

**Кудимов Никита Федорович**

Математическое моделирование процессов сложного теплообмена в  
экспериментальных энергетических установках

Специальность 01.02.05

«Механика жидкости, газа и плазмы»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре «Физика» факультета «Прикладная математика и физика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

**Научный руководитель:** Кандидат физико-математических наук, доцент,  
Московский авиационный институт,  
профессор кафедры «Физика»  
**Третьякова Ольга Николаевна**

**Официальные оппоненты:** **Корольков Анатолий Владимирович**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Московский государственный университет леса,  
зав. кафедрой «Прикладная математика», декан  
факультета электроники и системотехники.

**Иванов Игорь Эдуардович**  
кандидат физико-математических наук, с.н.с.,  
Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова, доцент кафедры  
«Молекулярная физика»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «МАТИ –  
Российский государственный технологический  
университет имени К.Э. Циолковского»

Защита диссертации состоится «    » ноября 2013 года в \_\_ ч. \_\_ мин. на заседании Диссертационного совета Д 212.125.14 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.14,  
кандидат физико-математических наук  
старший научный сотрудник

Гидаспов В.Ю.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Необходимость отработки и создания современных изделий и установок требует постоянного совершенствования экспериментальных и теоретических исследований и подтверждения характеристик в части теплообмена и гидрогазодинамики, обеспечивающих математическое и имитационное моделирование процессов функционирования, максимально приближенных к натурным условиям, и требуемый уровень надежности.

Требования к обеспечению высокой надежности рассматриваемых установок, дороговизна и сложность воспроизведения экспериментов, моделирующих физические процессы, приводят к необходимости создания методик математического моделирования физических процессов, протекающих в рассматриваемых установках. В этой связи возрастает роль математического моделирования, которое способствует сокращению расходов на отработку.

Методы математического моделирования, как наиболее экономичный инструмент исследования процессов гидрогазодинамики и теплообмена, в настоящее время являются неотъемлемой частью при проектировании новых и оптимизации уже существующих изделий. В настоящее время проектирование ракеты, самолёта, энергетических установок не обходится без численного моделирования течения. Актуальность применения математических моделей, позволяющих получать надёжные результаты, вытекает из требований, которые предъявляет к численному моделированию современное проектирование. Применяемое прикладное программное обеспечение должно позволять моделировать трехмерную сложную геометрическую модель (стартовое сооружение с многочисленными элементами, силовые трансформаторы с присущими им сложными конструктивными решениями), обеспечивать высокую точность предсказания гидрогазодинамических и тепловых характеристик и обозримое время расчёта.

В настоящий момент актуальной является задача обеспечения взрывобезопасности силовых трансформаторов большой мощности, ведутся исследования и разработки по оптимизации конструкций, позволяющих обеспечить нормальный режим длительной работы. Однако изменения в конструкции, необходимые для обеспечения взрывобезопасности трансформатора, могут приводить к ухудшению теплообмена в трансформаторе в нормальном режиме.

Другой важной задачей является обеспечение безаварийности старта ракет-носителей. В развитие теории и методов расчета газодинамики сверхзвуковых турбулентных струй большой вклад внесли известные ученые: Абрамович Г.Н., Ашратов Э.А., Иванов А.В., Пирумов У.Г., Лунев В.В., Гинзбург И.П., Крайко А.Н., Козлов В.Е., Гиршович Т.А., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Родионов А.В., Сафронов А.В., Иванов И.Э., Глушко Г.С., Крюков И.А., Запругаев В.И., Усков В.Н., Анцупов А.В., Молессон Г.В., Seiner J.M., Spalding D.B., Donaldson C.D. и др. Теплосиловые нагрузки при воздействии сверхзвуковых турбулентных струй двигательных установок ракет-

носителей с многосопловой конфигурацией могут приводить к разрушению элементов конструкции стартового сооружения.

**Целью работы** является создание методики математического моделирования процессов теплообмена в энергетических установках, применение которой обеспечивает нормальный безаварийный режим работы данных установок. Методика позволяет моделировать теплосиловое воздействие многоблочных турбулентных сверхзвуковых струй двигательных установок ракет-носителей на элементы стартового сооружения в процессе запуска, а также тепловые процессы в силовых трансформаторах большой мощности для обеспечения их длительной (многолетней) работы в нормальном режиме.

**Предметом исследования** данной работы являются физические процессы гидрогазодинамики и теплообмена в различных энергетических установках.

### **Метод исследования**

Результаты работы получены с помощью совместного использования математического моделирования и экспериментальных исследований, что позволяет обеспечить всесторонний анализ рассматриваемых задач. Математическая модель основывается на трехмерных осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса (RANS) с различными моделями турбулентной вязкости, которые решались с помощью высокоэффективных комплексов программ, таких как FlowVision и ЛОГОС, позволяющих проводить параллельные вычисления на многопроцессорных суперкомпьютерах.

### **Научная новизна**

1. С помощью методов вычислительной гидродинамики проведено математическое моделирование процессов теплообмена в силовых трансформаторах большой мощности.
2. Предложена конструкция с установкой статической защиты, обеспечивающей взрывобезопасность трансформаторов, и проведено исследование влияния установленной статической защиты на процессы теплообмена.
3. Создана методика расчета многоблочных турбулентных сверхзвуковых струй на режимах, характерных для старта ракет-носителей. В рамках разработанной численной методики расчетным путем впервые получена структура течения многоблочных турбулентных сверхзвуковых струй.
4. Создана методика расчета взаимодействия с преградой многоблочных турбулентных сверхзвуковых струй. Впервые расчетным путем определены силовые воздействия многоблочных турбулентных сверхзвуковых струй на преграду.
5. Создана методика экспериментального исследования силового воздействия многоблочных и одноблочных сверхзвуковых турбулентных струй на элементы стартового сооружения. Впервые получены

экспериментальные данные воздействия на преграду трехблочных турбулентных сверхзвуковых струй.

### **Практическая значимость исследования**

- На основании применения разработанной методики численного моделирования получены достоверные результаты анализа процессов конвективного и кондуктивного теплообмена в силовых трансформаторах большой мощности IV и VII габаритов.
- На основании разработанной численной методики даны рекомендации по оптимизации конструкции трансформаторов в целях обеспечения их взрывобезопасности для стабильной, многолетней работы в нормальном режиме.
- Полученные результаты расчета структуры течения многоблочных турбулентных сверхзвуковых струй использованы при проектировании новых, перспективных ракет-носителей.
- Полученные результаты расчета силовых воздействий на преграду многоблочных турбулентных сверхзвуковых струй применены при проектировании ракет-носителей с многоблочной конфигурацией сопел и стартовых комплексов, что дало возможность снизить объем экспериментальной отработки.
- Полученные авторские экспериментальные данные были применены для сопоставления с результатами расчетов по разработанной численной методике и могут быть использованы для валидации программ расчета газодинамического воздействия многоблочной сверхзвуковой струи на газоотводящие устройства стартовых сооружений.

### **Личный вклад**

Автором разработаны численные методики и проведены серии численных расчетов теплообмена в силовых трансформаторах различных габаритов, а также расчеты сверхзвуковых струйных течений, включая расчеты взаимодействия струй с преградами. Автор был ведущим в испытаниях на стенде по экспериментальному определению силовых нагрузок на преграду, проводил разработку методики, проводил обработку и анализ результатов.

### **Достоверность результатов**

Достоверность подтверждается сравнением результатов, полученных численно и экспериментально, сравнением результатов расчетов в различных программных комплексах, а также сравнением с результатами других авторов.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Разработанная методика численного моделирования и результаты анализа процессов теплообмена в силовых трансформаторах большой мощности.

2. Результаты численного исследования процессов конвективного и кондуктивного теплообмена в трансформаторах с установленной статической защитой.
3. Методика расчета многоблочных турбулентных сверхзвуковых струй на режимах, характерных для старта ракет-носителей и результаты расчета структуры течения многоблочных турбулентных сверхзвуковых струй.
4. Методика расчета многоблочных турбулентных сверхзвуковых струй, взаимодействующих с преградой. Результаты численных расчетов силовых воздействий на преграду.
5. Методика экспериментального исследования силового воздействия многоблочных турбулентных сверхзвуковых струй на элементы стартового сооружения. Полученные экспериментальные данные силового воздействия трехблочных и одноблочных турбулентных сверхзвуковых струй на преграду.

### **Апробация результатов исследования**

Материалы, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на:

XVI Международной конференция по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС-2009) (Украина, г. Алушта, 25-31 мая 2009 г.), Отраслевой научно-технической конференция молодых ученых и специалистов «Молодежь в ракетно-космической отрасли» (г. Королев, 21-24 сентября 2009 г.), XVIII Всероссийской конференция «Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов решения задач математической физики» (г. Дюрсо, 2010г), 9-й Международной конференция «Авиация и космонавтика- 2010» ( г. Москва, 16-18 ноября, 2010 г.), XVII Международная конференция по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС-2011) (Украина, г. Алушта, 25-31 мая 2011 г.), 10-й Международной конференции «Авиация и космонавтика -2011» (г. Москва, 8-10 ноября, 2011 г.), Международном форуме «Инженерные системы» (г. Москва, 10-11 апреля 2012 г.), IX Международной конференции по Неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2012 , 25-31 мая 2012 г.), 11-й Международная конференция «Авиация и космонавтика-2012» (г. Москва, 13-15 ноября, 2012 г.), XVIII Международная конференция по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС-2013) (Украина, г. Алушта, 22-31 мая 2013 г.), Международной конференции «XXXIX Гагаринские чтения» (г. Москва, 9-13 апреля 2013 г.).

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации – 127 страниц, работа содержит 10 таблиц, 99 рисунков и список литературы из 117 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулирована цель диссертации: приведено краткое содержание глав диссертации, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту положения. Дан **краткий обзор литературы** по существующим методам расчета теплообмена в маслонаполненных трансформаторах большой мощности, а также методам и результатам определения теплосиловых нагрузок струй ракетных двигателей на элементы стартового сооружения.

**В первой главе** кратко описана типовая конструкция силовых маслонаполненных трансформаторов большой мощности, описаны основные элементы, участвующие в процессах теплообмена, а также рассмотрены источники тепловых потерь и их вклад в общие тепловые потери. Методика расчета подразумевает разделение задачи на расчет течения масла около активных частей трансформатора внутри бака и расчет теплообмена во внешних охлаждающих радиаторах. Тогда первую задачу можно решать отдельно, моделируя влияние радиатора соответствующими граничными условиями входа и выхода масла в бак.

Применительно к рассмотрению нормального режима работы трансформатора, расчет теплообмена предполагает решение системы трехмерных уравнений Навье-Стокса для фазы масла, включающей в себя законы сохранения массы, импульса и энергии:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \\ \rho_0 \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \rho_0 \nabla \cdot (\mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) = \nabla \cdot (-p \hat{\mathbf{I}} + \hat{\boldsymbol{\sigma}}) + \rho_0 \beta T \mathbf{g} \\ \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} h) = -\nabla \cdot \mathbf{q} + \frac{\partial p}{\partial t} + \hat{\boldsymbol{\sigma}} : \hat{\mathbf{S}} \end{cases}$$

где,

$$\mathbf{V} \otimes \mathbf{V} = \begin{Bmatrix} V_x V_x & V_y V_x & V_z V_x \\ V_x V_y & V_y V_y & V_z V_y \\ V_x V_z & V_y V_z & V_z V_z \end{Bmatrix}, \quad \hat{\boldsymbol{\sigma}} = \mu(T) \left( 2\hat{\mathbf{S}} - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{V})\hat{\mathbf{I}} \right), \quad \hat{\mathbf{S}}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right), \quad \mathbf{q} = -\lambda \nabla T$$

Для описания естественно-вынужденной конвекции масла с учетом небольших перепадов плотности масла в трансформаторе использовалось приближение Бусинесска о линейной зависимости плотности масла от температуры:  $\rho(T) = \rho_0(1 - \beta T)$ .

В активных частях трансформатора решается уравнение теплопроводности с функцией источников, учитывающей суммарный вклад джоулевых потерь тепла при протекании тока в обмотках трансформатора и потерь при перемагничивании:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_s \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q$$

В уравнениях  $c_p$  - удельная теплоемкость масла,  $c_s$  - удельная теплоемкость

твердого тела,  $g$  - ускорение свободного падения,  $h$  - удельная энтальпия,  $\hat{\mathbf{I}}$  - единичный тензор,  $T_0$  - опорная температура,  $p$  - статическое давление,  $Q$  - объемное тепловыделение,  $q$  - тепловой поток,  $\hat{\mathbf{S}}$  - тензор скоростей деформации,  $T$  - температура относительно опорной температуры,  $t$  - время,  $\mathbf{V}$  - скорость,  $V_i$  -  $i$ -я декартова составляющая вектора скорости,  $\beta$  коэффициент объемного расширения масла,  $\lambda, \lambda_s$  - коэффициенты теплопроводности масла и активных частей трансформатора,  $\mu$  - молекулярная вязкость,  $\rho$  - плотность масла,  $\rho_0$  - опорная плотность масла,  $\rho_s$  - плотность твердого тела,  $\hat{\mathbf{\sigma}}$  - тензор вязких напряжений.

В настоящий момент активно ведутся исследования и разработки, позволяющие обеспечить взрывобезопасность трансформаторов. Однако изменения в конструкции, необходимые для обеспечения взрывобезопасности трансформатора, могут приводить к ухудшению работы трансформатора в нормальном режиме. Например, повышение средней температуры масла, вызванное ухудшением теплообмена, может привести к ускорению деградации электроизолирующих материалов и последующим возможным пробоям. Исследовано конструктивное решение, основанное на введении статических элементов защиты, снижающих последствия взрыва трансформатора, которые крепятся на внутреннюю стенку бака.

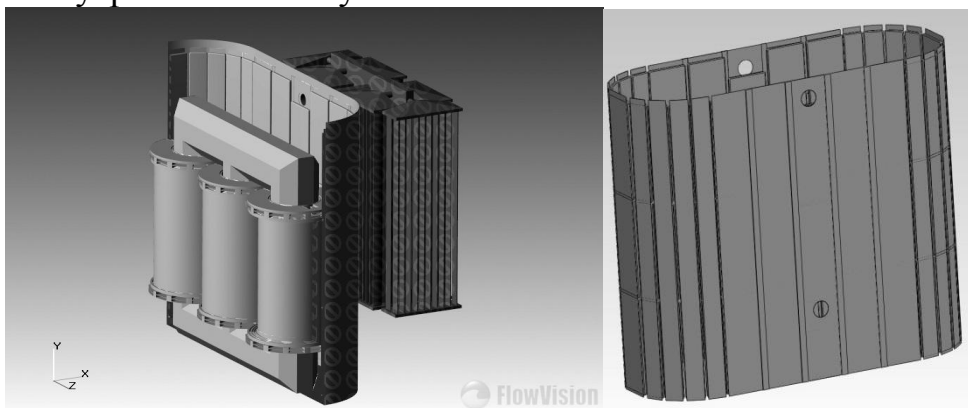


Рис. 1. Расчетная область (слева) и вид статической защиты (справа)

Для верификации построенной модели было проведено моделирование заводских испытаний трансформатора. Тепловые испытания трансформатора состоят из нескольких этапов:

- 1) Испытание холостого хода рабочим напряжением – для измерения потерь в магнитопроводе.
- 2) Испытание короткого замыкания рабочим током – для измерения потерь на омическом сопротивлении обмоток.
- 3) Испытание короткого замыкания эквивалентным током, при котором потери на омическом сопротивлении обмоток равны сумме тепловых потерь полученных ранее.

Первые два испытания дают представление о потерях в трансформаторе в рабочем режиме. Их результаты: 4,9 кВт для магнитопровода и 26,04 кВт для



обмоток. Эти данные необходимы для моделирования штатной работы трансформатора.

Третье испытание воспроизводит рабочий режим трансформатора по тепловой нагрузке. Для получения тепловыделения в 30,94 кВт на обмотки потребовалось подать ток в 239,74 А. В этом эксперименте измерялась температура верхних слоёв масла. Её значение составило 58,7 °С относительно температуры окружающей среды.

Из результатов моделирования третьего этапа заводских тепловых испытаний было отмечено, что рассчитанное значение температуры верхних слоев масла равно 58,5 °С относительно окружающей среды (температура окружающей среды в расчёте принималась равной 20 °С). Данное значение с хорошей точностью согласуется с экспериментальным результатом. Средняя температура масла по всему объёму бака составила 72,6 °С.

Для моделирования штатной работы трансформатора в магнитопроводе и обмотках задаются тепловыделения, равные потерям, полученным в ходе первых двух этапов заводских тепловых испытаний трансформатора. Как показали результаты расчёта, температура верхних слоев масла изменилась не сильно, однако в рабочем режиме распределение температуры верхних слоев масла стало более неоднородным в результате тепловыделений в магнитопроводе. Средняя температура в баке составила 72,7 °С, что крайне незначительно отличается от данной величины в испытании короткого замыкания эквивалентным током.

Для определения максимального влияния статической защиты на процессы теплообмена в трансформаторе, на боковой поверхности бака трансформатора было установлено адиабатическое граничное условие. При исключении боковой стенки трансформатора из теплообмена с окружающей средой (весь теплообмен идет через внешние радиаторы), температура верхних слоёв возрастает примерно на 10 °С. Средняя температура в баке в этом расчёте составила 83,3 °С, то есть повысилась на 10,5 °С по сравнению с предыдущим расчётом. Эти результаты говорят о значительной роли теплообмена через боковую стенку трансформатора.

Для исследования влияние защиты на теплообмен, были рассмотрены различные значения теплопроводности данной защиты, и показано, что основная характеристика – средняя температура масла в трансформаторе. – практически не меняется, т.е. теплопроводность материала защиты незначительно влияет на теплообмен в трансформаторе, что объясняется гораздо большей долей конвективного теплопереноса по сравнению с механизмом кондуктивного теплопереноса.

Отмечено, что внесение конструктивных элементов увеличивает среднюю температуру лишь на 0,1 °С, в то время как полное исключение боковых стенок бака из процессов теплообмена повышает среднюю температуру более, чем на 10 °С. Таким образом, можно сделать вывод, что установка статической защиты, практически не уменьшает мощность теплоотдачи через боковую стенку бака трансформатора - теплозащита образует канал вдоль боковой стенки бака

трансформатора, тем самым увеличивая скорость движения масла в нем и, соответственно, интенсифицируя теплообмен. Увеличение нагрузки на 10% по мощности приводит к пропорциональному увеличению температуры в случае исходной модели и взрывобезопасной. Сводные данные о работе трансформатора в нормальном режиме представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Превышение средней температуры масла в баке над температурой окружающей среды при различной конфигурации трансформатора

	без статической защиты	со статической защитой (теплоизолирующая подложка)	Со статической защитой (теплопроводящая подложка)	С адиабатическими стенками
Рабочий режим	52,7 °С	52,9 °С	52,8 °С	63,3 °С

Результаты численного моделирования позволяют сказать, что введение статической защиты практически не влияет на теплообмен, но обеспечивает взрывобезопасность трансформатора.

**Во второй главе** приводятся математическая модель на основе осредненных трехмерных уравнений Навье-Стокса и кратко описаны, включенные в рассмотрение модели турбулентности SST Ментера и модель Спаларта-Аллмараса:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \nabla \cdot (F - G) = 0,$$

где  $Q$  – вектор консервативных переменных,  $F$  и  $G$ , соответственно, вектора невязких и вязких потоков:

$$Q = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{pmatrix}, \quad F_x = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ \rho uH \end{pmatrix}, \quad F_y = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho vu \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ \rho vH \end{pmatrix}, \quad F_z = \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho wu \\ \rho vw \\ \rho w^2 + p \\ \rho wH \end{pmatrix},$$

$$G_x = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ q_x + \tau_{xx}u + \tau_{xy}v + \tau_{xz}w \end{pmatrix}, \quad G_y = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{yx} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{yz} \\ q_y + \tau_{yx}u + \tau_{yy}v + \tau_{yz}w \end{pmatrix}, \quad G_z = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{zx} \\ \tau_{zy} \\ \tau_{zz} \\ q_z + \tau_{zx}u + \tau_{zy}v + \tau_{zz}w \end{pmatrix}.$$

В случае расчета многокомпонентных течений, система уравнений дополняется уравнением неразрывности для каждой из компонент:

$$\frac{\partial \rho c_n}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c_n \vec{V} + \vec{J}_{C_n}) = \omega_n$$

Здесь  $t$  – время;  $\rho$  – плотность;  $\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$  – вектора скорости в декартовой системе координат;  $E = \varepsilon + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2}$  – полная энергия;  $\varepsilon$  – внутренняя энергия;

$H = E + \frac{p}{\rho}$  – полная энтальпия;  $p$  – давление;  $\tau_{ij}$  – компоненты тензора вязких напряжений;  $\vec{q}$  – вектор плотности теплового потока;  $c_n$  – массовая концентрация  $n$ -той компоненты газа;  $\rho\omega_n$  – массовая скорость образования  $n$ -той компоненты в химических реакциях,  $\vec{J}_{c_i}$  – вектор плотности потока массы  $n$ -той компоненты смеси.

Компоненты тензора вязких напряжений, компоненты плотности потока массы и компоненты вектора теплового потока определяются соотношениями:

$$\tau_{ij} = \mu \left( 2s_{ij} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, s_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

$$(J_{c_n})_i = -\frac{\mu}{Sc} \frac{\partial c_n}{\partial x_i}, q_i = -\chi \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_{n=1}^N \rho h_i \frac{\mu}{Sc} \frac{\partial c_n}{\partial x_i}$$

В этих соотношениях эффективные коэффициенты вязкости  $\mu$  и теплопроводности  $\chi$  представляют собой суммы молекулярных и турбулентных коэффициентов, имея ввиду приближение Буссинеска о линейной связи тензора турбулентных напряжений и тензора скоростей деформаций.

В этой главе приведено численное моделирование структуры течения одиночных струй с использованием различных моделей турбулентности. Вдоль границы струи между струей и внешним потоком образуется турбулентный слой смешения, постепенно расширяющийся по мере удаления от среза сопел и приводящий к уменьшению интенсивности скачков и волн разрежения, поэтому правильное моделирование турбулентности играет важную роль в задачах расчета сверхзвуковых турбулентных струй. На известном эксперименте Сейнера показано преимущество модели SST. Из рисунка 1 видно, что по распределению давления в первых трех «бочках» положение максимумов и минимумов достаточно хорошо соответствует экспериментальным данным, но все больше расходится с экспериментом по мере удаления от среза сопла для обеих моделей. При этом наилучшие результаты по положению максимумов и минимумов были получены при использовании модели турбулентности SST.

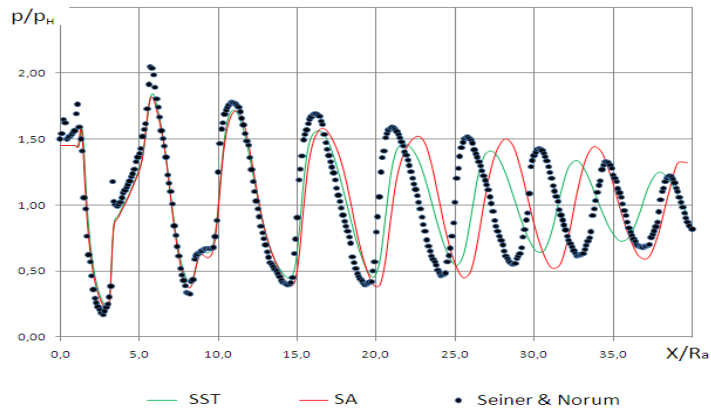


Рис. 1. Распределение статического давления на оси струи для различных моделей турбулентности

Расчеты для режимов перерасширения и недорасширения холодных струй вполне удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными по распределениям давлений на оси струи. Для уточнения распределения параметров в первой бочке необходим учет пространственного течения вязкого газа в сопле. Нужно отметить, что к настоящему моменту известны данные измерений теплосилового воздействия на преграду, в основном, холодных или подогретых струй с температурой в камере до  $T=500\text{K}$  и с геометрическим числом Маха на срезе сопла  $M_a < 3$ , в то время как струи двигательных установок имеют температуру в камере порядка  $4000\text{K}$  и большие числа Маха. Поэтому особый интерес представляют расчеты горячей струи (рабочее тело – продукты сгорания) в затопленное пространство (воздух). С этой целью проведен двухкомпонентный расчет горячей струи (рабочее тело – продукты сгорания) в затопленное пространство (воздух). Параметры истекающей струи рассчитывались в программе термодинамических расчетов «Астра-4/РС» Трусова Б.Г. (МГТУ, 1991), с учетом химических реакций между 10 компонентами в сопле в одномерном приближении, составляющими продукты сгорания топлив.

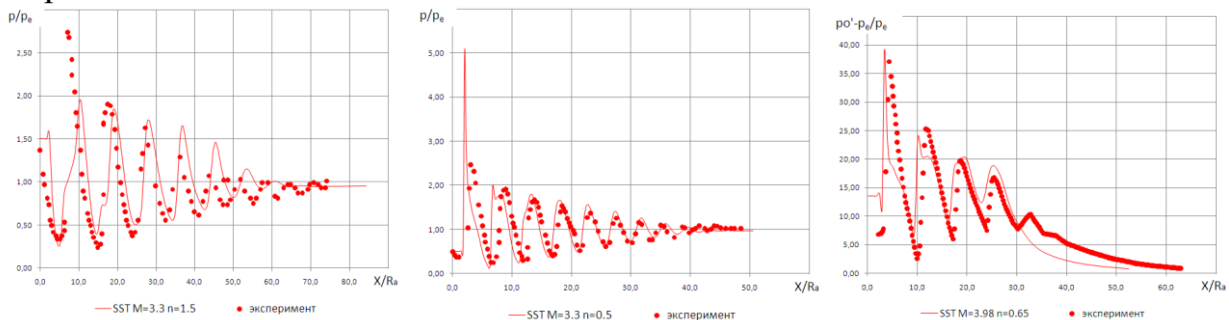


Рис. 2. Сравнение данных расчетов и экспериментов для одиночных турбулентных струй

Предложенная методика, разработанная для численного моделирования истечения многоблочных струй, здесь применена в частном случае для исследования структуры одиночной струи. На Рис. 3 видно, что висячий скачок уплотнения, формирующийся в первой бочке, проходит через образующийся контактный разрыв, отделяющий поток в струе и эжектируемый газ в

межструйном пространстве за счет вязкости и формирования слоя смешения. Пройдя через слой смешения на контактном разрыве, скачок преломляется и регулярным образом отражается от оси блочной струи. Кроме этого, виден контактный разрыв, образующийся при пересечении скачков в первой бочке. Для случая степени нерасчетности  $n > 2$  получается ярко выраженное нерегулярное отражение всякого скачка от оси блочной струи с образованием диска Маха, проходя через который газ тормозится до дозвуковых скоростей с резким повышением давления. Для  $n < 1.2$  всякий скачок в силу дозвуковых скоростей газа в межструйном пространстве пройти сквозь контактный разрыв не может, и поэтому отражается от него как от границы струи в виде волн разрежения.

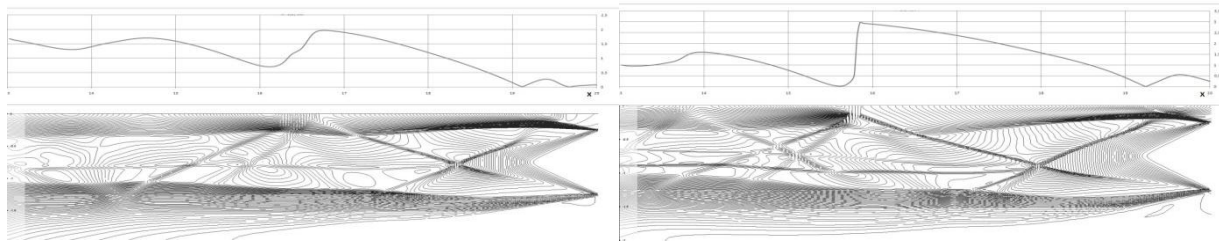


Рис. 3. Изолинии числа Маха и распределение числа Маха на оси блочной струи (слева – нерасчетность  $n=1.45$ , справа –  $n=2$ )

Таким образом, продемонстрировано, что применяемая методика расчета с описанными математическими моделями хорошо согласуется с экспериментальными данными характеристик одиночных неизобарических турбулентных сверхзвуковых струй, а также позволяет получать данные о структуре течения многоблочных турбулентных струй.

**В третьей главе** предложенная методика численного расчета на основе осредненных уравнений Навье-Стокса с моделью турбулентности Ментера SST применяется для расчета взаимодействия многоблочных турбулентных сверхзвуковых струй с преградой.

Анализ литературы показал, что для случая взаимодействия многоблочных струйных течений с преградами практически отсутствуют данные по характеристикам силового воздействия. Для восполнения отсутствующих экспериментальных данных нами была разработана экспериментальная методика и проведены исследования по силовому воздействию многоблочных струй. Достоинством разработанной экспериментальной методики является получение непрерывных распределений давления за счет движения преграды с установленными на ней датчиками давления в своей плоскости. Анализ показал, что влияние многоблочности сказывается на уровне минимального давления в критической точке на преграде и в повышении давления в межструйном пространстве при взаимодействии струй у преграды. Также указаны расстояния, на которых возникала неустойчивость и дискретные составляющие шума для одноблочных и многоблочных струй. Для случая одноблочной струи были получены распределения, имеющие характерный «двугорбый» характер с периферийным максимумом давления на преграде. Полученные расчетные данные говорят как о

появлении неустойчивости, нарушении симметрии течения, так и о появлении акустических волн. Полученное распределение энергии турбулентности говорит о том, что основные процессы генерации турбулентности происходят в слое смешения и в окрестности критической точки на преграде.

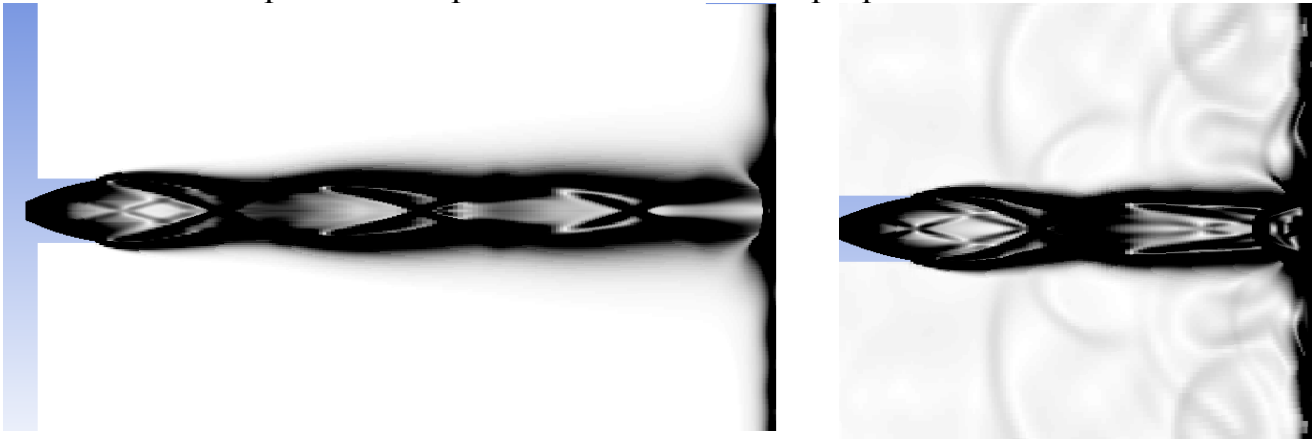


Рис. 4. Градиент плотности, одноблочная струя, слева - расстояние до преграды  $H=590$  мм, справа – расстояние до преграды  $H=308$  мм

В расчетах также получены картины течения на преграде. В случае одноблочной струи для режима с расстоянием от среза сопла до преграды  $H=590$  мм максимум давления находится в центре, и газ, проходя через формирующийся вблизи преграды скачок уплотнения, свободно растекается от центра, Рис.5. Для режима  $H=308$  мм преграда расположена в «зоне неустойчивости» (область убывания числа Маха и возрастания давления вблизи оси), что характеризуется нестационарными процессами в области разворота струи у преграды и возникновением вихревых структур. В отличие от предыдущего режима здесь максимум давления находится на периферии, при этом зона максимального давления разделяет газ на две области: во внешней - газ радиально растекается, а во внутренней - течение направлено к центру, Рис.6.

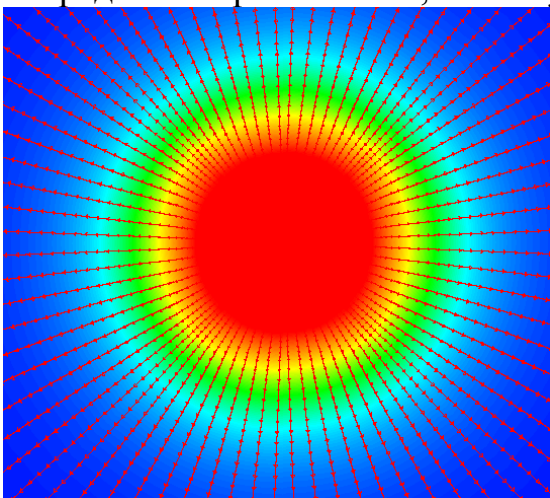


Рис. 5. Распределение давления по преграде и векторы скорости,  $H=590$  мм

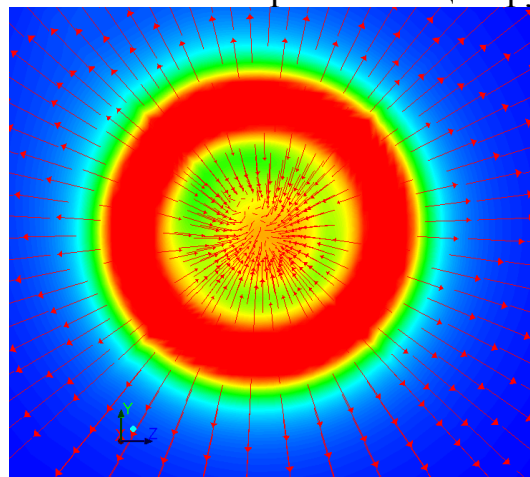


Рис. 6. Распределение давления по преграде и векторы скорости,  $H=308$  мм

В случае многоблочного истечения взаимодействующие сверхзвуковые струи по сравнению с одиночной струей имеют более сложную структуру течения, Рис.7. В отличие от одиночного течения, течение в области преграды носит сильно нестационарный и вихревой характер течения. Кроме этого, существует обратное течение газа от преграды.

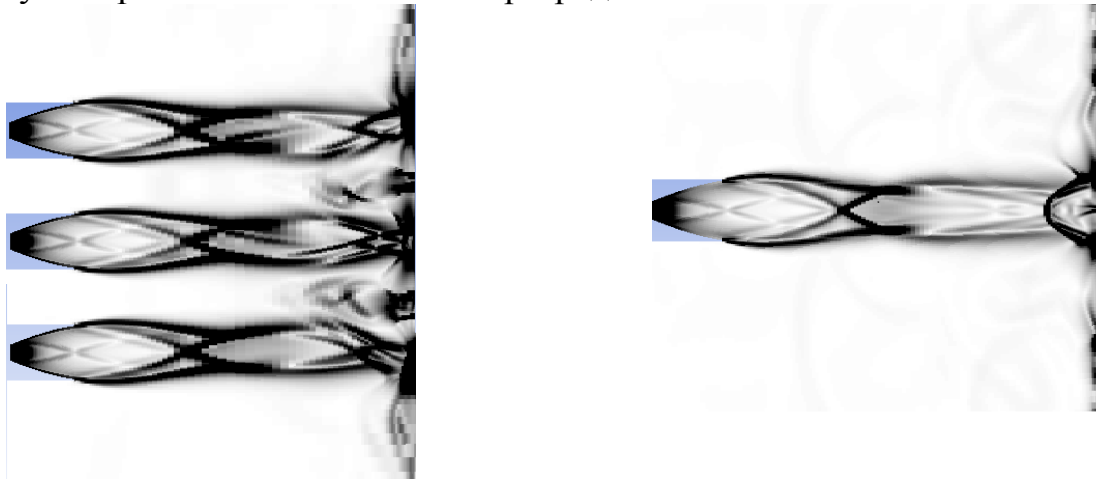


Рис.7. Градиент плотности, расстояние до преграды  $H=308$  мм. Слева – трехблочная струя, справа – одноблочная струя

Полученное распределение давления и характер течения по преграде показали, что свободно растекающиеся потоки сталкиваются в межструйном пространстве на преграде (тем самым повышается давление) и, разгоняясь, газ продолжает движение в направлении, перпендикулярном линии, проходящей через центры блоков. Области повышенного давления по сравнению с одиночным натеканием, становятся более вытянутыми и принимают форму эллипсов.

Сравнение распределений давления в сечении, проходящем через центры блоков, показаны на Рис.8.

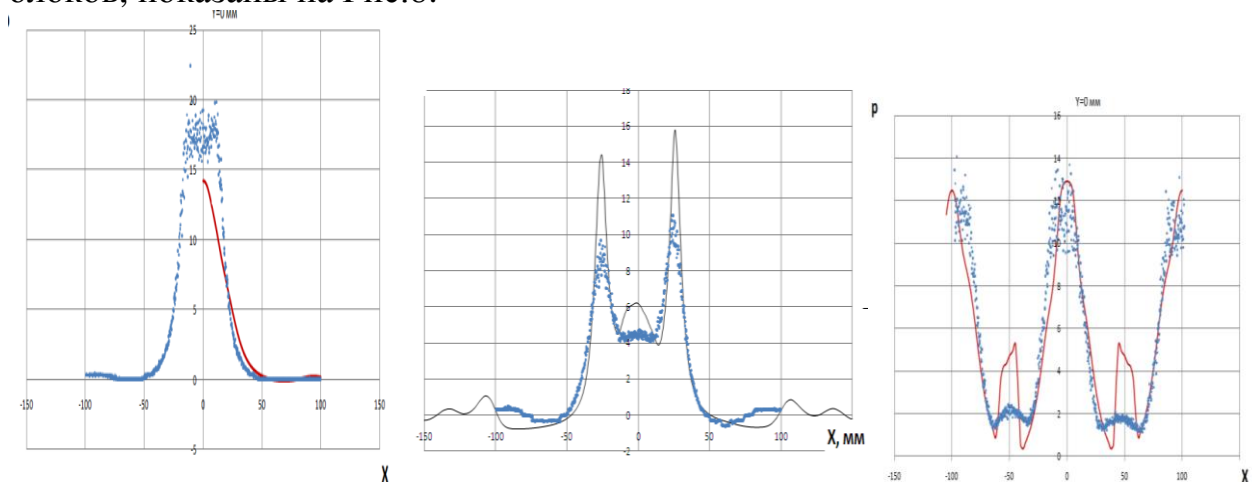


Рис. 8. Распределения давления, полученные численно (сплошная кривая) и экспериментально (точки). Слева - одноблочная струя,  $H=590$  мм; по центру – одноблочная струя, неустойчивый режим  $H=308$  мм, справа – трехблочная струя, расстояние до преграды  $H=576$  мм

В целом, экспериментальные и численные распределения хорошо согласуются между собой в пределах погрешности расчета и эксперимента. Для трехблочной конфигурации в области межструйного взаимодействия в зонах столкновения растекающихся от соседних струй потоков, применяемые потенциометрические датчики сглаживают особенность ввиду использования их на высоких уровнях давления (40 атм), и как следствие, слабой чувствительности к пульсациям давления на нижних уровнях.

### **Основные результаты работы**

1. Разработана методика численного моделирования процессов теплообмена в силовых трансформаторах большой мощности. Проведен анализ процессов теплообмена в трансформаторах IV и VII габаритов, проведено сопоставление с экспериментальными данными, показано согласование по средней температуре масла в баке, подтверждающее адекватность разработанной методики.
2. Получены результаты численного исследования процессов конвективного и кондуктивного теплообмена в трансформаторах с установленной статической защитой. Показано, что введение статической защиты практически не влияет на теплообмен, но повышает взрывобезопасность трансформатора.
3. Разработана методика расчета многоблочных турбулентных сверхзвуковых струй. Получены результаты численных исследований многоблочных струй двигательных установок, рассчитаны различные варианты истечения многоблочных струй с варьированием степени нерасчетности. Показано влияние степени нерасчетности истекающих многоблочных турбулентных сверхзвуковых струй на структуру течения.
4. Разработана методика расчета воздействия многоблочных турбулентных сверхзвуковых струй на элементы стартового сооружения. Получены результаты численных расчетов силовых воздействий на преграду. Путем сопоставления результатов расчета взаимодействия струйных течений с преградой с авторскими экспериментальными данными показана способность методики получать с достаточной точностью основные характеристики силового воздействия на элементы стартового сооружения при старте ракет-носителей. Это дает возможность снизить объем экспериментальной отработки по проектированию и оптимизации конструктивных элементов в целях обеспечения безаварийности пусков ракет-носителей.
5. Разработана методика экспериментального исследования силового воздействия многоблочных турбулентных сверхзвуковых струй на элементы стартового сооружения. Получены экспериментальные данные силового воздействия трехблочных и одноблочных турбулентных сверхзвуковых струй на преграду.



## Список публикаций соискателя по теме диссертации

### **I. Научные труды, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:**

1. Кислых В.В., Кудимов Н.Ф., Панасенко А.В., Третьякова О.Н. О проблемах моделирования газодинамических течений в поршневой газодинамической установке для отработки изделий ракетно-космической техники. // Труды МАИ. Электронный журнал, ISSN: 1727-6924. 2011, № 47.
2. Аксёнов А.А., Жлуктов С.В., Кудимов Н.Ф., Сон Э.Е., Таран М.Д., Третьякова О.Н., Шишаева А.С. О моделировании сложного теплообмена в силовых трансформаторах большой мощности. // Журнал «Известия РАН. Энергетика», 2013, № 2. С.131-140.
3. Кудимов Н.Ф., Панасенко А.В., Сафронов А.В., Третьякова О.Н. Расчет сверхзвуковых турбулентных струй на режимах, характерных для старта ракет-носителей. // Журнал Вестник Московского авиационного института, 2013, т.20, № 1. С. 88-94.
4. Кудимов Н.Ф., Панасенко А.В., Сафронов А.В., Третьякова О.Н. Исследование многосопловых турбулентных сверхзвуковых недорасширенных струйных течений. // Журнал Вестник Московского авиационного института, 2013, т.20, № 4. С.75-84.
5. Кудимов Н.Ф., Сафронов А.В., Третьякова О.Н. Результаты экспериментальных исследований взаимодействия многоблочных сверхзвуковых турбулентных струй с преградой. // Труды МАИ. Электронный журнал, ISSN: 1727-6924. 2013, № 69.
6. Кудимов Н.Ф., Сафронов А.В., Третьякова О.Н. Численное моделирование взаимодействия многоблочных сверхзвуковых турбулентных струй с преградой. // Труды МАИ. Электронный журнал, ISSN: 1727-6924. 2013, № 70.
7. Аксёнов А.А., Жлуктов С.В., Кудимов Н.Ф., Сон Э.Е., Савицкий Д. В., Третьякова О.Н., Шишаева А.С. Исследование теплообмена в силовых трансформаторах большой мощности с учетом конструктивных особенностей, обеспечивающих взрывобезопасность. // Журнал Известия РАН. Энергетика. 2013, (в печати).

### **II. Другие научные труды, опубликованные по теме диссертации:**

8. Кудимов Н.Ф., Третьякова О.Н. Исследование теплообмена в солнечных батареях в условиях конвективного теплопереноса на поверхности. // В сб.: Материалы XVII Международной конференции по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2011) 25-31 мая 2011 г. Алушта. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2011. С.754-756.
9. Кудимов Н.Ф., Панасенко А.В. Расчет формирования течения газа в поршневой газодинамической установке. // В сб.: Материалы XVII Международной конференции по Вычислительной механике и современным

- прикладным программным системам (ВМСППС'2011) 25-31 мая 2011 г. Алушта. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2011. С.752-753.
10. Кудимов Н.Ф., Третьякова О.Н.. Исследование моделей турбулентности для анализа термогазодинамических процессов в элементах солнечных батарей. В сб.: 10-я Международная конференция "Авиация и космонавтика-2011". Москва, 8-10 ноября 2011 г. Москва. Тезисы докладов.- СПб.: Мастерская печати, 2011, с.279.
11. Kudimov N.F., Tretyakova O.N. Turbulence Models study for analysis of thermodynamic and gas-dynamic processes insolar-battery cells // Actual problems of aviation and aerospace systems, International Russian-American Scientific Journal, Kazan-Daytona Beach, № 1(34), v.17, 2012, p .168-169.
12. Аксёнов А.А., Жлуктов С.В., Крапивин К.Ю., Кудимов Н.Ф., Сон Э.Е., Таран М.Д., Третьякова О.Н., Шишаева А.С. Численное исследование теплообмена в маслонаполненных силовых трансформаторах. Инженерные системы. Программа и тезисы докладов Международного форума. Москва 10-11 апреля 2012 г. С.14-15.
13. Аксенов А.А., Кудимов Н.Ф., Третьякова О.Н.. Оптимизация конструкции силового автотрансформатора для интенсификации теплообмена с использованием FlowVision. В сб.: 11-я Международная конференция "Авиация и космонавтика-2012". Москва, 13-15 ноября 2012 г. Москва. Тезисы докладов.- СПб.: Мастерская печати, 2012.
14. Карцева Е.Ю., Кислых В.В., Кудимов Н.Ф., Панасенко А.В., Чернов В.В. Расчет течения газа в канале поршневой газодинамической установки.// В.сб.: Материалы IX Международная конференция по Неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2012) 25-31 мая 2012 г. – М.: МАИ ПРИНТ,2012 ,С.47-48.
15. Кудимов Н.Ф. Расчет старта ракеты-носителя с многосопловой конфигурацией. Международная молодежная конференция «XXXIX Гагаринские чтения», Москва 9-13 апреля 2013 г. С.72.
16. Кудимов Н.Ф., Панасенко А.В., Сафронов А.В. К исследованию многосопловых турбулентных сверхзвуковых струйных течений // В сб.: Материалы XVIII Международная конференция по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2013) С. 601-602.
17. Аксенов А.А., Костин И.А., Кудимов Н.Ф., Третьякова О.Н. Исследование теплообмена в слое масла с переменной вязкостью.//В сб.: Материалы XVIII Международная конференция по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2013) 22-31 мая 2013 г . Алушта.– М.: Изд-во МАИ, 2013. С.32-33.
18. Кудимов Н.Ф., Третьякова О.Н. О моделях сложного теплообмена в элементах солнечных батарей. // В сб. НИРС МАИ 2013. (в печати).