

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Брызгалова Андрея Ивановича
«Численное моделирование течений неравновесной плазмы в высокочастотном плазмотроне», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа А.И. Брызгалова посвящена теоретическому исследованию течений неравновесной плазмы в высокочастотных индукционных плазмотронах на основе методов численного моделирования с учетом основных физических процессов, протекающих в этих устройствах.

При разработке и создании объектов космической техники одной из важных задач является разработка теплозащитных покрытий. При этом возникают сложные вопросы обеспечения заданных эксплуатационных характеристик тепловой защиты, снижения их веса и стоимости, повышения надежности. В индукционном плазмотроне поток плазмы с высокой температурой (6-10 тысяч К) выходит в барокамеру и натекает на испытываемый образец, моделируя обтекание космического аппарата при входе в атмосферу. Такие исследования с помощью индукционных плазмотронов проводятся во многих странах мира (Россия, Германия, Япония, Бельгия). Экспериментальные исследования позволяют измерить ряд параметров теплозащитного экрана при воздействии высокоскоростных потоков плазмы. Вместе с тем, многие важные характеристики не удается измерить непосредственно и для их определения необходимо использовать методы физико-математического моделирования. В ИПМех РАН созданы ВЧ-плазмотроны ВГУ-3 (мощность 1 МВт) и ВГУ-4 (100 кВт). Эти плазмотроны по параметрам соответствуют условиям входа КА в атмосферу Земли на высотах 60-65 км. При этом в течении важна химическая неравновесность (в области пограничного слоя), а для высокоэнтальпийных потоков возможна температурная неравновесность плазмы. Все это говорит об **актуальности темы диссертации**.

В рамках настоящей работы решен ряд принципиальных задач. Автором работы реализована методика численного расчета течения плазмы, применимая в широком диапазоне параметров плазмы, скоростей потока (как дозвуковых, так и сверхзвуковых) и каталитической активности поверхности. В расчетах используется метод конечных объемов (на неравномерной декартовой сетке) и современные численные схемы семейства AUSM (Advection Upstream Splitting Method). В работе проведены расчеты течения воздушной и азотной плазмы в барокамере плазмотронов ВГУ-4 и ВГУ-3 для ряда режимов работы установки и типов материала поверхности образцов. При этом показано, что неоднородность теплового потока по поверхности датчика невелика (менее 5%), что подтверждает правомерность используемой методики испытаний материалов. Результаты расчетов позволили установить, что одномерная модель расчета электрического поля применима для плазмотронов средней мощности, а для более мощных плазматронов необходимо использовать двумерную модель расчета поля. В связи со сказанным выше, не вызывает сомнения **научная новизна** результатов, полученных в диссертационной работе А.И. Брызгалова.

Разработанные комплексы программ для моделирования течения в плазмотроне и полученные на его основе результаты позволяют провести расчет

нагрева тел в потоках плазмы различных газов, что важно при анализе эрозионного разрушения теплозащиты и существенно дополняет данные экспериментов. Проведенные автором систематические исследования течения плазмы для различных режимов работы плазмотрона и типов материала поверхности образцов важны для решения широкого круга задач высокоскоростного обтекания тел, что определяет **научную и практическую значимость** результатов, полученных в диссертации.

Диссертация А.И. Брызгалова является законченной научно-исследовательской работой, вносящей существенный вклад в развитие механики жидкости, газа и плазмы, и подтверждающей высокую квалификацию автора. Основные положения и результаты исследований А.И. Брызгалова докладывались на научных конференциях высокого уровня, список публикаций включает 11 работ, 2 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 4 – в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 4 – в тезисах докладов. Зарегистрирована 1 программа для ЭВМ.

Автореферат диссертации позволяет составить достаточно полное представление о диссертационной работе, которая сделана на хорошем научном уровне и является законченным научным исследованием.

Диссертационная работа «Численное моделирование течений неравновесной плазмы в высокочастотном плазмотроне», соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Брызгалов Андрей Иванович заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Заместитель директора по научной работе и инновационной деятельности
Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
к.т.н.



В.В. Савчин

Главный научный сотрудник
Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
д. ф.-м. н.

А.С. Сметанников