

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ АЭРОВЗВЕСИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ТРУБЕ ПРИ ЗАКРУТКЕ ПОТОКА

К.М. Моисеева, А.Ю. Крайнов, Ю.А. Тарасенко

*Томский государственный университет  
634050, Томск, Россия*

Горение с закруткой потока на настоящий момент является одной из важных инженерных задач для физики горения. Существует гипотеза о повышении эффективности горения реагирующих газовых смесей в камерах сгорания с закруткой потока [1], а также повышения эффективности работы устройств по сжиганию топлив [2 – 4]. Горение газозвесей в вихревых горелках представляет собой предмет изучения ряда авторов. Полагается, что закрутка потока может приводить к интенсификации теплообмена и, соответственно, повышению эффективности сжигания газодисперсных топлив. Для моделирования закрученных потоков используются уравнения Рейнольдса [3] или уравнения Навье-Стокса [1], учитывающие турбулентные источники. Выбор модели турбулентности зависит от условий организации горения.

В настоящей работе закрутку потока в цилиндрической трубе предложено моделировать через учет угловой составляющей скорости потока. Целью исследования является определение влияния угловой составляющей скорости потока на характеристики течения и горения газозвесей угольной пыли в трубе.

Решается задача горения газозвесей угольной пыли в двухмерной осесимметричной постановке задачи. Полагается, что система, уравнений, описывающих движение газозвесей, учитывает изменение скорости потока по осевой и радиальной составляющей, производная скорости потока по угловой составляющей равна нулю. Предполагается, что до начала процесса труба заполнена холодным воздухом, частицы угольной пыли отсутствуют. Правый торец трубы открыт, с левого торца в трубу подается разогретая до высокой температуры аэрозвесь угольной пыли. Полагается, что поток аэрозвесей является закрученным. Не учитываются диффузионные слагаемые в уравнениях энергии газа и парциальной плотности окислителя в газе. Разогретые частицы угольной пыли способны к химическому реагированию. На поверхности частиц протекает гетерогенная реакция первого порядка по кислороду. Скорость гетерогенной химической реакции на частицах лимитируется коэффициентом массоотдачи  $\beta$  [7]. Учитывается межфазное взаимодействие между частицами и газом.

Физико-математическая постановка задачи основывается на подходах механики многофазных реагирующих сред Р. И. Нигматуллина [6] и ранее разработанной физико-математической модели горения взвеси угольной пыли в воздухе [7]. Метод решения задачи соответствовал работе [7] и был основан на алгоритмах [8, 9]. Шаги расчетной сетки по пространству вдоль осевого и радиального направления задавались равными  $10^{-3}$  м, шаг по времени вычислялся из условия устойчивости Куранта [8].

На рис. 1 – 3 представлена динамика развития горения в случае незакрученного потока (рис. 1) и потока с закруткой по закону  $u_\varphi(0, r, t) = U(r/r_s)$ , где  $r_s$  – радиус цилиндрического канала,  $U$  – максимальная скорость вдоль угловой составляющей потока. Расчеты выполнены для газозвесей с осевой скоростью подачи  $u_{xb} = 2$  м/с, массовой концентрацией частиц, подаваемых в трубку, 5 % от массы подаваемого газа,  $m_{pb} = 0.05 \rho_g$ , и радиусом частиц  $r_p = 10^{-6}$  м/с. Частицы с заданным радиусом перемешаются вместе с газом, отставание частиц мало.

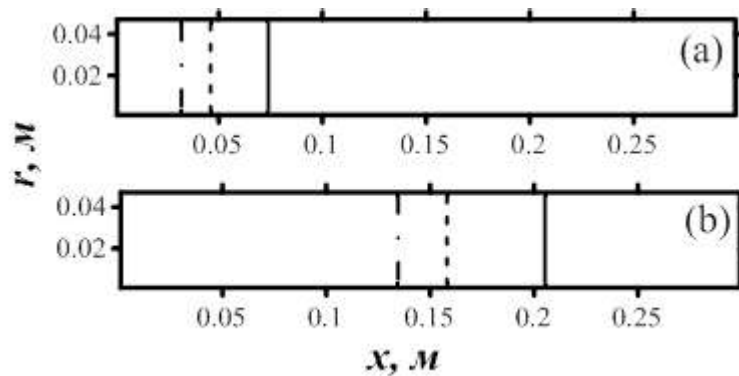


Рис.1. Распределения температуры частиц по пространству в моменты времени  $t = 0.005$  с (а),  $0.015$  с (б); изолинии:  $T_p = 300$  К (сплошная линия),  $700$  К (пунктирная прямая),  $1500$  К (штрихпунктир);  $r_p = 10^{-6}$  м/с,  $U = 0$  м/с,  $u_{xb} = 2$  м/с,  $m_{pb} = 0.05 \rho_{gb}$

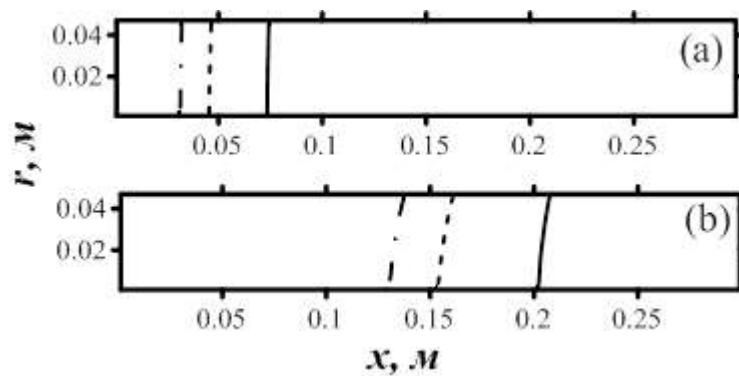


Рис.2. Распределения температуры частиц по пространству в моменты времени  $t = 0.005$  с (а),  $0.015$  с (б); изолинии:  $T_p = 300$  К (сплошная линия),  $700$  К (пунктирная прямая),  $1500$  К (штрихпунктир);  $r_p = 10^{-6}$  м/с,  $U = 10$  м/с,  $u_{xb} = 2$  м/с,  $m_{pb} = 0.05 \rho_{gb}$

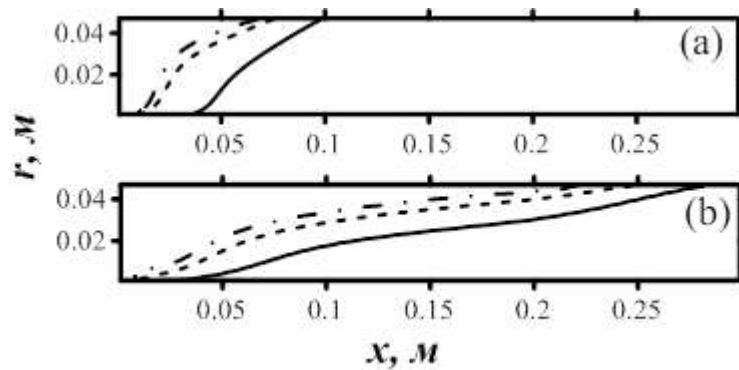


Рис.3. Распределения температуры частиц по пространству в моменты времени  $t = 0.005$  с (а),  $0.015$  с (б); изолинии:  $T_p = 300$  К (сплошная линия),  $700$  К (пунктирная прямая),  $1500$  К (штрихпунктир);  $r_p = 10^{-6}$  м/с,  $U = 100$  м/с,  $u_{xb} = 2$  м/с,  $m_{pb} = 0.05 \rho_{gb}$

Согласно рисунку 1, в случае незакрученного потока перемещение фронта горения может быть описано одномерной постановкой задачи. Для случая закрученного потока

распределение температуры вдоль радиуса цилиндрического канала становится неоднородным, рисунки 2 – 3. На рисунках 2 и 3 коэффициент в законе, по которому задается угловая составляющая скорости газа и частиц вдоль левого торца трубки, равен 10 и 100 м/с соответственно. Присутствие угловой составляющей скорости потока приводит к изгибу фронта горения (рисунок 2), с последующим увеличением угловой составляющей скорости газа на левом торце трубки фронт горения «прижимается» к боковой поверхности трубки. Имеет место существенная неоднородность устанавливающегося поля температур.

Эффект неоднородности фронта горения, возникающий при наличии угловой составляющей скорости потока, может привести к существенным изменениям в характере распространения волны горения по каналу. Это может, в свою очередь, повлиять на полноту сгорания реагирующей газозвеси. Для случая, представленного на рисунке 3, изолинии массовой концентрации частиц по каналу в момент времени  $t = 0.015$  с имеют вид, представленный на рис.4. Согласно рисунку 4 в канале возникает область недогоревших частиц, расположенная в окрестностях входа в канал и вблизи внешней стенки.

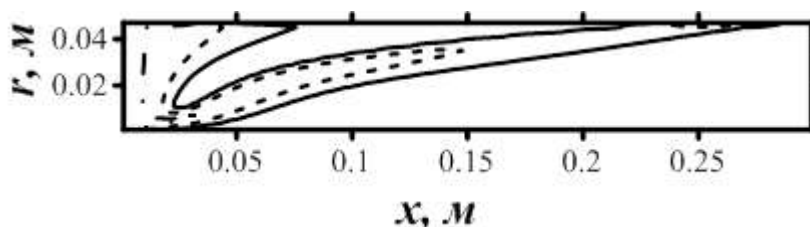


Рис.4. Распределения массовой концентрации частиц по пространству в момент времени  $t = 0.015$  с; изолинии:  $\rho_p = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$  (пунктир с точкой),  $0.5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$  (пунктирная прямая),  $0.1 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$  (сплошная прямая);  $r_p = 10^{-6} \text{ м/с}$ ,  $U = 100 \text{ м/с}$ ,  $u_{xb} = 2 \text{ м/с}$ ,  $m_{pb} = 0.05 \rho_{gb}$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пиралишвили Ш. А., Маркович Д. М., Лобасов А. С., Верещагин И. М. Моделирование рабочего процесса сверхзвуковой камеры сгорания с вихревым воспламенителем-стабилизатором// Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89. №5. С. 1339–1346.
2. Михайлов А.С., Пиралишвили Ш. А., Степанов Е. Г., Евдокимов О. А., Спесивцева Н. С. Особенности сжигания пылевидного торфяного топлива в вихревом горелочном устройстве// Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91. №4. С. 984–991.
3. Матвиенко О. В., Бубенчиков А. М. Математическое моделирование теплообмена и химического реагирования закрученного потока диссоциирующего газа// Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89. №1. С. 118–126.
4. Кузнецов В.А., Дектерев А.А., Сентябов А.В., Чернецкий М.Ю. Расчетное исследование влияния моделей выхода летучих веществ на процессы горения пылеугольного топлива при закрутке потока// Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2016. Т. 9. № 1.С. 15–23.
5. Гаврилов А. А., Дектерёв А. А., Сентябов А. В. Моделирование закрученных течений с когерентными структурами с помощью нестационарной модели переноса Рейнольдсовых напряжений// Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2015. № 4. С. 11-24.
6. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред, Москва: Наука, 1987.
7. Моисеева К. М., Крайнов А. Ю. Численное моделирование искрового зажигания аэрозвеси угольной пыли// Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54. № 2. С. 61–70.
8. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики, Москва: Наука, 1976.
9. Крайко А.Н. О поверхностях разрыва в среде, лишенной 'собственного' давления// Прикладная математика и механика. 1979. Т. 43. № 3. С. 500–510.