

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Порязова В.А. «Математическое моделирование горения металлизированных твердых топлив с учетом процессов в газовой фазе», выполненную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Проблема горения металлизированных твердых топлив остается актуальной многие десятилетия несмотря на достаточно большое число исследований, проведенных в рамках этого научного направления. Скорее всего это связано с перспективами замены ракет-носителей с жидкостными двигателями на системы аналогичного назначения, но с твердотопливными двигателями. Перспективность обусловлена не только преимуществами твердотопливных ракет перед жидкостными в части их подготовки к запуску, хранения и транспорта. Основное направление конкуренции этих двух систем на ближайшие годы – антропогенное воздействие на окружающую среду. И в этом плане у РДТТ очевидны преимущества перед ЖРД. Уменьшить негативное воздействие жидкостных ракет, скорее всего, уже невозможно. В то же время уменьшение размеров частиц металлов, являющихся одним из основных компонентов современных ТРТ уже не только перспективная, но и реальная задача сегодняшнего дня. Но широкое внедрение смесевых топлив с размерными частицами металлов до настоящего времени осуществляется в основном эмпирически. Технологи разрабатывают рецептуры и технологии производства металлизированных ТРТ на основе нанопорошков металлов путем экспериментального подбора параметров на всех стадиях изготовления топлив. Можно достаточно обосновано констатировать, что в настоящее время не разработана общая теория горения металлизированных ТРТ, учитывающая особенности механизма газофазного горения топливных композиций на основе мелкодисперсных порошков металлов (в первую очередь алюминия).

В этой связи тема диссертации Порязова В.А., целью которой является разработка физической и математической моделей процессов горения

металлизированных топлив, с учетом происходящих в газовой фазе процессов теплопереноса и влияния массовой доли и дисперсности частиц металла на скорость горения, является безусловно актуальной. Актуальность темы рецензируемой диссертации подтверждается также и тем, что диссертационное исследование выполнялось при финансовой поддержке РФФИ, Минобрнауки РФ и Национального исследовательского Томского государственного университета.

Также следует отметить, что по мнению оппонента тема диссертации Порязова В.А. по своему содержанию полностью соответствует перечню критических технологий Российской Федерации (утвержден Президентом РФ 07 июля 2011 года) в части «Транспортные и космические системы» и «Перспективные виды вооружений, военной и специальной техники». Тема диссертации Порязова В.А. соответствует и Перечню критических технологий РФ в части «Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения».

Наиболее значимыми для науки и практики, по мнению оппонента, являются следующие научные результаты, полученные Порязовым В.А.:

1. Разработана физическая модель горения металлизированного твердого топлива, учитывающая экзотермическую химическую реакцию в газовой фазе, горение частиц металла в продуктах газификации топлива, движение продуктов сгорания от поверхности топлива.
2. Математическая модель горения металлизированного твердого топлива, учитывающая конвекцию, теплопроводность, диффузию в газовой фазе, процессы теплопереноса в частицах металла и окисление последних в газе, различия скоростей движения твердых частиц и несущей фазы.
3. Результаты численного моделирования процессов горения трех составов (пороха Н, смесового твердого топлива на основе перхлората аммония, замороженной суспензии нанодисперсного алюминия с водой и смеси гелеобразной воды с ультрадисперсным порошком алюминия).

4. Установлено, что линейная скорость горения металлизированного топлива увеличивается с уменьшением размеров частиц металла, диспергируемых с поверхности горения.
5. Установлена связь между распределением по размерам частиц металла, диспергируемых с поверхности топлива, по размерам со скоростью горения металлизированных твердых топлив в условиях агломерации частиц металла непосредственно на поверхности топлива.
6. Проведен анализ закономерностей процессов нестационарного горения пороха Н на основе сопряженной модели и обоснована возможность применения этой модели для описания процесса погасания пороха и при резком сбросе давления.

Новизна результатов, выводов и защищаемых положений диссертации Порязова В.А. убедительно подтверждается публикациями в научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций.

Необходимо подчеркнуть безусловную оригинальность разработанной автором диссертации модели горения металлизированных топлив. Новизна подхода Порязова В.А. заключается в дискретизации процесса горения на комплекс физических и химических взаимосвязанных процессов, детальное описание которых создает объективные условия для более достоверного прогностического моделирования характеристик горения (в первую очередь температуры и скорости горения). Также следует отметить, что сформулированная в диссертации Порязова В.А. модель может быть развита в дальнейшем за счет дальнейшей детализации физических процессов, протекающих при горении металлизированных топлив.

По содержанию рукописи и автореферата диссертации необходимо сделать три замечания, связанные в основном с постановками решенных в диссертации задач:

1. Моделирование процесса движения частицы сопряжено с заданием начального условия – скорости диспергирования (или «вылета» по словам автора диссертации). Значение этой скорости в конечном итоге и определяет интенсивность протекания многих процессов в последующем. В рукописи же диссертации алгоритм задания этого начального условия не описан. Принятое (стр.30) условие  $W(x,0)=0$  не вполне, по мнению оппонента, соответствует физике реального процесса. При горении металлизированных твердых топлив частицы окислов металлов «вылетают» с поверхности горения с достаточно большими скоростями, значения которых влияют на траекторию последующего движения частицы.
2. Также автор диссертации не обосновывает допущение об отсутствии вклада лучистого потока на температурное поле в исследуемой системе и характеристики горения. С одной стороны достаточно очевидно, что разработанная автором модель полностью соответствует критерию новизны и решение любой из приведенных в рукописи системы уравнений сопряжено со значительными трудностями. Но, с другой стороны, температура продуктов сгорания металлизированных твердых топлив составляет 3000К и более. В таких условиях было бы целесообразным показать на примерах (возможны достаточно простые оценки) диапазон применимости разработанного в диссертации подхода и математических моделей.
3. При описании постановки задачи горения замороженной суспензии нанодисперсного алюминия с водой не описывается скорость испарения воды, как функция температуры поверхности и давления паров в приповерхностном слое (стр:78). Поэтому остается недостаточно определенным механизм испарения (другими словами движущая сила фазового перехода) воды.

Сформулированные замечания не являются доминирующими при оценке значения для науки и практики результатов, положений и выводов Порязова В.А. Рецензируемая диссертация выполнена на хорошем фундаментальном научном уровне и заслуживает высокой в целом оценки.

Диссертация Порязова В.А. соответствует современным требованиям по практической значимости результатов диссертационных исследований.

Разработанные автором модели и методы решения соответствующих задач математической физики могут быть использованы при разработке новых топливных композиций на основе мелкодисперсных порошков металлов (до настоящего времени производители, например, твердых ракетных топлив во Франции ведут эти работы только на основании использования эмпирической информации о горении таких составов).

Достаточно убедительным выглядит в рукописи диссертации и обоснование достоверности результатов выполненных теоретических исследований. Автор провел сравнение полученных им теоретических следствий с экспериментальными значениями основной характеристики процесса (скорости горения) нескольких топливных композиций. Также проведены работы по исследованию сеточной сходимости численного решения ряда задач при варьировании сеточных параметров. Проведен и анализ консервативности используемых разностных схем проверкой выполнения законов сохранения массы и энергии при численном решении сформулированных задач.

Рукопись диссертации и автореферат написаны ясным и доступным для широкого круга читателей литературным языком в доказательном стиле. Автореферат соответствует основным положениям диссертации. Материалы диссертации хорошо опубликованы в научной периодической литературе и апробированы на авторитетных международных и всероссийских научных конференциях.

Содержание диссертации Порязова В.А. полностью соответствует паспорту специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

На основании анализа содержания рукописи и автореферата рецензируемой диссертации можно сделать заключение, что диссертация Порязова В.А. «Математическое моделирование горения металлизированных твердых топлив с учетом процессов в газовой фазе» полностью соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней п.9, утвержденным постановлением Правительства РФ от 24.09.13 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

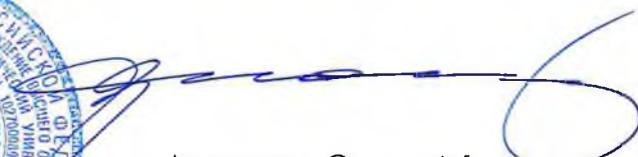
Официальный оппонент,  
Заведующий кафедрой теоретической  
и промышленной теплотехники ЭНИН ТПУ,  
доктор физико-математических наук,  
профессор  
Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина,  
д.30, ФГАОУ ВО НИ ТПУ  
E-mail: [marisha@tpu.ru](mailto:marisha@tpu.ru)  
тел.: 8(3822)606-248



Кузнецов Гений Владимирович

Подпись Г.В. Кузнецова удостоверяю:

Ученый секретарь Национального  
исследовательского Томского  
политехнического университета



Ананьева Ольга Афанасьевна

24.11.2015