



**Физико-  
технический  
факультет**

Томского  
государственного  
университета

ГОРЕНИЕ АЭРОВЗВЕСИ ПОРОШКА АЛЮМИНИЯ ПРИ  
ЗАКРУТКЕ ПОТОКА

Крайнов А. Ю., Моисеева К. М.

# Физическая постановка задачи

Работа посвящена исследованию особенностей течения и горения аэровзвеси порошка алюминия в цилиндрическом канале с внезапным расширением при закрутке потока на входе в канал. Физическая постановка задачи основана на [1]. Внезапное расширение цилиндрического канала может привести к изменению характеристик течения аэровзвеси. Закрутка газа на входе также существенно изменяет характер течения аэровзвеси. Постановка задачи основывается на подходах механики двухфазных реагирующих сред и записывается уравнениями Эйлера.

## Принятые допущения:

- Для учета закрутки потока в постановке задачи задается начальная скорость газа по тангенциальному направлению.
- Полагается, что с левого торца трубы поступает аэровзвесь с заданной массовой долей частиц, радиусом частиц  $r_p$ , скоростью вдоль осевого направления  $u_{xb}$ , нулевой скоростью вдоль радиального направления и скоростью  $u_\phi$  вдоль тангенциального направления.
- Процессами диффузии и теплопроводности в газе пренебрегается.
- Учитывается тепловое расширение газа при повышении температуры и его движение;
- Внутри канала, в узкой входной части расположен очаг зажигания с постоянным тепловыделением.
- Горение частиц алюминия описывается на основе экспериментальных данных, воспламенение частицы алюминия происходит при достижении ею температуры зажигания  $T_{kz}$ .
- Скорость гетерогенной химической реакции на частицах описывается с учетом массоотдачи.
- Учитывается межфазное взаимодействие между частицами и газом. Подробности, касающиеся воспламенения частиц, изложены в работе [2].

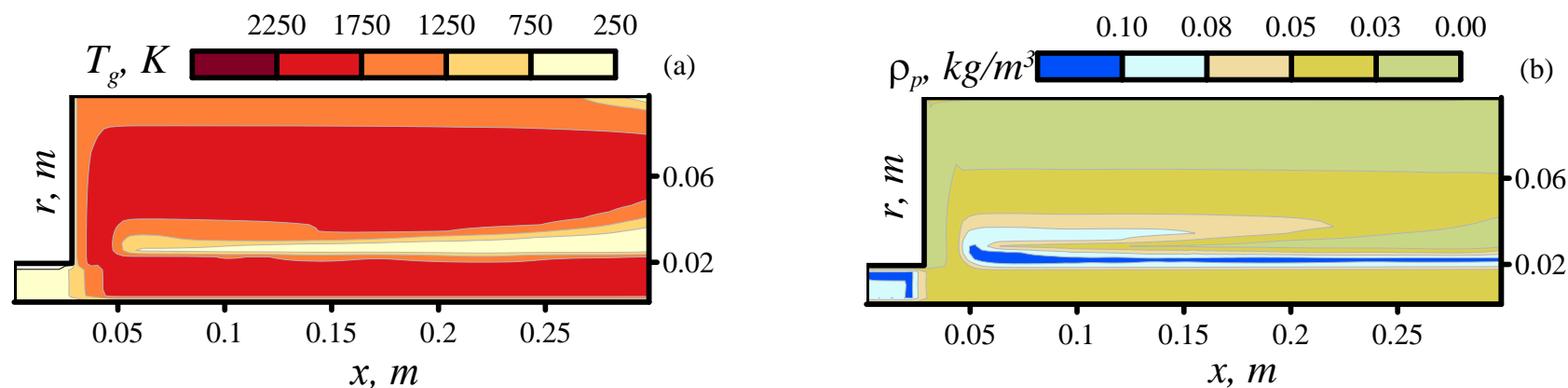
1. Егоров А. Г. Горение дисперсного алюминия в потоке воздуха: Монография – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008.
2. Моисеева К. М., Крайнов А. Ю., Дементьев А. А. Определение критических условий искрового зажигания бидисперсного порошка алюминия в воздухе // Физика горения и взрыва. 2019. Т. 55. № 4. С. 26–33.

# Метод решения и результаты

Постановка задачи определяется уравнениями сохранения массы, импульса и энергии газа и частиц, сохранения массы кислорода в газе и счетной концентрации частиц в смеси. На входе в трубу при  $x = 0$  задаются значения энтальпии и расхода газа и частиц, значения скорости газа и частиц вдоль радиального и тангенциального направлений, а также значения массовой концентрации окислителя в газе и количества частиц. На выходе из трубы при  $x = L_x$  задается атмосферное давление.

Метод решения задачи аналогичен методу из [2] и основан на алгоритмах [3, 4]. Шаги расчетной сетки по пространству вдоль осевого и радиального направления задавались равными  $10^{-3}$  м. Шаг по времени определялся из условия устойчивости Куранта.

На рисунках 1 представлен установившийся режим течения и горения аэровзвеси порошка алюминия в случае горения потока с закруткой по закону  $u_\varphi(0, r, t) = A_z (r/R) u_{xb}$ , где  $u_{xb}$  – осевая компонента скорости потока на входе в канал,  $r, R$  – ширина входного и выходного (после расширения) канала,  $A_z$  – коэффициент в законе закрутки.



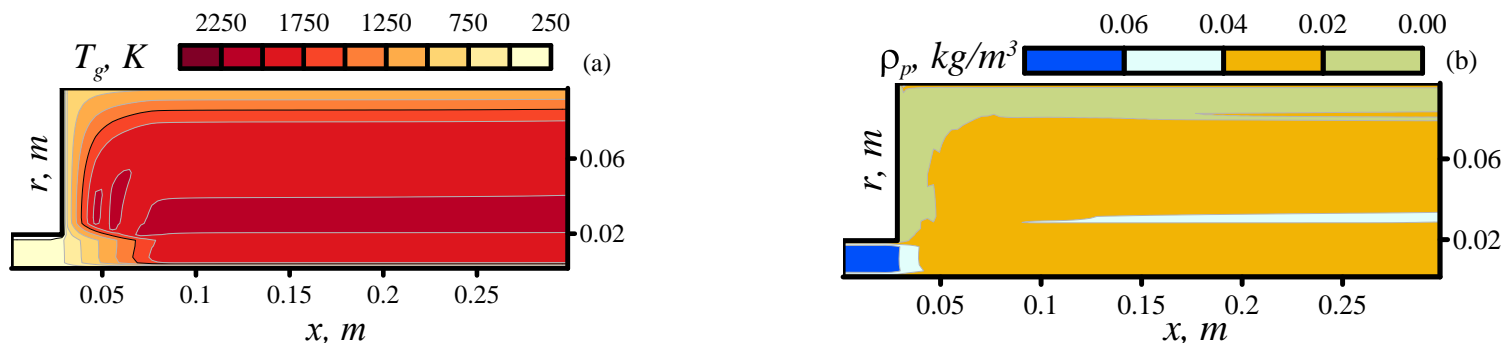
**Рисунок 1.** Температура газа (а), массовая концентрация взвеси (б) при  $\rho_{pb} = 0.1 \text{ kg/m}^3$ ,  $r_p = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ ,  $u_b = 1 \text{ m/s}$ ,  $A_z = 75$ .

При выбранных соотношениях между осевой и угловой составляющей скорости подачи смеси на входе в канал частицы попадают в очаг горения, воспламеняются сразу на входе в расширяющуюся часть канала, потоком их относит вниз по течению. Основная масса частиц сосредоточена вдоль линии подачи смеси.



# Результаты расчета

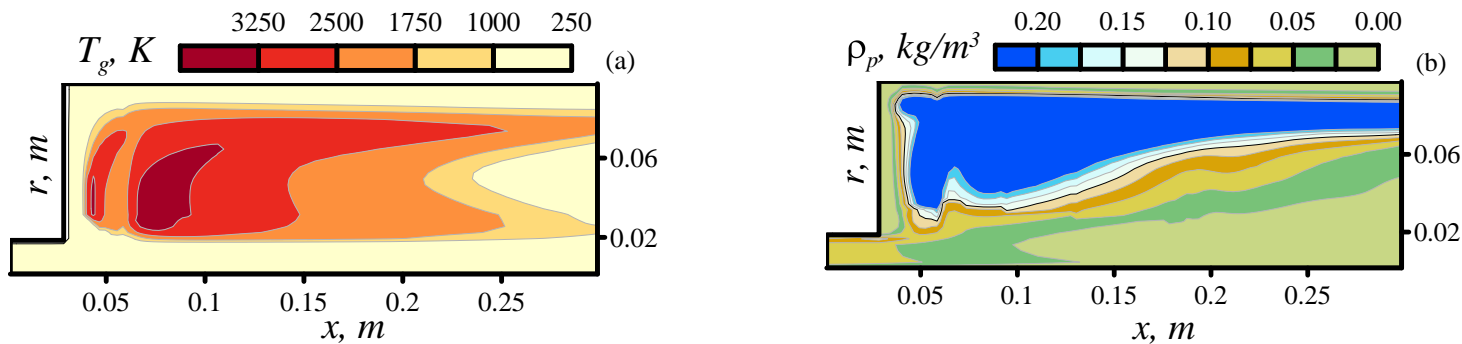
На рисунке 2 представлены результаты расчета в случае уменьшения массовой концентрации частиц алюминия в подаваемой смеси и уменьшении коэффициента в законе закрутки.



**Рисунок 2.** Температура газа (а), массовая концентрация газозвеси (б),  $\rho_{pb} = 0.075 \text{ kg/m}^3$ ,  $r_p = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ ,  $u_b = 3 \text{ m/s}$ ,  $A_z = 50$ .

При выбранных параметрах расчета меняется форма фронта горения и распределение частиц по пространству. Это связано с быстрым сгоранием частиц алюминия за счет более длительного пребывания в области очага воспламенения.

В случае малых массовых концентраций порошка алюминия и высоких угловых скоростях подачи смеси на входе в горелку наблюдается формирование фронта горения вдоль осевого направления подачи смеси.



**Рисунок 3.** Температура газа (а), массовая концентрация газозвеси (б),  $\rho_{pb} = 0.075 \text{ kg/m}^3$ ,  $r_p = 10^{-5} \text{ m}$ ,  $u_b = 5 \text{ m/s}$ ,  $A_z = 150$ .

## Выводы.

Разработана физико-математическая модель горения аэрозвеси порошка алюминия в канале с внезапным расширением при закрутке потока. Показано, что в зависимости от угловой составляющей скорости подачи смеси на входе в канал фронт горения может формироваться в окрестности зоны подачи или быть вытянутым вдоль оси канала. Показано, что при высоких скоростях закрутки горящие частицы забрасывает за поворот канала, что приводит к формированию нагретых зон в газе и изменению формы пламени.

Указанные закономерности горения аэрозвеси порошка алюминия в канале с расширением могут быть интересны при проектировании энергетических установок, работающих в режиме сжигания газодисперсного топлива. Закономерности установления температурных режимов могут быть использованы для выбора оптимальных параметров установки.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках ГЗ № 0721-2020-0036*

# Спасибо за внимание!

Моисеева Ксения Михайловна

Тел. +7 (3822) 529-845

E-mail: Moiseeva\_KM@t-sk.ru



Национальный исследовательский  
Томский государственный университет

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36  
+7 (3822) 52-98-52, +7 (3822) 52-95-85 (факс)  
rector@tsu.ru

[www.tsu.ru](http://www.tsu.ru)