и молекул остаются неизменными, что не учитывает, к примеру, появление электронного предвестника и разделение зарядов во фронте ударной волны, наблюдавшиеся экспериментально. В качестве одного из приближений подход соискателя безусловно применим, но для корректного описания физико-химических процессов с участием плазмы в ударных волнах эти эффекты необходимо учитывать.

Однако данные недостатки не снижают научной ценности работы.

На основании материалов автореферата считаю, что представленная к защите диссертация Кадочникова И. Н. безусловно соответствует всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а её автор достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Старший научный сотрудник ОИВТ РАН  
Кандидат физико-математических  
наук по специальности  
«Физика и химия низкотемпературной плазмы»

Контактные данные:  
Адрес: 127349 Москва  
Алтуфьевское ш. д.78, кв.392  
Т.: +7(916)437-40-95  
ziborov.vs@yandex.ru



Подпись подтверждаю:  
Учёный секретарь ОИВТ РАН  
д.ф.-м.н.

Амиров Р.Х.

31.01.2019г.  
Зиборов В.С.