

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации **Тихоновец Алены Васильевны** «РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОЙ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТЕЧЕНИЙ ВЫСОКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕРАВНОВЕСНОСТИ», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

**Актуальность.** При входе в атмосферу спускаемый аппарат проходит режимы обтекания от свободно-молекулярного и переходного до сплошнородного. Гиперзвуковые летательные аппараты могут проходить их не один раз за полёт. При решении задач проектирования (особенно на начальном этапе), а также при решении задач динамики полёта (бортовым вычислителем, например) остро необходимо иметь быстрые (в режиме реального времени) и эффективные методы оценки аэродинамических и аэротермодинамических характеристик летательного аппарата. Аналогичные задачи приходится решать при проектировании и эксплуатации микро электромеханических систем (МЭМС), для которых характерный масштаб явления сравним с длиной свободного пробега молекул газа при нормальных условиях. С этих точек зрения актуальность задачи, решаемой диссертантом, не вызывает сомнения.

**Научная новизна работы** состоит в создании комбинированного метода, объединяющего кинетическую (в рамках модельного кинетического уравнения для многоатомных газов в приближении однокомпонентной смеси) и гидродинамическую (в рамках краевой задачи для уравнений Навье – Стокса с удержанием члена с объёмной вязкостью) модели течения.



**Практическая значимость** результатов, полученных автором, состоит в создании физико-математической модели и расчётной схемы, повышающих эффективность численного моделирования неравновесных течений.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается верификацией в методических расчётах, согласованием получаемых результатов с данными теории и экспериментов для ряда модельных и тестовых задач.

**Апробация метода** выполнена в виде ряда выступлений на российских и международных научных семинарах и конференциях, а также в публикациях, список которых приведен в автореферате.

**В первой главе** изложена предложенная автором физико-математическая модель и решаемые краевые задачи. В частности, в качестве граничных условий для кинетического уравнения использован закон диффузного отражения с полной аккомодацией энергии (зеркально-диффузная модель Максвелла). Имеет смысл включить в численную схему иные законы отражения, например, модель Черчиньяни (скорость отраженных молекул определяется коэффициентом аккомодации тангенциального импульса) или модели Черчиньяни-Лампис и Черчиньяни-Лампис-Лорда, позволяющие задать коэффициенты аккомодации тангенциальной и нормальной кинетической энергии, модель Ночиллы, моделирующая свойства поверхности.

**Во второй главе** в качестве тестовой задачи рассмотрено пристеночное течение Куэтта. Учитывая, что корректность гидродинамической задачи (краевая задача для уравнений Навье - Стокса) не доказана, следовало бы рассмотреть иные условия на выходной границе и сравнить поток массы на входной и выходной границах для мягких и жёстких граничных условий. Для мягких условий, используемых диссертантом, на выходной границе расход



может не сохраняться. Следовало бы также провести расчёты и привести результаты параметрических исследований.

**В третьей главе** решается задача о структуре ударной волны. В этой задаче (как, впрочем, и во всех остальных) не указаны шаги расчётной сетки и шаг по времени. На стр. 14 говорится о выборе параметра  $s$  «из соображений **наилучшего совпадения** (совпадение может быть или небыть) профиля плотности...». Корректнее было бы ввести норму и минимизировать невязку в этой норме, например,  $\min \left( \sum_i (\rho_{calc} - \rho_{exp})^2 \right)$ .

**В четвёртой главе** (судя по автореферату, самой большой по объёму) рассмотрена задача об обтекании активной поверхности, поставленной поперек потока. Не убедительна симметризация задачи и рассмотрение четверти пространства для плоского течения: это оправдано при отсутствии вязкости, например, в случае потенциального обтекания в гидродинамической области. То же самое можно сказать о пространственном случае.

**По тексту автореферата могут быть сделаны следующие замечания:**

1. Слово сочетание «удовлетворительное совпадение» звучит странно (стр. 8 автореферата). Совпадение может либо быть, либо не быть.
2. При решении первой тестовой задачи следовало бы сравнить поток массы на входной и выходной границах. Судя по тому, что на выходной границе заданы мягкие условия, расход не должен сохраняться.
3. Следовало бы наряду с «мягкими» граничными условиями на выходной границе рассмотреть иные условия, например, «жёсткие» условия (повторение условий на входной границе) для гидродинамической задачи



и иной закон стенки (в работе использован закон диффузного отражения с полной аккомодацией энергии).

4. В качестве пожелания хотелось бы предложить диссертанту сравнить решения с учётом и без учёта объёмной вязкости.

Высказанные замечания не снижают научную значимость и прикладное значение выполненной работы.

Судя по автореферату, диссертация **Тихоновец Алены Васильевны** представляет собой самостоятельную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение научной задачи, имеющей существенное значение для авиационной практики и технологии МЭМС.

**Работа отвечает паспорту специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, а ее автор достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.**

Доктор технических наук, профессор  
Главный научный сотрудник ФГУП ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского»,

140180 Россия, Московская область,  
г. Жуковский, ул. Жуковского, 1  
тел. 8-985-815-49-20 (моб.)  
8-495-556-43-27 (раб.)  
viktor.vyshinskiy@tsagi.ru

30.11.2020

Виктор Викторович Вышинский

Подпись официального оппонента  
Виктора Викторовича Вышинского заверяю

Ученый секретарь диссертационного Совета  
ФГУП «ЦАГИ», доктор физико-математических наук



Мурад Абрамович Брутян