

**ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**  
на диссертацию Облапенко Георгия Павловича  
«СКОРОСТЬ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ В ВЯЗКИХ НЕРАВНОВЕСНЫХ  
ТЕЧЕНИЯХ ГАЗОВ»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

**Актуальность работы**

Диссертация Облапенко Г.П. посвящена разработке теоретических моделей и численному исследованию скорости физико-химической релаксации в неравновесных течениях вязких газов. Корректное описание процессов колебательной релаксации и химических реакций в сильнонеравновесных течениях является крайне актуальной задачей газовой динамики, так как релаксационные процессы могут существенно влиять на поле течения и диссипативные процессы. Разработка точных моделей скорости неравновесных процессов позволит улучшить проектирование тепловой защиты космических летательных аппаратов, повысить точность интерпретации экспериментов, выработать рекомендации относительно возможности применения простых инженерных моделей.

**Объем и структура диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 147 страниц, список литературы содержит 183 наименования.

Во введении автором рассмотрены способы описания течений разреженного газа и существующие модели колебательной и химической релаксации. Дан обзор работ, посвященных физико-химической релаксации в вязких газах; обоснована научная значимость и новизна диссертации.

В первой главе разработана теоретическая модель скорости физико-химической релаксации в нулевом (невязком) и первом (вязком) приближениях метода Энскага-Чепмена; получены системы уравнений для численного расчета вязких поправок к скорости физико-химических процессов.

Во второй главе диссертации приведен обзор существующих моделей сечений быстрых и медленных процессов, коэффициентов скорости неравновесных процессов, времен колебательной релаксации. Автор приводит результаты расчетов времен колебательной релаксации по разработанному им методу их расчета, проводит сравнение

с широко используемой моделью Милликена-Уайта, а также экспериментальными данными, полученными в НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова.

В третьей главе диссертации приводятся результаты численных расчетов скорости физико-химической релаксации с учетом вязких эффектов, как в чистом газе (азоте), так и в бинарных смесях азота и кислорода, а также в течениях за сильными ударными волнами и в соплах. Полученные результаты сравниваются с существующими моделями скорости колебательной и химической релаксации, изучаются границы применимости упрощенных моделей колебательной релаксации.

В четвертой главе автор рассматривает моделирование течений с физико-химической неравновесностью методом прямого статистического моделирования. Дан обзор основных используемых моделей релаксации и краткое описание алгоритмов их реализации. Автором в программном коде для расчетов течений методов прямого статистического моделирования были реализованы поуровневые модели переходов колебательной энергии в поступательную; рассмотрены различные течения и изучено влияние выбора модели колебательной релаксации и учет многоквантовых переходов на поведение поступательной и колебательной температур.

В заключении перечислены основные результаты, полученные автором диссертации.

### **Научная новизна**

Научной новизной обладают следующие результаты: самосогласованная модель скорости физико-химических процессов в многотемпературном приближении; упрощенная формула для скорости колебательной релаксации; оценка роли вязких поправок к скорости колебательной и химической релаксации; систематический анализ влияния степени колебательной неравновесности, состава и температуры смеси на величину вязких поправок, исследование роли перекрестных эффектов. Автором впервые изучено влияние выбора модели колебательной релаксации и роль многоквантовых переходов при расчете течений методом прямого статистического моделирования.

### **Практическое значение**

Результаты работы имеют практическую ценность. Так, в работе разработан метод расчета времен колебательной релаксации, корректно описывающий их поведение при высоких температурах; получено обобщение формулы Ландау-Теллера для скорости колебательной релаксации на случай сильных отклонений от колебательного равновесия.

Изучена роль многоквантовых переходов при моделировании течений методом ПСМ. Данные результаты могут быть использованы в прикладных расчетах.

### **Достоверность результатов**

Достоверность полученных автором результатов обеспечена применением хорошо разработанных методов кинетической теории, использованием при расчетах современных моделей взаимодействия частиц; сравнением с имеющимися в литературе экспериментальными и расчетными данными. Результаты работы отражены в 14 публикациях (8 – в журналах, рекомендованных ВАК). Работа прошла апробацию на всероссийских и международных конференциях.

### **Замечания по работе**

1. Автор при анализе времен колебательной релаксации и ссылается на данные квазиклассических траекторных расчетов, однако на графиках эти результаты никак не отражены.
2. Приведенные расчеты скорости колебательной релаксации в чистом азоте показывают существенное влияние ангармоничности колебательного спектра на скорость колебательной релаксации, однако далее автор рассматривает только течения, в которых молекулы имеют гармонический колебательный спектр.
3. При расчетах скорости физико-химической релаксации за сильными ударными волнами и в соплах сначала решается одномерная задача в невязком приближении, а затем на основе рассчитанных за фронтом ударной волны температур, плотностей и скорости вычисляются вязкие поправки. Такой подход не является полностью самосогласованным и не позволяет до конца оценить, насколько сильное влияние поправки первого порядка имеют на реальные течения.

Данные замечания не снижают общей положительной оценки работы и носят рекомендательный характер. В целом работа представляет собой законченное исследование, вносящее заметный вклад в развитие физико-химической газовой динамики. Диссертация написана ясным языком, хорошо структурирована. Основные результаты работы опубликованы. Автореферат верно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа полностью удовлетворяет паспорту специальности 01.02.05 и отвечает всем требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года. Считаю, что ее автор Облапенко Георгий Павлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «механика жидкости, газа и плазмы».

Почтовый адрес организации: 141014, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24

Государственное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Московский государственный областной университет»

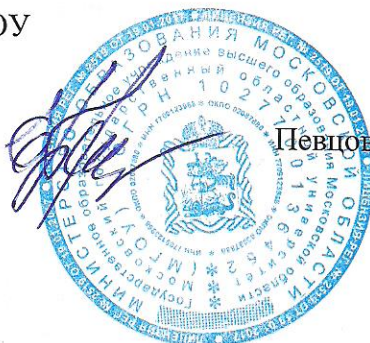
Телефон: (495) 780 – 09 – 43

E-mail: [kaf-tfiz@mgou.ru](mailto:kaf-tfiz@mgou.ru)

Профессор кафедры теоретической физики,  
доктор физико-математических наук

  
Кузнецов Михаил Михайлович

Подпись Кузнецова М.М. заверяю  
Проректор по научной работе МГОУ  
доктор юридических наук,  
доктор педагогических наук,  
профессор



Певцова Елена Александровна

«24» 03 2017 г.