

## ОТЗЫВ

официального оппонента Л.С. Яновского

на диссертационную работу Хазова Дмитрия Евгеньевича

«Численное моделирование процессов энергоразделения в потоках сжимаемого газа»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности

1.3.14 — теплофизика и теоретическая теплотехника

Процессы энергоразделения в газовых потоках широко используются в различных классах практических задач, таких как, например, кондиционирование воздуха в салонах летательных аппаратов, в холодильных и осушительных установках и т.д. Большой интерес представляет газодинамический метод энергоразделения в сверхзвуковом потоке, впервые предложенный А. И. Леонтьевым. В основе этого метода лежит эффект энергоразделения в пограничном слое сжимаемого газа: отличие температуры теплоизолированной стенки от температуры адиабатически заторможенного газа, причем разница температур увеличивается с ростом числа Маха.

В качестве нового технического решения проблемы повышения эффективности данного безмашинного метода энергоразделения предложено применение проницаемых стенок между двумя потоками — дозвуковым и сверхзвуковым — газа. В литературе опубликован ряд экспериментальных и расчетно-теоретических работ, в результате которых была доказана работоспособность метода и устройств безмашинного энергоразделения с проницаемыми поверхностями. Вместе с тем создание научных основ проектирования подобных устройств энергоразделения требует уточнения методик расчета характеристик и оценки их энергоэффективности.

В связи с этим диссертационная работа Д. Е. Хазова, посвященная построению методик расчета рабочего процесса в газодинамических устройствах энергоразделения и анализу влияния различных конструктивных и входных рабочих параметров на их энергоэффективность, выполнена, безусловно, на актуальную тему.

Во введении в диссертацию автором приведен обзор научной литературы по вопросам безмашинного, в т.ч. газодинамического, энергоразделения, обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель и поставлены задачи работы. Автор резюмирует научную новизну и практическую значимость результатов своих исследований.

В главе 1 выполнен анализ процессов безмашинного энергоразделения потока газов. Выявлены основные физические механизмы, влияющие на перераспределение энтальпии торможения. Автором введены количественные характеристики процесса энергоразделения в виде разности температур торможения на горячем и холодном выходах и на входе в устройство.

Основное внимание автор уделит процессу энергоразделения в пограничном слое. При этом проанализированы процессы энергоразделения в двух устройствах: в газодинамическом А. И. Леонтьева и в его модификации с проницаемой газоразделительной стенкой.

В главе 2 проведен детальный анализ рабочего процесса в каналах газодинамического устройства А. И. Леонтьева. Автором разработаны одномерная и двумерная модели процессов. Одномерная модель базируется на методе Шапиро-Хоторна и позволяет учитывать влияние различных геометрических и режимных параметров устройства на его энергоэффективность. Двумерная модель, основанная на уравнениях

Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, уравнении энергии и модели турбулентности, позволяет определять более детальные характеристики устройств.

Одномерная модель была использована для оценки различных способов повышения давления торможения сверхзвукового потока, в т.ч. испарительного при подаче воды. Обе модели валидированы на надежных экспериментальных данных и были использованы при выполнении автором численного моделирования различных режимов работы газодинамического устройства энергоразделения.

Глава 3 посвящена исследованию процессов трения и теплообмена в газодинамическом устройстве с проницаемой разделительной стенкой. Автор для описания процессов использовал им разработанные одно- и двумерные модели с учетом явлений отсоса и вдува газа через пористую стенку. Выполнен анализ рабочего процесса при различных режимно-геометрических параметрах и даны рекомендации по их выбору для обеспечения максимальной энергоэффективности устройства.

В результате выполненной диссертантом работы получены следующие новые результаты.

1. Обнаружено наличие максимума энергоэффективности при малых расходах в противоточной схеме газодинамического устройства.
2. Установлено аномальное влияние схемы течения на эффективность энергоразделения: при соотношении массовых расходов газа в дозвуковом и сверхзвуковом потоках  $m_1/m_2 < 0,2$  наиболее эффективной оказалась прямоточная схема устройства, а при  $m_1/m_2 > 0,2$  и при числе Маха  $M = \text{const}$  влияние схемы течения несущественно.
3. Обнаружено наличие экстремума температур для охлаждаемого и нагреваемого потоков в зависимости от начального давления торможения в устройстве с проницаемой разделительной стенкой.
4. Теоретически обоснована возможность бескачкового торможения сверхзвукового потока в канале постоянного сечения при наличии отсоса газа через пористую стенку. При этом интенсивность отсоса влияет на эффективность энергоразделения.

Теоретическая значимость работы состоит в построении валидированных математических моделей газодинамического устройства энергоразделения А. И. Леонтьева, в т.ч. с проницаемой стенкой. Практическая значимость диссертации состоит в возможности проведения, на базе разработанных автором моделей, проектно-исследовательских работ по созданию высокоэффективных газодинамических устройств энергоразделения для различных практических целей: в авиационной и ракетно-космической технике, в системах кондиционирования, осушки и др. Результаты выполненных работ могут быть использованы в АО "Туполев", РКК "Энергия", АО "Техномаш" и др., включая вузы авиационного профиля для повышения квалификации ИТР (МВТУ им. Н.Э. Баумана, МАИ, КНИТУ – КАИ).

Материалы диссертации успешно прошли апробацию на ряде научных конференций с 2007 г. по настоящее время, и опубликованы в 24 печатных изданиях, 3 из которых индексированы в Scopus, 2 — в журналах из рекомендованного ВАК списка.

Личный вклад автора в полученные результаты не вызывает сомнений: им лично разработан способ моделирования взаимодействия двух потоков при наличии отсоса/вдува, предложен и изучен испарительный метод для повышения давления торможения сверхзвукового потока, проведены обширные численные исследования газодинамического метода и устройства энергоразделения, в т.ч. с проницаемой стенкой.

Диссертация написана логично и четко.

К числу замечаний по диссертации можно отнести:

1. Автор не рассматривает влияние изменения проницаемости пористой стенки во время эксплуатации газодинамического устройства энергоразделения: в процессе работы поры заполняются примесями, содержащимися в воздухе, и гидравлическое их сопротивление растет, снижая эффективность энергоразделения.
2. Испарительный метод повышения энергоэффективности газодинамического устройства требует наличия систем подачи и регулирования воды, что ухудшает весовую и энергетическую отдачу газодинамического устройства. Это обстоятельство следует учитывать при оценке энергоэффективности.
3. В диссертации имеются отдельные опечатки (стр. 70, 71, 76, 144).

В целом, с учетом замечаний, считаю, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9-11 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 23.09.2013 г., ред. 11.09.2021 г., а ее автор Хазов Дмитрий Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв составил начальник отдела специальных авиационных двигателей и химмотологии, Федерального автономного учреждения «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», д.т.н., профессор Яновский Леонид Самойлович.

Официальный оппонент,  
д.т.н., профессор  
111116, Москва, ул. Авиамоторная, 2,  
(499)763-6167, lsyanovskiy@ciam.ru

Ученый секретарь ЦИАМ, д.э.н.  
111116, Москва, ул. Авиамоторная, 2,  
(499)763-6167, secretar@ciam.ru

Яновский Л.С.



Джамай Е.В.

Федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И.Баранова», 111116, Москва, ул.Авиамоторная, 2, (499)763-6167