

Сибирское отделение Российской академии наук  
Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН  
Центральный аэрогидродинамический институт  
им. проф. Н.Е. Жуковского  
Новосибирский национальный исследовательский  
государственный университет

**ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ:  
ТЕОРИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ  
И НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Тезисы докладов  
XIV Всероссийской школы-конференции  
молодых ученых  
*28 февраля – 6 марта 2020 г., Новосибирск – Шерегеш*

Под редакцией А.Н. Шиплюка

Новосибирск  
Параллель  
2020

Всероссийская школа-конференция для молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» – научное мероприятие, которое проводится на базе Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН совместно с Центральным аэрогидродинамическим институтом им. проф. Н.Е. Жуковского и Новосибирским национальным исследовательским государственным университетом.

На конференции обсуждаются последние результаты экспериментальных исследований и численного моделирования, полученные в области механики сплошных и гетерогенных сред, гидродинамической неустойчивости, ламинарно-турбулентного перехода, газовой динамики, теории удара и высокоскоростного взаимодействия тел, аэродинамики, водородной энергетики, и возникающих при этом вычислительных проблем и методов их решения.

С заказными докладами приглашены ведущие специалисты, работающие в различных научных направлениях в институтах Российской академии наук и высшей школы, чьи доклады дадут достаточно полную картину исследований по механике жидкости и газа, а также смежным направлениям.

В настоящем сборнике в основном представлены доклады молодых ученых – участников конференции. Опубликованные здесь последние результаты представят интерес для ученых, аспирантов и студентов, занятых вопросами механики.

# ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ГОРЕНИИ СМЕСЕВОГО МЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

**В.А. Порязов, Е.В. Перчаткина, К.М. Моисеева, А.Ю. Крайнов**

*Томский государственный университет  
634050, Томск*

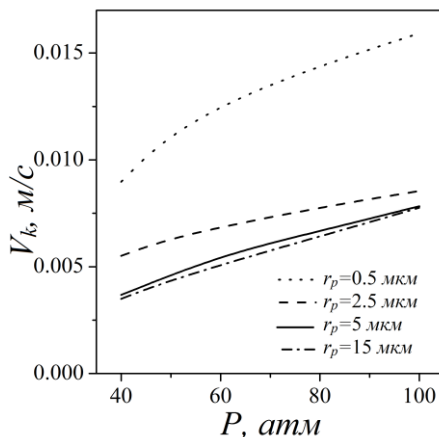
Доклад посвящен моделированию горения металлизированного смесового твердого топлива (МСТТ). На основе физико-математических постановок [1, 2], а также предположений теории многофазных реагирующих сред Р.И. Нигматулина разработана модель горения МСТТ, основанная на модели горения смесового твердого топлива Германса и учитывающая динамическое, тепловое и химическое взаимодействие между газом и частицами алюминия при движении продуктов газификации МСТТ от его поверхности. Целью исследования является определение скорости горения МСТТ в зависимости от давления и состава (присутствия частиц алюминия в смесовом твердом топливе, дисперсности и массовой концентрации порошка алюминия) топлива.

Математическая постановка задачи формулируется при следующих допущениях. На левой границе области находится смесовое металлизированное твердое топливо, состоящее из окислителя, связки и частиц алюминия с массовыми долями  $\alpha_{ок}$ ,  $\alpha_f$ ,  $\alpha_{Al}$  соответственно. На правой границе расчетной области полагается вытекание смеси в окружающую среду с заданным давлением. При нагреве с поверхности твердого топлива истекают продукты его газификации и частицы алюминия. Газовая фаза состоит из смеси газообразных окислителя и горючего, способных к экзотермической химической реакции. Скорость химической реакции зависит от температуры по закону Аррениуса. Газ при нагревании расширяется, возникает течение его от поверхности МСТТ, которым захватываются частицы алюминия. Частицы алюминия, прогреваясь до температуры зажигания частиц, начинают гореть. Закон скорости горения частиц алюминия задается как в [1].

Система уравнений математической модели состоит из уравнений сохранения массы, импульса и энергии газа и частиц, уравнениями баланса массы окислителя в газе, числа частиц в единице объема и уравнения состояния газа. Метод решения системы уравнений аналогичен работе [2] и основан на методах распада произвольного разрыва С. К. Годунова [3] и распада разрыва в среде, лишенной собственного давления А. Н. Крайко [4].

© Порязов В.А., Перчаткина Е.В. Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., 2020

Теплофизические и химико-кинетические параметры двухфазной среды для проведения расчетов взяты из [1, 2]. На рисунке представлены результаты расчета линейной скорости горения МСТТ от давления при различных значениях размера частиц алюминия, выходящих с поверхности МСТТ. С увеличением давления скорость горения увеличивается. С увеличением размера частиц алюминия скорость горения уменьшается.



Зависимость линейной скорости горения смесового твердого топлива от давления окружающей среды

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10054).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Порязов В.А., Крайнов А.Ю. Расчет скорости горения металлизированного твердого топлива с учетом распределения агломератов по размерам // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89, № 3. С. 568–574.
2. Моисеева К. М., Крайнов А. Ю., Дементьев А. А. Определение критических условий искрового зажигания бидисперсного порошка алюминия в воздухе // Физика горения и взрыва. 2019. Т. 55, № 4. С. 26–33.
3. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М: Наука, 1976.
4. Крайко А.Н. О поверхностях разрыва в среде, лишенной «собственного» давления // Прикладная математика и механика. 1979. Т. 43, № 3. С. 500–510.

|                                                                                                                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>69. Нестеров А.Ю.</b> Экспериментальное исследование диспергирования жидкости малорасходной форсункой внутреннего смешения                                                                                                              | 135 |
| <b>70. Нечепуренко Ю.М., Бойко А.В., Демьянко К.В., Кириловский С.В., Поплавская Т.В.</b> Расчет положения ламинарно-турбулентного перехода                                                                                                | 137 |
| <b>71. Ничик М.Ю., Запрягаев И.И., Тимошевский М.В., Первушин К.С.</b> Использование турбулизатора для управления кавитацией: эксперимент на двумерном крыле                                                                               | 139 |
| <b>72. Ноздрачев А.Ю., Бахнэ С.</b> Квазидномерные расчеты сверхзвукового течения в канале с горением. Сравнение с экспериментом                                                                                                           | 141 |
| <b>73. Образ А.О., Федоров А.В.</b> Анализ устойчивости течения над тонким параболическим профилем при числе Маха 3                                                                                                                        | 143 |
| <b>74. Осипова С.Л., Горбушин А.Р.</b> Исследование несжимаемого пограничного слоя на стенках трансзвуковой аэродинамической трубы Т-128 при очень больших числах Рейнольдса                                                               | 145 |
| <b>75. Пажин А.А., Еремин М.О., Буякова С.П., Мировой Ю.А.</b> Математическое моделирование разрушения образцов с шевронным надрезом из гетеромульной керамики на основе карбида циркония при трехточечном изгибе                          | 147 |
| <b>76. Панина А.В., Косинов А.Д., Ермолаев Ю.Г., Семенов Н.В., Яцких А.А.</b> О развитии искусственного локализованного возмущения в поперечно-модулированном пограничном слое скользящего крыла при числе Маха 2                          | 149 |
| <b>77. Писарев М.А., Емельянова Е.С.</b> Ранний прогноз локализации пластической деформации в технически чистом титане по характеристикам мезоскопического деформационного рельефа                                                         | 151 |
| <b>78. Питеримова М.В., Косинов А.Д., Семёнов Н.В., Яцких А.А., Ермолаев Ю.Г., Кочарин В.Л.</b> Экспериментальное исследование возбуждения и эволюции противовращающихся продольных вихрей в пограничном слое плоской пластины при $M = 2$ | 153 |
| <b>79. Полевщиков Д.П., Кашковский А.В.</b> Анализ аэродинамических характеристик суборбитального летательного аппарата                                                                                                                    | 155 |
| <b>80. Полешкин С.О., Кудрявцев А.Н.</b> Исследование неустойчивости Рэлея – Тейлора на основе кинетических уравнений                                                                                                                      | 157 |
| <b>81. Попов И.М., Моралев И.А., Устинов М.В.</b> Структура волнового пакета, возбуждаемого в двумерном пограничном слое группой микроразрядов в плазменном актуаторе                                                                      | 160 |
| <b>82. Порязов В.А., Перчаткина Е.В., Моисеева К.М., Крайнов А.Ю.</b> Газодинамические эффекты при горении смесового металлизированного твердого топлива                                                                                   | 162 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>111. Ядренкин М.А.</b> Удержание газоразрядной плазмы в гиперзвуковом потоке магнитным полем .....                                                                                                                                                                       | 216 |
| <b>112. Яцких А.А., Панина А.В., Ермолаев Ю.Г., Смородский Б.В., Кочарин В.Л., Косинов А.Д., Семенов Н.В., Афанасьев Л.В.</b> Экспериментальное исследование возмущений сверхзвукового пограничного слоя на модели скользящего крыла с периодическими шероховатостями ..... | 218 |

Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: Тезисы докладов XIV Всероссийской школы-конференции молодых ученых (28 февраля – 6 марта 2020 г., Новосибирск – Шереш) / Под ред. А.Н. Шиплюка. Новосибирск: Параллель, 2020. 228 с.

Ответственный за выпуск М.А. Ядренкин  
Редактор Т.В. Ветровская

Подписано в печать 20.02.2020  
Формат бумаги 60×84/16, Усл. печ. л. 13.2  
Уч.-изд. л. 12.1, Тираж 150 экз., Заказ № 202-1

Отпечатано в типографии ООО "Параллель"  
630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1