

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
ЗОЛОТОРЕВА НИКОЛАЯ НИКОЛАЕВИЧА

*«ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В ГИБРИДНОМ РАКЕТНОМ
ДВИГАТЕЛЕ ПРЯМОЙ СХЕМЫ»,*

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Ракетное двигателестроение является одним из приоритетных направлений в российской промышленности, играет важнейшую роль в развитии отечественной аэрокосмической отрасли. В то же время Россия – крупный производитель двигателей для ракет тактического, стратегического и космического назначения, составляющих основу космических программ других стран.

Несмотря на значительное внимание к проблеме создания ракетных двигателей, она далека от своего решения. На современном этапе развития ракетостроения особую актуальность приобрела проблема создания гибридного ракетного двигателя (ГРД), в особенности ГРД «прямой схемы», имеющего значительные преимущества по сравнению с классическими жидкостными (ЖРД) и твердотопливными (РДТТ) ракетными двигателями.

Один из путей решения задачи создания ГРД – изучение физики и химии рабочих процессов в двигателе данного типа, разработка и обоснование их технологических регламентов. Поэтому диссертационная работа Золоторева Н.Н., направленная на исследование рабочих процессов в гибридном ракетном двигателе прямой схемы, представляет **актуальное** научное исследование, имеющее **практическую ценность**.

При решении поставленной задачи автором получены новые знания о характеристиках зажигания тепловым потоком различных топливных композиций, определены структурные параметры в факеле распыла жидкого топлива, с помощью аналитических оценок проведена оптимизация процесса горения твердотопливного заряда в потоке окислителя. В этом заключается принципиальная **научная новизна** работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 155 наименований, и изложена на 168 страницах.

Во Введении обсуждается актуальность рассматриваемой проблемы и цель исследования, описывается структура диссертационной работы, полученные результаты, их апробация, новизна, научная и практическая значимость.

В первой главе *«Исследования и разработки в области создания гибридных ракетных двигателей»* приведены сведения об основных конструктивных схемах гибридного ракетного двигателя. Проведен аналитический обзор работ зарубежных ученых. Обсуждаются достоинства и недостатки ГРД. Делается вывод, что основной проблемой создания ГРД является неустойчивость процесса горения при увеличении размеров двигателя до необходимых для практического его применения размеров. Обсуждаются способы преодоления данной проблемы. Результатом обзора явилось обоснование цели и задач диссертационного исследования.

Во второй главе *«Термодинамические характеристики перспективных твердотопливных композиций для РДТТ и ГРД»* представлены расчеты термодинамических и химических характеристик используемых в исследовании высокоэнергетических материалов (ВЭМ). Определены составы топливных композиций для ГРД, которые предполагалось применить в экспериментах. Установлено влияние значения коэффициента избытка окислителя на температуру горения и на показатель эффективности ракетного двигателя.

В третьей главе *«Экспериментальное исследование зажигания и горения перспективных композиций ВЭМ»* приведены результаты изучения процесса зажигания образцов ВЭМ при кондуктивном подводе тепла, при облучении лучистым тепловым потоком, а также с помощью излучения CO₂-лазера. В случае нагрева лучистым тепловым потоком исследовались статические и динамические режимы зажигания образцов. При помощи экспериментальных данных с использованием известных аналитических соотношений методом наименьших квадратов были определены константы формальной химической кинетики зажигания и горения реакционных веществ. Получены экспериментальные зависимости скорости горения образцов ВЭМ.

В четвертой главе *«Характеристики факела распыла жидкого компонента топлива»* определены характеристики структуры в факеле распыла модельных жидкостей (дистиллированная вода и керосин) через центробежные и эжекционные форсунки. Показано, что факел распыла имеет форму полого тела вращения с большой неоднородностью распределения капель как по его радиусу, так и по длине. Выявлено, что функция счетного распределения размеров капель для исследуемых форсунок является унимодальной и описывается распределением Розина-Раммлера. Анализ полученных экспериментальных данных позволил автору диссертационной работы рекомендовать

критериальное соотношение, связывающее максимальный диаметр капель в факеле распыла от чисел Рейнольдса и Онезорге. Сделан вывод, что данный критерий можно использовать в расчетах характеристик реальных окислителей ГРД.

Пятая глава «Исследование процесса горения твердотопливного заряда в гибридном ракетном двигателе» посвящена экспериментальному и теоретическому изучению характеристик горения твердотопливного заряда в потоке газообразного окислителя. В главе получены аналитические соотношения для распределения плотности потока окислителя, скорости горения твердотопливного заряда и массовой доли окислителя в твердотопливном заряде по длине канала в приближении одномерного и квазистационарного течения газа в канале заряда. На основании полученных формул с помощью аналитических расчетов проведена оптимизация твердотопливного заряда, содержащего бутадиеновый каучук и порошок алюминия, основанная на идее разбавления заряда дополнительным твердым окислителем. Выявлено, что тип окислителя оказывает существенное влияние на его количество в твердом горючем материале.

Помимо вышеперечисленных научных исследований, в рамках диссертации Золоторевым Н.Н. были выполнены следующие **инженерно-технические работы**:

- разработан пневмогидравлический стенд для экспериментального исследования закономерностей распыливания жидких компонентов топливных композиций ГРД;
- разработан лазерно-диагностический комплекс для измерения пространственного распределения концентрации капель в факеле распыла и функции распределения капель по размерам;
- разработаны модельный ГРД «прямой схемы» и экспериментальный стенд для исследования процесса горения в ГРД, конструкция которого предполагает два варианта подачи окислителя.

В Заключение сформулированы основные выводы.

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждаются:

- использованием ранее апробированных методов проведения экспериментов;
- корректностью физических постановок задач.

Основные результаты работы обсуждались на конференциях и представлены в 43 печатных работах, 5 из которых входят в Перечень ВАК.

Значимость полученных в диссертационной работе результатов заключается в возможности их использования для дальнейшего развития теоретических и экспериментальных исследований в области создания гибридного ракетного двигателя прямой схемы.

По результатам, представленным в диссертации, можно сделать следующие замечания и пожелания.

1. В литературном обзоре имеется неудачное выражение, на стр. 20 написано: «... состоит в изучении... влияния дисперсности и процентного содержания порошков на закон скорости горения твердотопливного заряда». Не совсем понятно, что автор имеет в виду: наверное, речь идет о влиянии на процесс, а не на закон.

2. В третьей главе при нахождении констант формальной химической кинетики автор ошибочно называет комплекс (Qz), выражающий произведение теплового эффекта реакции (Q) на предэкспоненциальный множитель (z), предэкспоненциальным множителем. Также при вычислении констант формальной кинетики (энергии активации E и комплекса Qz) с использованием метода наименьших квадратов автором не указаны доверительные интервалы погрешности определения этих величин, не приведена размерность комплекса Qz .

3. Используемые в диссертационной работе аналитические зависимости, определяющие процесс горения твердотопливного заряда, автор называет математической моделью, что не совсем верно. Скорее, это аналитические оценки или приближенный теоретический анализ, так как математическая постановка задачи в строгом смысле этого понятия в работе не приведена.

4. В работе не даны оценки, указывающие на возможность проводить теоретический анализ течения газа в канале заряда в одномерном и квазистационарном приближении.

5. Количество заключительных выводов в диссертации можно было сократить путем объединения некоторых из них.

Отмеченные недостатки не являются определяющими.

Заключение

Характеризуя в целом исследование, представленное в диссертационной работе Н.Н. Золоторева, следует констатировать, что автором выполнен взаимосвязанный цикл работ по изучению рабочих процессов в гибридном ракетном двигателе прямой схемы, всесторонний физический анализ результатов определяет высокий научный уровень диссертации. Диссертация написана грамотным, лаконичным языком, хорошо иллюстрирована. Основные результаты диссертационной работы Н.Н. Золоторева опубликованы в научной печати и докладывались на конференциях.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Н.Н. Золоторева удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-

математических наук по специальности 01.04.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Официальный оппонент доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Отдела структурной макрокинетики федерального
государственного учреждения науки Томский научный центр СО РАН
634021, г. Томск, пр. Академический, 10/3.
(3822) 492-782 ovlap@mail.ru



Лапшин Олег Валентинович

Подпись официального оппонента заверяю
Председатель Федерального государственного учреждения
науки Томский научный центр СО РАН
доктор физико-математических наук



Колосов В.В.