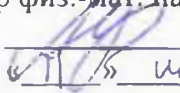


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)  
Физико-технический факультет  
Кафедра математической физики

ДОПУСТИТЬ К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ ГЭК  
Руководитель ООП  
д-р физ.-мат. наук, профессор  
 А.Ю. Крайнов  
«ТГУ» шоки 2020 г.

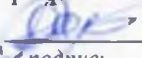
### НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

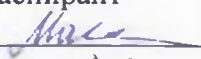
об основных результатах подготовленной научно – квалификационной работы  
(диссертации)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ГАЗОДИСПЕРНЫХ СМЕСЕЙ В  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ НА ФОНЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО-  
МАССООБМЕНА

по основной образовательной программе подготовки научно-педагогических кадров в  
аспирантуре  
направление подготовки 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Моисеев Дмитрий Михайлович

Научный руководитель  
д-р. физ.-мат. наук, профессор  
 Э.Р. Шрагер  
подпись  
« 10 » шоки 2020 г.

Автор работы  
аспирант  
 Д.М. Моисеев  
подпись

Томск-2020

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Исследование процессов тепло- и массообмена при горении газовзвесей в энергетических установках является актуальной задачей для того, чтобы предсказывать вероятные режимы работы горелочных устройств, двигателей, реакторов. Подобные задачи встречаются в отраслях промышленности, таких как ракетостроение, энергетическое машиностроение, горнодобывающая и горноперерабатывающая отрасли.

Для того чтобы предсказывать безопасные режимы работы энергетических установок, нужно представлять, как влияет состав смеси на характеристики горения газовзвесей. Помимо состава смеси на характеристики горения (устойчивость фронта пламени, скорость распространения фронта горения, степень выгорания смеси) влияют характеристики энергетического устройства, в котором протекает процесс реагирования.

Зная основные закономерности протекания процесса горения в зависимости от состава смеси и от внешних условий организации горения, можно предсказывать, насколько безопасной будет работа энергетического устройства.

В настоящей работе поставлена задача исследования режимов горения газовзвеси на фоне процессов тепломассопереноса в энергетическом устройстве. Для решения выбрана газовзвесь угольной пыли, на примере которой демонстрируется влияние как состава смеси, так и условий организации процесса горения на скорость распространения пламени в газовзвеси, устойчивость горения газовзвеси, степень сгорания топлива.

### **В рамках достижения цели диссертации решались следующие задачи:**

1. Разработать физико-математические модели, алгоритмы расчета и программы численной реализации алгоритмов расчета для решения задачи горения газовзвеси угольной пыли в рекуперативной горелке. Провести параметрическое исследование задачи в широком диапазоне составов смеси. Определить влияние рекуперативного теплообмена, а также состава смеси на устойчивость горения и скорость распространения пламени в газовзвеси угольной пыли.

2. Разработать физико-математические модели, алгоритмы расчета и программы численной реализации алгоритмов расчета для решения задачи горения газовзвеси угольной пыли в высокоскоростном закрученном потоке. Провести параметрическое исследование влияния параметров закрутки потока на степень догорания газовзвеси угольной пыли и форму пламени. Определить влияние закрученного течения на характеристики горения газовзвеси.

3. Разработать физико-математические модели, алгоритмы расчета и программы численной реализации алгоритмов расчета для решения задачи горения газовзвеси

угольной пыли в высокоскоростном потоке в канале с внезапным расширением. Провести параметрическое исследование влияния состава смеси, а также параметров канала на степень догорания газозвеси угольной пыли и местоположение фронта пламени.

4. Провести анализ влияния параметров тепло- массообмена на особенности горения газозвесей угольной пыли в энергетических устройствах.

**Научная новизна выполненной диссертации заключается в следующем:**

1. Разработаны физико-математические модели горения газозвесей угольной пыли в энергетических устройствах. Показано влияние конструкции энергетических устройств на особенности горения газозвесей.

2. Разработаны физико-математические модели горения газозвеси угольной пыли в закрутке потока. Показано влияние закрученного течения на особенности формирования фронта горения газозвеси.

3. Показано влияние состава газозвеси угольной пыли на скорость распространения пламени в энергетическом устройстве.

**Результаты исследования имеют важное научное и практическое значение,** которое заключается в

- расширении фундаментальных знаний об особенностях горения газозвесей органических пылей;

- создании надежного программного комплекса для расчета задач горения газозвесей, указанный программный комплекс может быть использован для расчета задач горения газозвесей иных материалов;

Указанные научные результаты, физико-математические модели и программные комплексы были использованы при выполнении научных проектов:

- грант Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-38-00188 мол\_а) «Интенсификация горения бедных метано-воздушных смесей при добавлении частиц угольной пыли» (2016-2017);

- НИОКР Программы «Научный фонд ТГУ им. Д.И. Менделеева № 8.1.70.2015», 2015 г «Разработка методов эффективного сжигания бедных метано-воздушных смесей в горелочных устройствах» (2015),

в которых соискатель являлся исполнителем проекта.

**Методология и методы диссертационного исследования.**

В диссертации использованы два основных подхода к моделированию задач горения газодисперсных сред. Первый подход основан на предположении постоянства давления газа по пространству энергетического устройства. В этом случае для разностной аппроксимации уравнений физико-математической модели была использована неявная

конечно-разностная схема на четырехточечном шаблоне. Во втором подходе, учитывающем переменность давления газа по пространству и во времени, в уравнениях для газа были использованы алгоритмы распада разрыва по методу С. К. Годунова для расчета потоков на гранях расчетных ячеек; для частиц использован модифицированный алгоритм распада разрыва А. Н. Крайко.

В случае постоянного давления газа алгоритм дополнялся схемой бегущего счета для расчета уравнения сохранения массы газа, для повышения порядка аппроксимации системы уравнений использовалось преобразование Самарского при расчете слагаемых, определяющих конвективный тепло-массоперенос в смеси. В случае переменного давления газа алгоритмы расчета потоков на гранях ячеек дополнялись явной разностной схемой для вычисления параметров газа и частиц на новом временном слое. Уравнения в случае переменного давления учитывали источники от химического теплового и динамического взаимодействия между газом и частицами и процессы теплопроводности и диффузии в газе.

В программах численной реализации алгоритмов численного решения контролировались шаги по пространству и времени с учетом физических особенностей задачи и ограничений использованных разностных схем.

Проверка алгоритмов решения задач осуществлялась путем проверки выполнимости законов сохранения. Верификация и валидация программ численной реализации алгоритмов расчета осуществлялась с помощью сопоставления результатов расчета с известными экспериментальными данными.

Подробности использованных алгоритмов расчета изложены в главе 2.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты численного исследования режимов горения газозвеси угольной пыли в воздухе и метано-воздушной смеси в U – образной рекуперативной горелке. Определены диапазоны значений параметров течения реакционной смеси, для которых в зависимости от состава смеси реализуется устойчивое горение газозвеси угольной пыли.

2. Результаты численного исследования задачи горения газозвеси угольной пыли в цилиндрическом канале при закрутке потока на входе в канал. Определено влияние параметров закрутки потока на степень догорания газозвеси.

3. Результаты численного исследования задачи горения газозвеси угольной пыли в цилиндрическом канале с внезапным расширением при закрутке потока на входе в канал. Определено влияние параметров смеси и скорости закрутки потока на форму и местоположение фронта горения газозвеси угольной пыли.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается** контролем выполнения законов сохранения массы, импульса и энергии для газа и частиц при численном решении; сходимостью, точностью и консервативностью, используемых разностных схем; согласованием полученных результатов с экспериментальными и теоретическими результатами из научной литературы.

**Публикации по теме работы.** Результаты работы неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах кафедры математической физики; были представлены на Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики», а также закрытых отраслевых конференциях РФЯЦ ВНИИЭФ; опубликованы в 1 статье в журнале, входящем в Web of Science и включенном в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, 1 статье в материалах конференции, индексируемых Scopus; вошли в два отчета о НИР.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована практическая значимость проведения исследований.

**В первой главе** представлен обзор литературы, в котором выполнен анализ научных статей по теме горения газовзвесей угольной пыли, горению газов и газовзвесей в рекуперативных горелках и энергетических устройствах с конструкционными дополнениями.

**Во второй главе** представлены физико-математические модели и алгоритмы решения задач горения газовзвесей на фоне процессов тепло- массопереноса.

Постановка задачи горения газовзвеси угольной пыли в энергетическом устройстве с рекуперацией тепла формулировалась для следующих допущений. Холодная реакционноспособная смесь поступает в U-образный канал с начальной скоростью  $u_b$  (рисунок 1).

Смесь проходит через верхнюю часть горелки и на границе  $x = L$  меняет направление движения, на границе  $x = 2L$  газ вытекает. Протекая через устройство, реакционная смесь обменивается теплом с внутренней вставкой по закону Ньютона. Газ подчиняется уравнению состояния идеального газа. Давление газа постоянно. Расход реакционной смеси через входное сечение щелевой горелки постоянен. Учитывается распределение температуры смеси и выгорания горючей компоненты только вдоль направления движения смеси; температура в поперечном направлении внутренней

вставки считается однородной. В уравнении изменения плотности окислителя учитывается расход окислителя на четыре типа реакций:  $G_1$  – выделение газообразных летучих компонентов из частиц аэрозвеси,  $G_2$  – горение коксового остатка в частицах угля,  $G_3$  – горение газообразных летучих компонентов,  $G_4$  – горение реакционноспособного газа, входящего в состав газозвеси. Экзотермические химические реакции в газе определяются по закону Аррениуса с кинетикой второго порядка. Гетерогенная реакция на частицах задается реакцией первого порядка. Реакция выхода летучих компонентов задается законом Аррениуса с кинетикой первого порядка

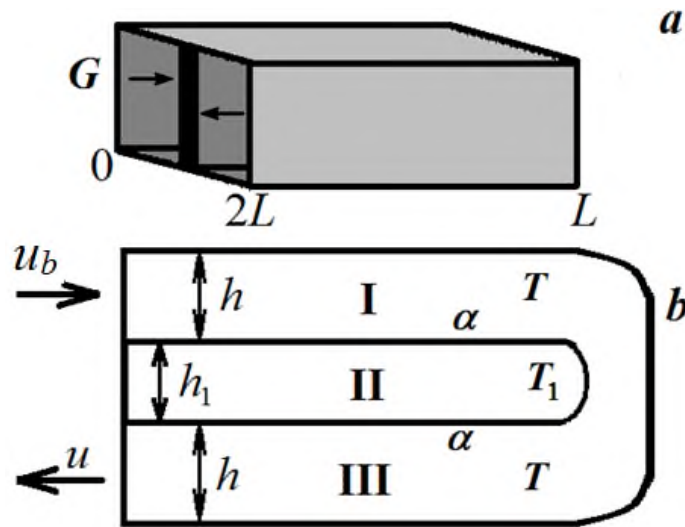


Рисунок 1. Схема энергетического устройства с рекуперацией тепла

Постановка задачи для горения полидисперсной газозвеси угольной пыли в горелке с рекуперацией тепла имела вид:

уравнение энергии для реакционной смеси:

$$c_{pg}\rho_g \left( \frac{\partial T_g}{\partial t} + u \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T_g) \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + W_H^S + Q_4 G_4 + Q_3 G_3 + \sum_{i=1..N} \left[ (G_{1,i} + G_{2,i}) c_p T_{p,i} + \alpha_{p,i} n_{p,i} S_{p,i} (T_{p,i} - T_g) \right], \quad (1)$$

уравнение энергии для внутренней вставки:

$$c_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = -W_H^S, \quad 0 \leq x \leq L. \quad (2)$$

уравнение энергии для частиц:

$$c_p \rho_{p,i} \left( \frac{\partial T_{p,i}}{\partial t} + u_g \frac{\partial T_{p,i}}{\partial x} \right) = \alpha_{p,i} S_{p,i} n_{p,i} (T_g - T_{p,i}) + Q_2 G_{2,i} - (G_{2,i} + G_{1,i}) c_p T_{p,i} - Q_1 G_{1,i}, \quad (3)$$

уравнение баланса массы горючего компонента в газе:

$$\frac{\partial \rho_{f,j}}{\partial t} + u_g \frac{\partial \rho_{f,j}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D(T_g) \rho_g \frac{\partial a_{f,j}}{\partial x} \right) - G_3 - G_4 + \sum_{i=1, Nf} G_{1,i}, \quad (4)$$

уравнение баланса массы окислителя в газе:

$$\frac{\partial \rho_{ox}}{\partial t} + u_g \frac{\partial \rho_{ox}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D(T_g) \rho_g \frac{\partial a_{ox}}{\partial x} \right) - \alpha_2 \sum_{i=1..N} G_{2,i} - \alpha_4 G_4 - \alpha_3 G_3, \quad (5)$$

уравнение баланса массы газа:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_g u_g)}{\partial x} = \sum_{i=1, Nf} (G_{2,i} + G_{1,i}). \quad (6)$$

уравнение баланса массы частиц  $i$ -ой фракции:

$$\frac{\partial \rho_{p,i}}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_{p,i} u_g)}{\partial x} = -G_{2,i} - G_{1,i}. \quad (7)$$

уравнение баланса массы летучих компонентов в частицах  $i$ -ой фракции:

$$\frac{\partial \rho_{pl,i}}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_{pl,i} u_g)}{\partial x} = -G_{1,i}. \quad (8)$$

уравнение счетной концентрации частиц  $i$ -ой фракции:

$$\frac{\partial n_{p,i}}{\partial t} + \frac{\partial n_{p,i} u_g}{\partial x} = 0, \quad (9)$$

уравнение состояния идеального газа:

$$p = \rho_g R_g T_g = const. \quad (10)$$

начальные условия

$$\begin{aligned} T_g(x, 0) = T_{g,b}(x), T_s(x, 0) = T_{s,b}(x), T_{p,i}(x, 0) = T_{p,b}(x), \rho_{p,i}(x, 0) = \rho_{p,b}(x), \\ \rho_f(x, 0) = \rho_{f,b}(x), \rho_{O_2}(x, 0) = \rho_{O_2,b}(x), u_g(x, 0) = u_{g,b}(x), n_{p,i}(x, 0) = n_{p,b}(x). \end{aligned} \quad (11)$$

граничные условия

$$\begin{aligned} T_g(0, t) = T_{g,b}, T_{p,i}(0, t) = T_{p,b}, \rho_f(0, t) = \rho_{f,b}, \rho_{O_2}(0, t) = \rho_{O_2,b}, u_g(0, t) = u_{g,b}, \\ \rho_{p,i}(0, t) = \rho_{p,i}^b, n_{p,i}(0, t) = n_{p,i}^b / (V_{p,i} \rho_p^0), \\ \frac{\partial T_s(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial T_s(L, t)}{\partial x} = \frac{\partial T_g(2L, t)}{\partial x} = \frac{\partial \rho_f(2L, t)}{\partial x} = \frac{\partial \rho_{O_2}(2L, t)}{\partial x} = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

В уравнении (1)  $W_H^S$  - слагаемое, определяющее теплообмен между газом и внутренней вставкой,  $L$  – длина вставки. Индексами 1,  $b$  отмечены параметры внутренней вставки, а также начальные и входные параметры. Горючие компоненты в газе  $\rho_{f,j}$  могут быть газообразными летучими компонентами, выделившимися из частиц и способными к химическим реакциям, или компонентами реакционноспособного газа, в котором протекают экзотермические химические реакции. Переменная  $a_f$  определяет значение

массовой концентрации горючего в смеси. Связь между объемным и массовым содержанием горючего в смеси определяется из соотношения:

$$a_f = \frac{a_{vol} \cdot \mu_f}{(100 - a_{vol}) \cdot \mu_{air} + a_{vol} \cdot \mu_f}. \text{ Здесь } a_{vol} - \text{объемное процентное содержание горючего в}$$

смеси,  $\mu_f$  – молярная масса горючего,  $\mu_{air}$  – молярная масса воздуха. Для остальных параметров взяты общепринятые обозначения. Начальные условия (11) подразумевают, что до начала процесса в горелке установился температурный профиль и профиль концентрации компонентов газовой смеси.

Источники  $G_1 - G_4$ :

$$G_{1,i} = \rho_{p,i}^k k_{01} \exp\left(-E_{a,3}/(R_u T_{p,i})\right) - \text{ скорость изменения массы частиц при выходе летучих,}$$

$\rho_{p,i}^k$  – массовая концентрация летучих компонентов в частицах;

$$G_{2,i} = n_{p,i} S_{p,i} j_{2,i} \rho_{O_2} - \text{ скорость химической реакции на поверхности частиц, где}$$

$$j_{2,i} = \frac{\beta_m k_{02} \exp\left(-E_{a,2}/(R_u T_{p,i})\right)}{\beta_m + \exp\left(-E_{a,2}/(R_u T_{p,i})\right)} - \text{ скорость гетерогенной реакции на частицах,}$$

$$\beta_m = \frac{\lambda_g(T) Nu_D}{c_g \rho_g r_k} - \text{ коэффициент массоотдачи частиц, } Nu_D - \text{ диффузионный аналог числа}$$

Нуссельта;

$$G_3 = k_{03} \rho_{f,i} \rho_{O_2} \exp\left(-E_{a,3}/(R_u T_g)\right) - \text{ скорость химической реакции в газе между}$$

газообразными летучими компонентами и окислителем, где  $\rho_{f,i}$  – массовая концентрация газообразных летучих компонентов;

$$G_4 = \rho_{f,g} \rho_{O_2} k_{04} \exp\left(-E_{a,4}/(R_u T_g)\right) - \text{ скорость химической реакции в газе между}$$

реакционноспособными компонентами исходного газа и окислителем, где  $\rho_{f,g}$  – парциальная плотность реакционноспособной компоненты исходного газа,  $\rho_{f,g} = a_{f,g} \rho_g$ .

Радиус частиц угольной пыли учитывает выход летучих компонентов и определяется из уравнения:

$$r_{p,i} = \sqrt[3]{\frac{3(\rho_{p,i} - \rho_{pl,i})}{4\pi n_{p,i} \rho_p^0 (1 - V_i^C)}}, \quad (13)$$

где  $V_i^C$  – массовое содержание летучих компонентов в частицах  $i$ -ой фракции.

Задача (1) – (12) решалась численно. Уравнения энергии (1) – (2) и уравнения баланса массы горючей компоненты (4) и кислорода (5) в газе решались конечно-разностным методом с использованием преобразования Самарского, обеспечивающего



второй порядок точности. Уравнения неразрывности газа (7), энергии (3), счетной концентрации (9) и баланса массы частиц (8) решались явно с использованием конечных разностей против потока.

Разностная сетка задавалась таким образом, чтобы достаточно подробно описать зону прогрева и узкую зону химической реакции, а также обеспечить значение числа Куранта порядка единицы,  $\left( r = \frac{\lambda_{st}}{c \rho_{st}} \frac{\Delta t}{\Delta h^2} \sim 1 \right)$ . Соответствующие этим требованиям значения шагов по времени и пространству составляли:  $\Delta t = 10^{-5} \text{ с}$ ,  $\Delta h = 10^{-5} \text{ м}$ . В этом случае толщина зоны прогрева перед фронтом пламени определяется выражением  $\left( l = \frac{\lambda_{st}}{c \rho_{st}} \frac{1}{u_n} \right)$ , где  $u_n$  – скорость распространения пламени, для 6 % метано-воздушной смеси  $u_n = 0.065 \text{ м/с}$ , соответствующее значение ширины зоны прогрева перед фронтом пламени для  $\chi_{st} \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$  равна  $l = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ . При выбранном шаге по пространству в зоне подогрева перед фронтом реакции имеется 30 точек разностной схемы.

Проверка разностного алгоритма осуществлялась путем решения частных задач. Решалась задача по определению адиабатической температуры горения газозвеси угольной пыли и задача определения равновесной температуры, устанавливающейся при теплообмене между холодными частицами и нагретым газом. Погрешность расчета по модели составила не более 1 процента.

Постановка задачи горения газа в цилиндрическом канале с закруткой потока формулировалась для следующих допущений:

Решается задача горения газозвеси угольной пыли в двухмерной осесимметричной постановке. Полагается, что система уравнений, описывающих движение газозвеси, 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 аэрозвеси является закрученным. Процессами диффузии и теплопроводности в газе пренебрегается. 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  $\beta$ . Учитывается межфазное взаимодействие между частицами и газом.

Физико-математическая постановка задачи основывается на подходах механики многофазных реагирующих сред Р. И. Нигматуллина. При сформулированных допущениях физико-математическая постановка имеет вид:

Уравнение сохранения массы газа:

$$\frac{\partial r\rho_g}{\partial t} + \frac{\partial r\rho_g u_g}{\partial x} + \frac{\partial r\rho_g v_g}{\partial r} = rG, \quad (14)$$

уравнения сохранения импульса газа:

$$\frac{\partial r\rho_g u_g}{\partial t} + \frac{\partial r(p_g + \rho_g u_g^2)}{\partial x} + \frac{\partial r\rho_g u_g v_g}{\partial r} = -r\tau_x + rGu_k \quad (15)$$

$$\frac{\partial r\rho_g v_g}{\partial t} + \frac{\partial r\rho_g u_g v_g}{\partial x} + \frac{\partial r(p_g + \rho_g v_g^2)}{\partial r} = -r\tau_r + rGv_k + p_g + \rho w_g^2, \quad (16)$$

$$\frac{\partial r\rho_g w_g}{\partial t} + \frac{\partial r\rho_g w_g u_g}{\partial x} + \frac{\partial r\rho_g w_g v_g}{\partial r} = -r\tau_\phi + rGw_k - \rho_g w_g v_g, \quad (17)$$

уравнение баланса массы кислорода в смеси:

$$\frac{\partial r\rho_{O_2}}{\partial t} + \frac{\partial r\rho_{O_2} u_g}{\partial x} + \frac{\partial r\rho_{O_2} v_g}{\partial r} = -r\alpha_r G, \quad (18)$$

уравнение сохранения энергии газа:

$$\begin{aligned} \frac{\partial r\varepsilon_g}{\partial t} + \frac{\partial ru_g(\varepsilon_g + p_g)}{\partial x} + \frac{\partial rv_g(\varepsilon_g + p_g)}{\partial r} = -r \left[ u_k \tau_x + v_k \tau_r + w_k \tau_\phi + n_k \alpha_k S_k (T_g - T_k) \right] + \\ + rGc_k T_k + 0.5rG(u_k^2 + v_k^2 + w_k^2), \end{aligned} \quad (19)$$

уравнение сохранения баланса массы частиц:

$$\frac{\partial r\rho_k}{\partial t} + \frac{\partial r\rho_k u_k}{\partial x} + \frac{\partial r\rho_k v_k}{\partial r} = -rG, \quad (20)$$

уравнения сохранения импульса частиц:

$$\frac{\partial r\rho_k u_k}{\partial t} + \frac{\partial r\rho_k u_k^2}{\partial x} + \frac{\partial r\rho_k u_k v_k}{\partial r} = r\tau_x - rGu_k, \quad (21)$$

$$\frac{\partial r\rho_k v_k}{\partial t} + \frac{\partial r\rho_k u_k v_k}{\partial x} + \frac{\partial r\rho_k v_k^2}{\partial r} = r\tau_r - rGv_k + \rho w_k^2, \quad (22)$$

$$\frac{\partial r\rho_k w_k}{\partial t} + \frac{\partial r\rho_k w_k u_k}{\partial x} + \frac{\partial r\rho_k w_k v_k}{\partial r} = r\tau_\phi - rGw_k - \rho_k w_k v_k, \quad (23)$$

уравнение сохранения энергии частиц:

$$\begin{aligned} \frac{\partial r\varepsilon_k}{\partial t} + \frac{\partial ru_k \varepsilon_k}{\partial x} + \frac{\partial rv_k \varepsilon_k}{\partial r} = rQG + \\ + r \left[ u_k \tau_x + v_k \tau_r + w_k \tau_\phi + n_k \alpha_k S_k (T_g - T_k) - Gc_k T_k - 0.5G(u_k^2 + v_k^2 + w_k^2) \right], \end{aligned} \quad (24)$$

уравнение сохранения количества частиц:

$$\frac{\partial n_k}{\partial t} + \frac{\partial n_k u_k}{\partial x} + \frac{\partial n_k v_k}{\partial r} = 0, \quad (25)$$

начальные условия:

$$\begin{aligned} u_g(x, r, 0) = v_g(x, r, 0) = w_g(x, r, 0) = u_k(x, r, 0) = v_k(x, r, 0) = w_k(x, r, 0) = 0, \\ n_k(x, r, 0) = \rho_k(x, r, 0) = T_k(x, r, 0) = 0, \quad T_g(x, r, 0) = T_b, \\ \rho_g(x, r, 0) = \rho_{gb}, \quad \rho_{O_2}(x, r, 0) = a_{O_2b} \rho_{gb}, \end{aligned} \quad (26)$$

граничные условия вдоль оси симметрии,  $r = 0$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_g(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial u_k(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial v_g(x, 0, t)}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial v_k(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial w_g(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial w_k(x, 0, t)}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial n_k(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_k(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial T_k(x, 0, t)}{\partial r} = 0, \\ \frac{\partial T_g(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_g(x, 0, t)}{\partial r} = \frac{\partial \rho_{O_2}(x, 0, t)}{\partial r} = 0. \end{aligned} \quad (27)$$

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:

$$\begin{aligned} H_k(0, r, t) = c_k T_{st} + \frac{u_b^2}{2} + \frac{w_g^2(0, r, t)}{2}, \quad H_g(0, r, t) = c_p T_{st} + \frac{u_b^2}{2} + \frac{w_g^2(0, r, t)}{2}, \\ G_g(0, r, t) = u_b \rho_{gb}, \quad G_k(0, r, t) = \Delta_k u_b \rho_{gb}, \\ v_g(0, r, t) = v_k(0, r, t) = 0, \quad w_g(0, r, t) = w_k(0, r, t) = A_z(r/R), \\ n_k = V_k \rho_k^0 / (\Delta_k \rho_{gb}), \quad a_{O_2}(0, r, t) = a_{O_2b}. \end{aligned} \quad (28)$$

На выходе из трубы при  $x = L_x$  задается атмосферное давление.

В уравнениях (14) – (28)  $\varepsilon_g = p_g / (\gamma - 1) + 0.5 \rho_g (u_g^2 + v_g^2 + w_g^2)$  – полная энергия газа,  $\varepsilon_k = c_k T_k \rho_k + 0.5 \rho_k (u_k^2 + v_k^2 + w_k^2)$  – полная энергия частиц,  $\alpha_k = Nu_k \lambda_g / (2r_k)$  – коэффициент теплообмена газа с частицами,  $\gamma = c_p / c_v$  – показатель адиабаты,  $\tau_{x,r,\phi}$  – сила трения вдоль осевого, радиального и тангенциального направления, соответственно,  $\rho$  – плотность,  $u, v, w$  – компоненты вектора скорости вдоль осевого, радиального и тангенциального направлений, соответственно,  $t$  – время,  $r$  – координата по радиусу,  $p$  – давление,  $T$  – температура,  $A_z$  – максимальная скорость закрутки потока,  $\Delta_k$  – объемная доля частиц в общей массе смеси,  $r_k = \sqrt[3]{3\rho_k / (4\pi n_k \rho_k^0)}$  – радиус частицы;  $Q$  – тепловой эффект реакции;  $k_0$  – константа скорости химической реакции;  $\alpha_r = \mu_{O_2} v_{O_2} / \mu_{gl} v_{gl}$  –

коэффициент расхода кислорода в реакции с частицами угольной пыли,  $\mu_{O_2}, \mu_C$  – молярные массы кислорода и углерода;  $\nu_{O_2}, \nu_C$  – стехиометрические коэффициенты реакции;  $a_{O_2}$  – массовая доля окислителя в газе,  $H_{k,g}$  – энтальпия газа и частиц,  $G_{k,g}$  – расход газа и частиц. Индексом  $b$  отмечены начальные значения параметров состояния,  $k$  – параметры частиц,  $g$  – параметры газа,  $st$  – параметры на входе в цилиндрический канал,  $O_2$  – кислород.

Скорость изменения массы частиц при горении вычисляется из уравнения:  $G = n_k S_k \rho_{O_2} \beta_m k_0 e^{-E_a/R_u T_k} / [\beta_m + k_0 e^{-E_a/R_u T_k}]$ , где  $\beta_m = \lambda_g(T_g) Nu_D / (c_g \rho_g r_g)$  – коэффициент массоотдачи частиц. Сила трения вдоль осевого направления определяется из выражения  $\tau_{tr,x} = n_k F_{tr,x}$ , где  $F_{tr,x} = C_{rx} S_m \rho_g (u_g - u_k) |u_g - u_k| / 2$  – сила взаимодействия одиночной частицы с газом,  $C_{rx} = 24(1 + 0.15 Re_x^{0.682}) / Re_x$  – коэффициент трения,  $Re_x = 2 \rho_g r_g |u_g - u_k| / \eta$  – число Рейнольдса,  $S_m$  – площадь миделевого сечения,  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости газа. Компоненты силы трения вдоль радиального и тангенциального направлений определялись аналогичным образом.

Для численного решения задачи был использован метод С. К. Годунова для газа и метод А. Н. Крайко для частиц. Шаги расчетной сетки по пространству задавались равными  $10^{-3}$  м, шаг по времени вычислялся из условия устойчивости Куранта:

$$\frac{1}{\tau} < \frac{1}{\tau_x} + \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_\phi},$$

где  $c_g$  – скорость звука;  $\tau_x = \frac{h_x}{\max(|u_g| + c_g)}$ ,  $\tau_r = \frac{h_r}{\max(|v_g| + c_g)}$ ,  $\tau_\phi = \frac{h_\phi}{\max(|w_g| + c_g)}$ ;  $h_x, h_r,$

$h_\phi$  – шаги расчетной сетки по пространству.

Проверка программы на достоверность осуществлялась путем проверки выполнимости законов сохранения массы и энергии. Погрешность расчета по модели составила не более 0.03 процента.

**В главе 3** представлены результаты численного исследования задачи горения полидисперсной угле-метано-воздушной смеси в горелке с рекуперацией тепла.

Угольная пыль в общем случае представляет собой смесь фракций инертных и реагирующих частиц. Инертные частицы не способны к химическим реакциям и играют роль теплового балласта. Скорость горения реагирующих частиц определяется их размером и массовой концентрацией. В общем случае устойчивость горения взвеси угольной пыли будет определяться распределением частиц по фракциям и размером

частиц каждой фракции. В связи с этим была поставлена задача, определить влияние дисперсности частиц на устойчивость горения взвеси угольной пыли в метано-воздушной смеси в горелке с рекуперацией тепла.

Расчеты были направлены на определение того, как инертные частицы влияют на устойчивость горения угле-метано-воздушных смесей в зависимости от содержания метана в газе и массовой концентрации частиц угольной пыли в смеси. Результаты расчета приведены на рисунках 2 – 3. На рисунках представлена зависимость скорости горения смеси от размера частиц угольной пыли, при этом полагается, что смесь является бикомпонентной: состоит из инертных и реагирующих частиц.

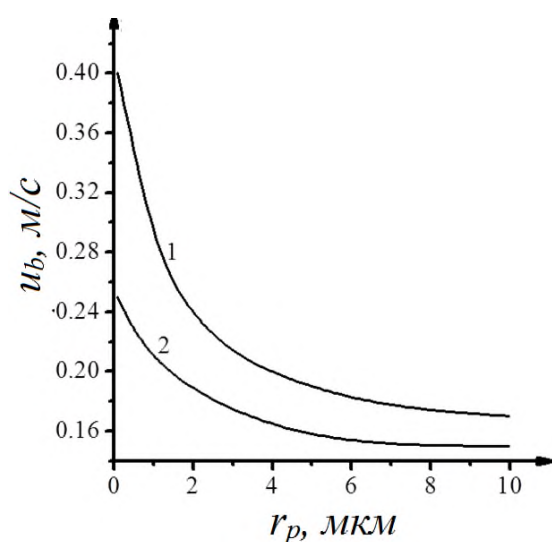


Рисунок 2. Граница устойчивого режима горения угле-метано-воздушной смеси.

Кривые: 1 – монодисперсная взвесь реагирующих частиц, 2 – бикомпонентная взвесь реагирующих и инертных (30% от общей массы) частиц.  $m_{dust} = 0.054 \text{ кг} / \text{м}^3$ ,

$$a_{vol} = 2 \%$$

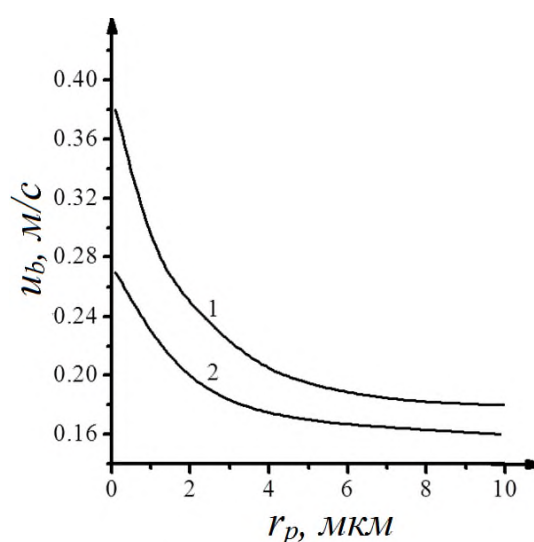


Рисунок 3 – Граница устойчивого режима горения угле-метано-воздушной смеси.

Кривые: 1 – монодисперсная взвесь реагирующих частиц, 2 – бикомпонентная взвесь реагирующих и инертных (30% от общей массы) частиц.  $m_{dust} = 0.04 \text{ кг} / \text{м}^3$ ,

$$a_{vol} = 3 \%$$

Согласно рисунку 2 для мелкодисперсной фракции угольной пыли присутствие инертных частиц влияет на устойчивость горения УВМС сильнее, чем для крупнодисперсной фракции. Присутствие инертных частиц в смеси с размером частиц менее 1 мкм приводит к уменьшению предельной скорости подачи смеси, при которой возможно устойчивое горение УВМС, в 1.4 ÷ 1.6 раз. Чем больше инертных частиц в смеси, тем сильнее уменьшается скорость подачи, при которой возможно устойчивое горение УВМС. С увеличением размера частиц количество инертных частиц меньше

влияет на устойчивость горения. Для частиц размером  $r_p = 10^{-5}$  м предельная скорость подачи изменяется от 0.19 м/с для смеси без инертных частиц до 0.15 м/с для смеси с 30 % инертных частиц. При увеличении размера частиц граница области устойчивого горения в заданном диапазоне радиусов частиц практически не изменяется. При разбавлении инертными частицами граница области устойчивого горения смеси с  $m_{dust} = 0.04$  кг/м<sup>3</sup> и  $a_{vol} = 3$  % смещается не так сильно, как это было в случае смеси  $m_{dust} = 0.054$  кг/м<sup>3</sup> и  $a_{vol} = 2$  %. При разбавлении взвеси инертными частицами область устойчивого горения смеси с  $a_{vol} = 3$  % шире области устойчивого горения смеси с  $a_{vol} = 2$  %. Таким образом, присутствие инертных частиц во взвеси угольной пыли в бедной метано-воздушной смеси влияет тем сильнее на устойчивость горения, чем меньше объемное содержание метана в смеси.

Далее было выполнено численное исследование задачи горения полидисперсной взвеси угольной пыли в метано-воздушной смеси. Для расчета взята полидисперсная взвесь угольной пыли с общей массовой концентрацией  $0.02 \div 0.05$  кг/м<sup>3</sup>. Была выбрана полидисперсная взвесь угольной пыли с размером частиц  $r_{p,1} = 0.65 \cdot 10^{-6}$  м,  $r_{p,2} = 1.3 \cdot 10^{-6}$  м,  $r_{p,3} = 2 \cdot 10^{-6}$  м,  $r_{p,4} = 3 \cdot 10^{-6}$  м. Использовалось следующее распределение масс фракций частиц по размерам:  $\rho_{p,1} = 0.4 m_{dust}$ ,  $\rho_{p,2} = 0.3 m_{dust}$ ,  $\rho_{p,3} = 0.2 m_{dust}$ ,  $\rho_{p,4} = 0.1 m_{dust}$ . Результаты расчета представлены на рисунках 4 – 5.

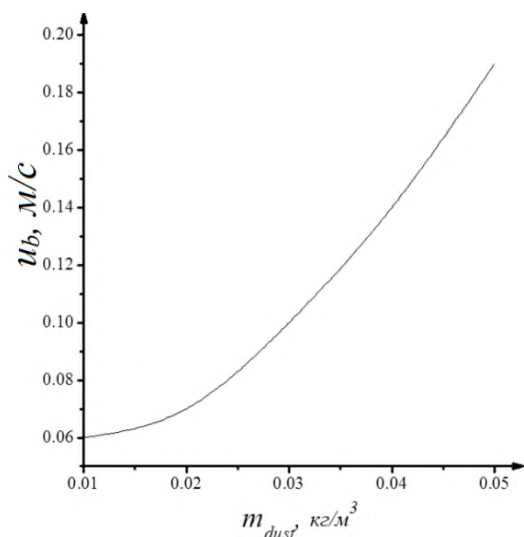


Рисунок 4. Граница устойчивого горения полидисперсной взвеси угольной пыли в метано-воздушной смеси.

$r_{p,1} = 0.65 \cdot 10^{-6}$  м,  $r_{p,2} = 1.3 \cdot 10^{-6}$  м,  $r_{p,3} = 2 \cdot 10^{-6}$  м,  $r_{p,4} = 3 \cdot 10^{-6}$  м;  $a_{vol, CH_4} = 1\%$

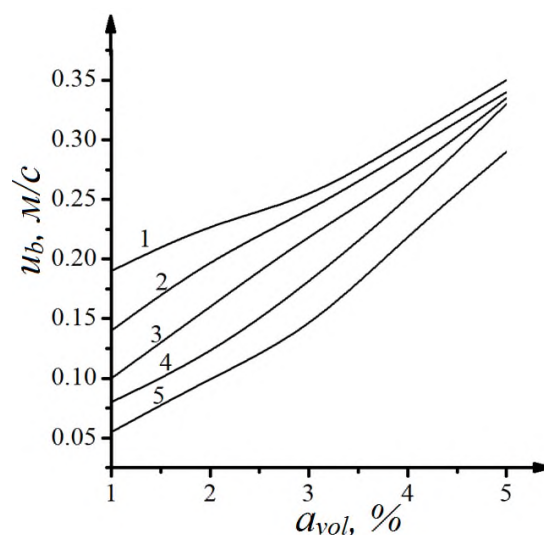


Рисунок 5. Граница устойчивого горения полидисперсной взвеси угольной пыли в метано-воздушной смеси.  $m_{dust} = 1 -$

$0.05$  кг/м<sup>3</sup>, 2 –  $0.04$  кг/м<sup>3</sup>, 3 –  $0.03$  кг/м<sup>3</sup>, 4 –  $0.02$  кг/м<sup>3</sup>, 5 –  $0.01$  кг/м<sup>3</sup>

Согласно рисунку 4 увеличение массовой концентрации угольной пыли приводит к увеличению предельной скорости подачи смеси на входе в горелку, при которой возможно установление устойчивого горения смеси в горелке с рекуперацией тепла. Согласно рисунку 5 скорость горения смеси с общей массовой концентрацией частиц от  $0.02 \text{ кг/м}^3$  до  $0.05 \text{ кг/м}^3$  с увеличением объемного содержания метана в газе до 5 % и больше практически прекращает зависеть от массовой концентрации частиц. Скорость горения становится близкой к скорости горения метано-воздушной смеси, не содержащей примесь частиц угольной пыли.

Из полученных результатов следует, что угле-метано-воздушная смесь способна гореть даже при составе  $a_{vol,CH_4} = 1\%$  и  $m_{dust} = 0.01 \text{ кг/м}^3$ . При этом в расчетах был получен следующий результат. Бедная смесь ( $a_{vol,CH_4} = 1\%$ ,  $m_{dust} = 0.01 \text{ кг/м}^3$ ) горит устойчиво при малой скорости подачи смеси на входе. При этом температура на фронте остается порядка  $1100 \div 1300 \text{ K}$ . Кислород при таком составе смеси полностью не выгорает. Таким образом, реализуется режим устойчивого низкотемпературного горения.

**В четвертой главе** представлены результаты численного исследования задачи горения газозвеси угольной пыли при закрутке потока в цилиндрическом канале и в канале с внезапным расширением. 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, а также повышения эффективности работы устройств по сжиганию топлив. 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 или уравнения Навье-Стокса, 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 газозвеси угольной пыли в трубе.

Схема цилиндрического канала с расширением приведена на рисунке 6. На рисунке введены обозначения:  $R$  – радиус выходного канала,  $r$  – радиус входного канала,  $l$  – протяженность входного канала,  $L$  – общая протяженность цилиндрического канала. Стрелками изображено направление подачи газозвеси в цилиндрический канал.

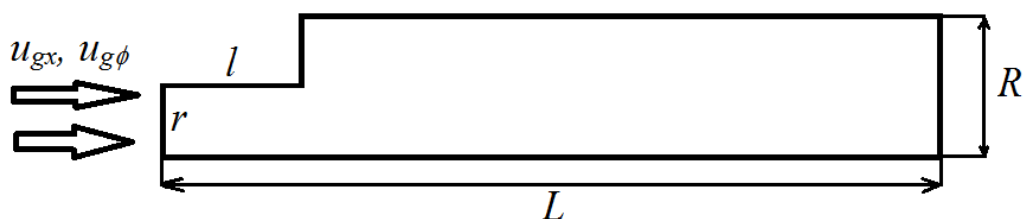


Рисунок 6. Схема цилиндрического канала.

Задача горения аэровзвеси угольной пыли в цилиндрическом канале при закрутке потока решалась с целью определения влияния закрутки потока на характер перемещения фронта горения в аэровзвеси угольной пыли и на степень догорания частиц. В расчетах варьировался размер, массовая концентрация частиц, а также величина  $A_z$ , характеризующая закрутку потока на входе в трубу.

Результаты решения задачи представлены на рисунках 7 – 10. На рис. 7 – 10 представлен начальный этап развития горения в случае незакрученного потока (рис. 7) и потока с закруткой по закону  $u_\phi(0, r, t) = A_z(r/R)$ , где  $R$  – радиус цилиндрического канала,  $A_z$  – максимальная скорость вдоль угловой составляющей потока. Расчеты выполнены для газозвеси с осевой скоростью подачи  $u_{xb} = 2$  м/с, массовой концентрацией частиц, подаваемых в трубку, 5 % от массы подаваемого газа,  $\rho_{kb} = 0.05 \rho_g$ , и радиусом частиц  $r_k = 10^{-6}$  м/с. Частицы с заданным радиусом перемещаются вместе с газом, отставание частиц мало.

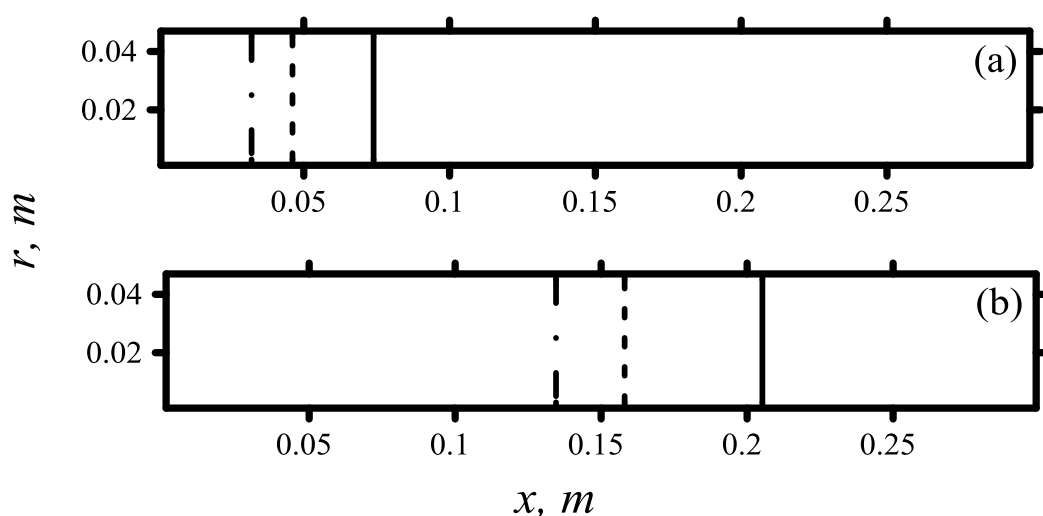


Рисунок 7. Распределения температуры частиц по пространству в моменты времени  $t = 0.005$  с (а),  $0.015$  с (б); изолинии:  $T_k = 300$  K (сплошная линия),  $700$  K (пунктирная линия),  $1500$  K (штрихпунктирная линия);  $r_k = 10^{-6}$  м,  $A_z = 0$  м/с,  $u_{xb} = 2$  м/с,  $\rho_{kb} = 0.05 \rho_{gb}$



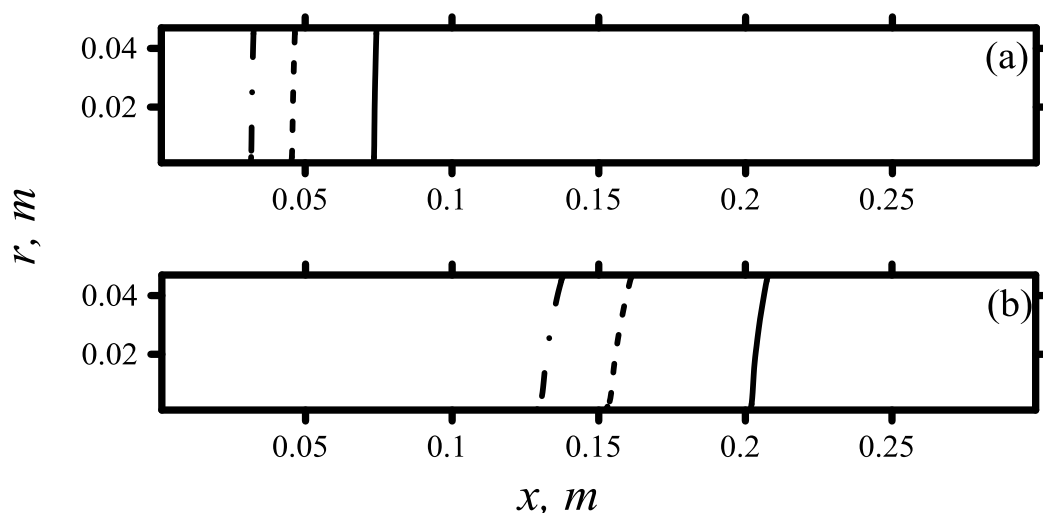


Рисунок 8. Распределения температуры частиц по пространству в моменты времени  $t = 0.005$  с (а),  $0.015$  с (б); изолинии:  $T_k = 300$  К (сплошная линия),  $700$  К (пунктирная линия),  $1500$  К (штрихпунктирная линия);  $r_k = 10^{-6}$  м,  $A_z = 1$  м/с,  $u_{xb} = 2$  м/с,  $\rho_{kb} = 0.05 \rho_{gb}$

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 9, изолинии массовой концентрации частиц по каналу в момент времени  $t = 0.015$  с имеют вид, представленный на рис. 10. Согласно рисунку 10 в канале возникает область недогоревших частиц, расположенная в окрестностях входа в канал и вблизи внешней стенки.

Согласно рисунку 7, 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 8 – 9. На рисунках 8 и 9 максимальная скорость закрутки на входе в канал равна  $1$  и  $10$  м/с соответственно. Присутствие закрутки потока приводит к изгибу фронта горения (рисунок 8), с последующим увеличением угловой составляющей скорости газа на левом торце трубки фронт горения «прижимается» к боковой поверхности трубки. Имеет место существенная неоднородность устанавливающегося поля температуры.

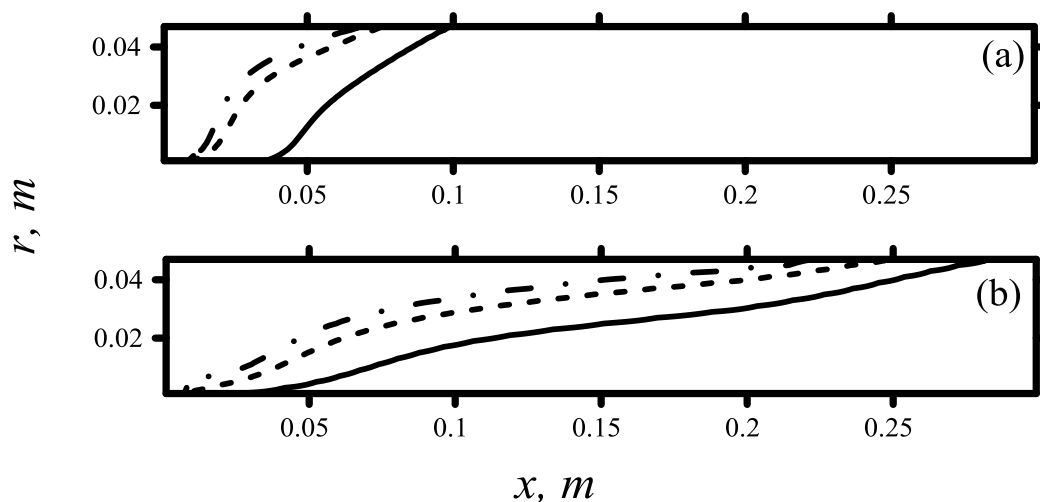


Рисунок 8. Распределения температуры частиц по пространству в моменты времени  $t = 0.005$  с (а),  $0.015$  с (б); изолинии:  $T_k = 300$  К (сплошная линия),  $700$  К (пунктирная линия),  $1500$  К (штрихпунктирная линия);  $r_k = 10^{-6}$  м,  $A_z = 10$  м/с,  $u_{xb} = 2$  м/с,  $\rho_{kb} = 0.05 \rho_{gb}$

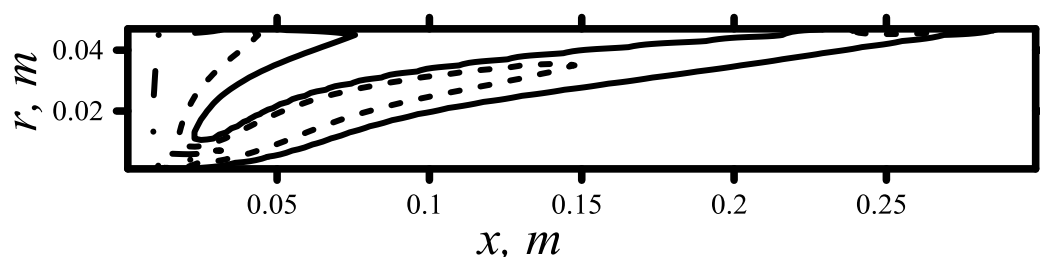


Рисунок 9. Распределения массовой концентрации частиц по пространству в момент времени  $t = 0.015$  с; изолинии:  $\rho_k = 1.5 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup> (штрихпунктирная линия),  $0.5 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup> (пунктирная линия),  $0.1 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup> (сплошная линия);  $r_k = 10^{-6}$  м,  $A_z = 10$  м/с,  $u_{xb} = 2$  м/с,  $\rho_{kb} = 0.05 \rho_{gb}$

Закрутка потока приводит к тому, что установившийся режим горения может отличаться температурной неоднородностью. Из расчетов было получено, что при относительно малых скоростях закрутки ( $A_z = 0.5$  м/с) установившееся распределение температуры практически однородно по пространству трубы. При больших скоростях закрутки после установления режима горения профили температуры газа и массовой концентрации частиц имеют вид, представленный на рисунках 11 – 12.

Согласно рисункам 11 – 12 после установления в области стенки трубы возникает зона несгоревших частиц, на оси симметрии частиц нет. Максимальная температура газа устанавливается на отдалении от входа и стенки трубы. На выходе из трубы несгоревших частиц нет. Таким образом, догорание частиц реализуется в выходной области трубы.

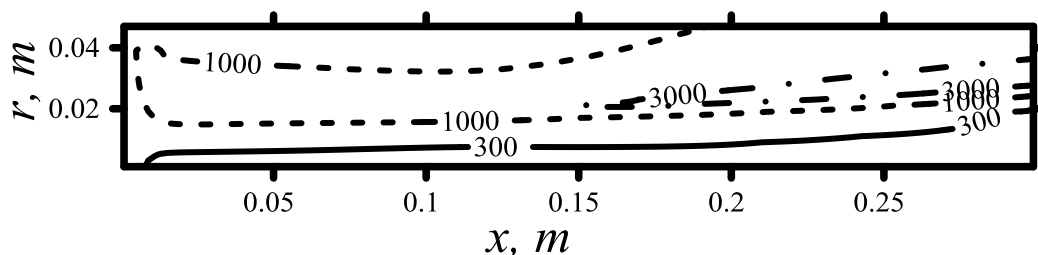


Рисунок 11. Распределения температуры частиц по пространству в момент времени  $t = 0.1$  с; изолинии:  $T_k = 300$  К (сплошная линия), 1000 К (пунктирная линия), 3000 К (штрихпунктирная линия);  $r_k = 10^{-6}$  м,  $A_z = 10$  м/с,  $u_{xb} = 2$  м/с,  $\rho_{kb} = 0.05 \rho_{gb}$

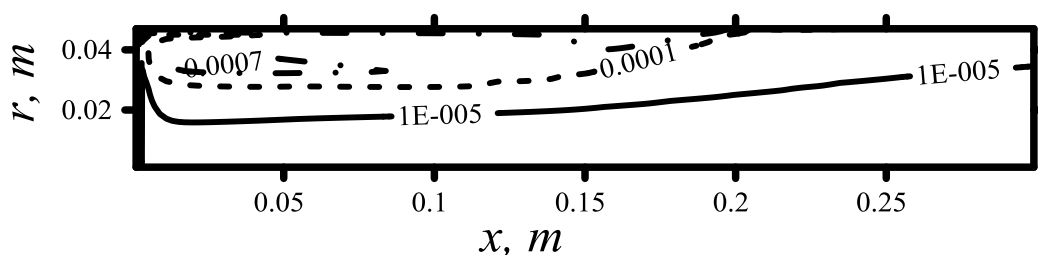


Рисунок 12. Распределения массовой концентрации частиц по пространству в момент времени  $t = 0.1$  с; изолинии:  $\rho_k = 10^{-5}$  кг/м<sup>3</sup> (сплошная линия),  $10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup> (пунктирная линия),  $7 \cdot 10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup> (штрихпунктирная линия);  $r_k = 10^{-6}$  м,  $A_z = 10$  м/с,  $u_{xb} = 2$  м/с,  $\rho_{kb} = 0.05 \rho_{gb}$

Расчеты для более крупных частиц показали, что в силу большей инерционности крупные частицы начинают отставать от газа сильнее. Эффект закрутки потока при этом проявляется слабее, так как крупные частицы меньше увлекаются вихрем. Соответственно, большое значение закрутка потока имеет в случае горения мелкодисперсной взвеси угольной пыли.

Далее, была решена задача о горении газозвеси угольной пыли в цилиндрическом канале с внезапным расширением (рисунок 6). Задача решалась в осесимметричной двухмерной постановке с учетом присутствия угловой составляющей скорости потока. Полагалось, что зажигание газозвеси происходит за счет постоянно действующего источника  $Q$  тепла, расположенного внутри канала. Результаты решения задачи показаны на рисунках 13 – 14. Выполнен расчет особенностей сгорания газозвеси угольной пыли, подаваемой через канал с массовой скоростью  $7.5 \cdot 10^{-7}$  кг/с. В качестве примера выбраны частицы радиуса 10 мкм и 50 мкм, величина  $A_z$  (коэффициента в законе для скорости закрутки потока на входе в канал) взята равной 6 м/с и 120 м/с. На рисунке 13 показано

распределение массовой концентрации частиц в канале после установления потока, на рисунке 14 представлено распределение температуры газа.

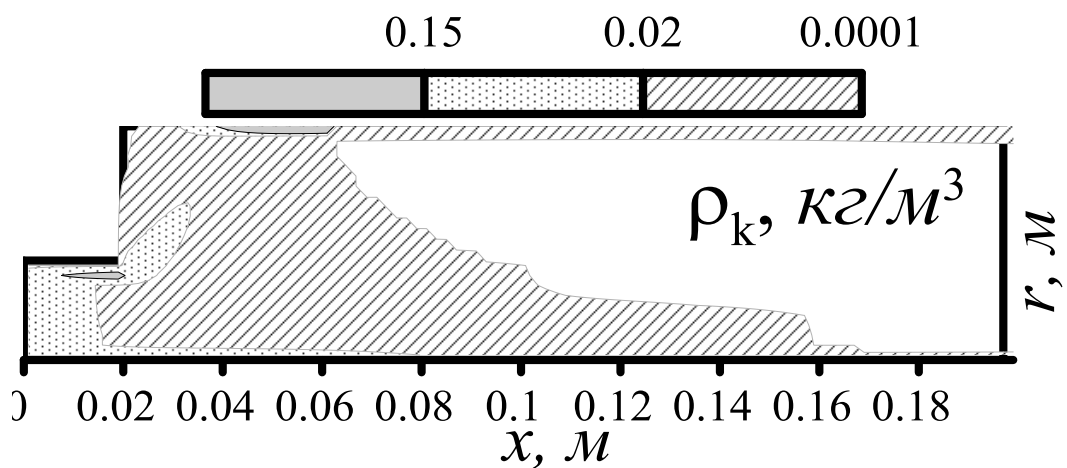
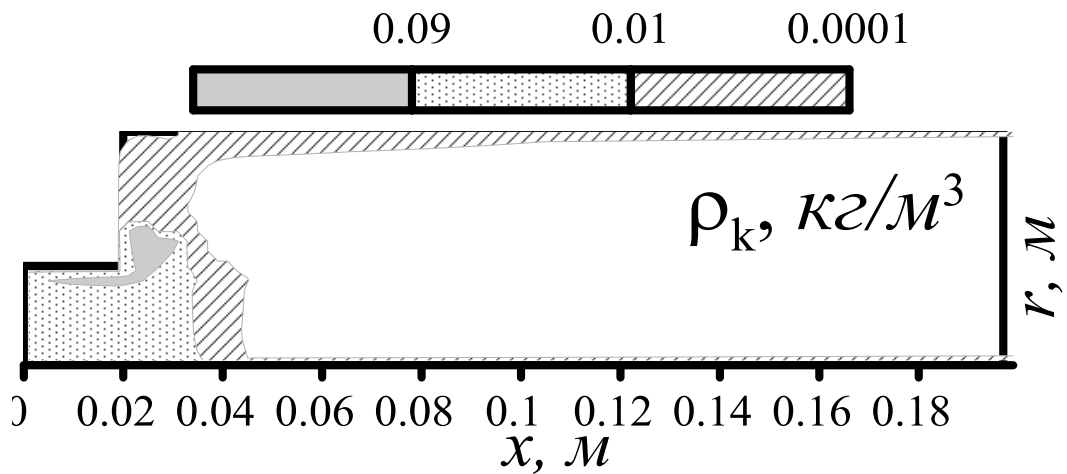
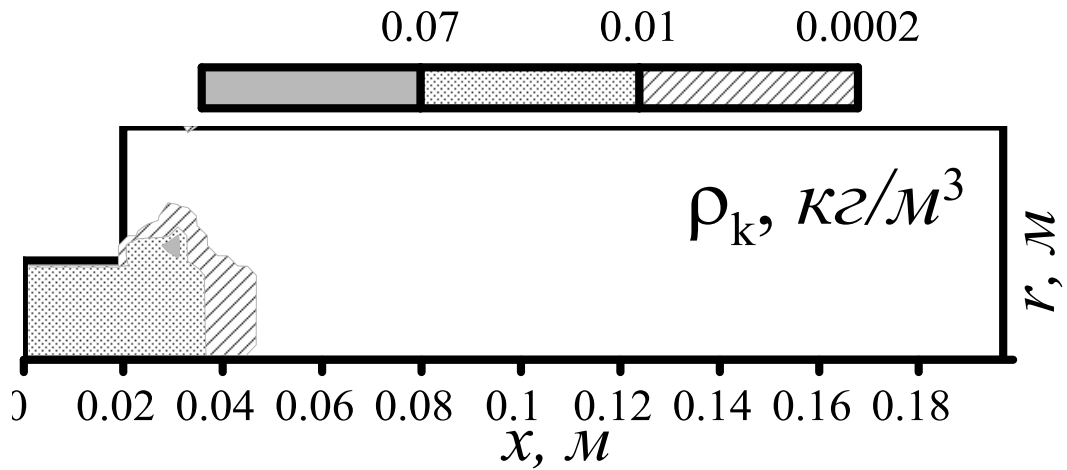
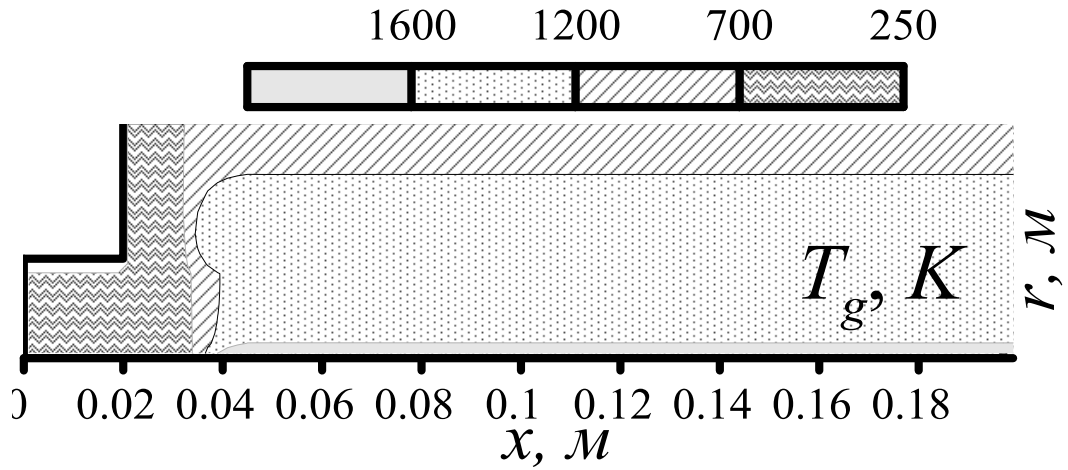
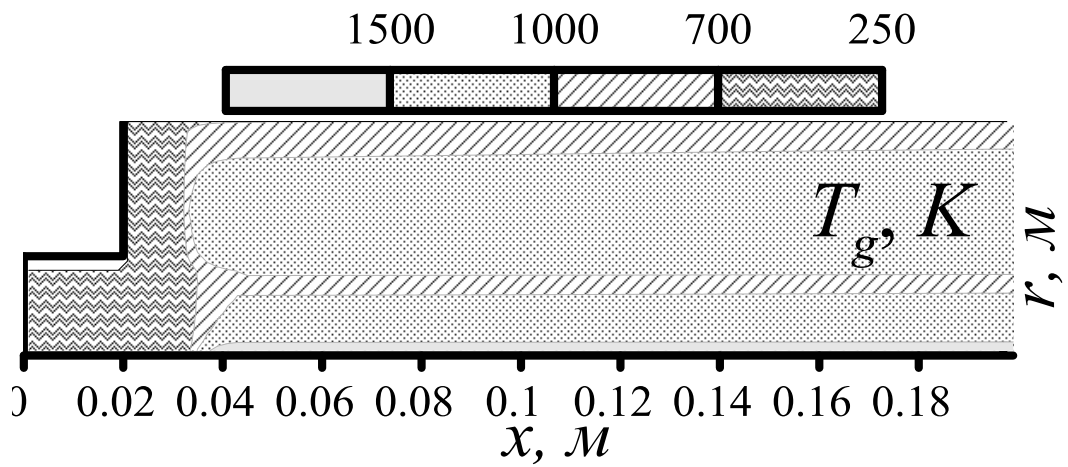


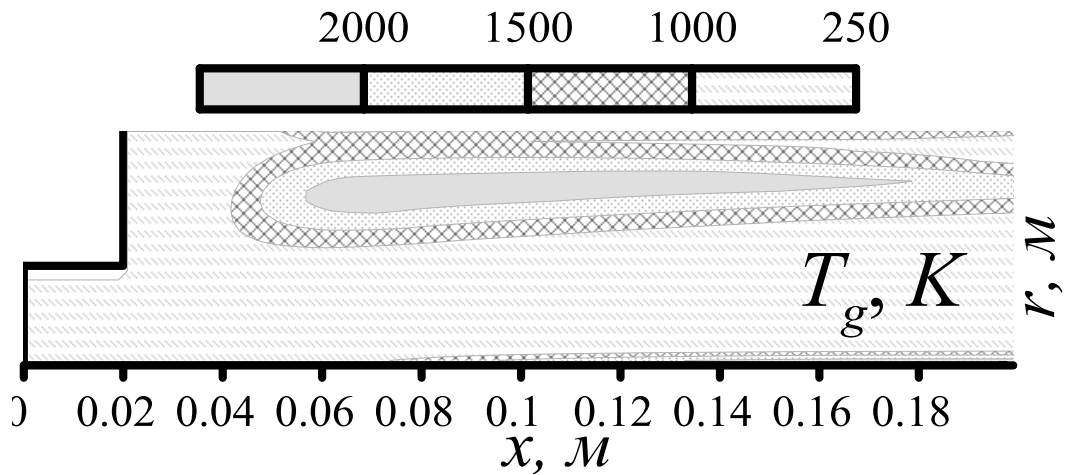
Рисунок 13. Распределение массовой концентрации частиц угольной пыли в цилиндрическом канале. (а) –  $r_k = 10^{-5}$  м,  $A_z = 6$  м/с; (б) –  $r_k = 10^{-5}$  м,  $A_z = 120$  м/с, (в) –  $r_k = 5 \cdot 10^{-5}$  м,  $A_z = 120$  м/с



(a)



(б)



(в)

Рисунок 14. Температуры газа в цилиндрическом канале. (а) –  $r_k = 10^{-5} \text{ м}$ ,  $A_z = 6 \text{ м/с}$ ; (б) –  $r_k = 10^{-5} \text{ м}$ ,  $A_z = 120 \text{ м/с}$ , (в) –  $r_k = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ ,  $A_z = 120 \text{ м/с}$

Согласно рисункам 13 – 14 при больших скоростях закрутки частицы «затягивает» за поворот канала. При этом для крупных частиц формируется зона повышенной

температуры, соответствующая фронту горения и расположенная вблизи стенок расширенной части канала. При высоких скоростях закрутки в окрестности стенок канала могут формироваться зоны с несгоревшими частицами угольной пыли. Это, в свою очередь, может негативным образом сказаться на характеристиках работы энергетического устройства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнено численное исследование режимов горения газозвеси угольной пыли в воздухе и метано-воздушной смеси в U – образной рекуперативной горелке. Определены диапазоны значений параметров течения реакционной смеси, для которых в зависимости от состава смеси реализуется устойчивое горение газозвеси угольной пыли.

2. Выполнено численное исследование задачи горения газозвеси угольной пыли в цилиндрическом канале при закрутке потока на входе в канал. Определено влияние параметров закрутки потока на степень догорания газозвеси.

3. Выполнено численное исследование задачи горения газозвеси угольной пыли в цилиндрическом канале с внезапным расширением при закрутке потока на входе в канал. Определено влияние параметров смеси и скорости закрутки потока на форму и местоположение фронта горения газозвеси угольной пыли.

### **Список трудов по теме диссертационного исследования:**

*Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:*

1. Моисеева К. М. Устойчивость горения полидисперсной угле-метано-воздушной смеси в горелке с рекуперацией тепла / К. М. Моисеева, А. Ю. Крайнов, **Д. М. Моисеев** // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2017. – № 48. – С. 82-90.

*Статьи в трудах конференций, индексируемых Scopus:*

2. A Yu Krainov, K M Moiseeva and D M Moiseev, Numerical investigation on burning stability of the coal-dust methane-air mixture in a recuperative burner// IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 891 (2017) 012228 (doi:10.1088/1742-6596/891/1/012228)

*Публикации в материалах международных конференций:*

3. Крайнов А. Ю. Численное исследование устойчивости горения бидисперсной звеси угольной пыли в метано-воздушной смеси в горелке с рекуперацией тепла / А. Ю. Крайнов, К. М. Моисеева, Д. М. Моисеев // Материалы Международной конференции

«Современные проблемы теплофизики и энергетики»: в 2 т. Т. 2. Москва, 9 – 11 октября 2017 г. – М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – С.102 – 103.

Отчеты НИР:

4. Моисеева К.М. Разработка методов эффективного сжигания бедных метано-воздушных смесей в горелочных устройствах / Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Порязов В. А., Моисеев Д. М., Никитин П. Ю. // Отчет о НИР. Рук. К.М. Моисеева. – Томск: ТГУ, 2016. 68 с. – № госрегистрации АААА-Б16-216021840196-4.

5. Моисеева К.М., Крайнов Д. А., Моисеев Д. М.Ю, Никитин П. Ю. Интенсификация горения бедных метано-воздушных смесей при добавлении частиц угольной пыли// Отчет о НИР. Рук. К.М. Моисеева. – Томск: ТГУ, 2018. 46 с. – № госрегистрации АААА-Б18-218071290028-2.

# Отчет о проверке на заимствования №1



Автор: [dmytrymoiseev@yandex.ru](mailto:dmytrymoiseev@yandex.ru) / ID: 8070921  
 Проверяющий: ([dmytrymoiseev@yandex.ru](mailto:dmytrymoiseev@yandex.ru) / ID: 8070921)  
 Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат» - <https://users.antiplagiat.ru>

## ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 1  
 Начало загрузки: 07.06.2020 11:33:45  
 Длительность загрузки: 00:00:08  
 Имя исходного файла: ВКР.pdf  
 Название документа: ВКР  
 Размер текста: 1 кБ  
 Символов в тексте: 37692  
 Слов в тексте: 5317  
 Число предложений: 266

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Последний готовый отчет (ред.)  
 Начало проверки: 07.06.2020 11:33:54  
 Длительность проверки: 00:00:03  
 Комментарий: не указано  
 Поиск перефразирований: да  
 Модули поиска: Цитирование, Модуль поиска Интернет



ЗАИМСТВОВАНИЯ  
15,07%

САМОЦИТИРОВАНИЯ  
0%

ЦИТИРОВАНИЯ  
0,49%

ОРИГИНАЛЬНОСТЬ  
84,44%

Заимствования — доля всех найденных текстовых пересечений, за исключением тех, которые система отнесла к цитированиям, по отношению к общему объему документа.  
 Самоцитирования — доля фрагментов текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника, автором или соавтором которого является автор проверяемого документа, по отношению к общему объему документа.  
 Цитирования — доля текстовых пересечений, которые не являются авторскими, но система посчитала их использование корректным, по отношению к общему объему документа. Сюда относятся оформленные по ГОСТу цитаты; общеупотребительные выражения; фрагменты текста, найденные в источниках из коллекций нормативно-правовой документации.  
 Текстовое пересечение — фрагмент текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника.  
 Источник — документ, проиндексированный в системе и содержащийся в модуле поиска, по которому проводится проверка.  
 Оригинальность — доля фрагментов текста проверяемого документа, не обнаруженных ни в одном источнике, по которым шла проверка, по отношению к общему объему документа.  
 Заимствования, самоцитирования, цитирования и оригинальность являются отдельными показателями и в сумме дают 100%, что соответствует всему тексту проверяемого документа.  
 Обращаем Ваше внимание, что система находит текстовые пересечения проверяемого документа с проиндексированными в системе текстовыми источниками. При этом система является вспомогательным инструментом, определение корректности и правомерности заимствований или цитирований, а также авторства текстовых фрагментов проверяемого документа остается в компетенции проверяющего.

№	Доля в отчете	Источник	Ссылка	Актуален на	Модуль поиска
[01]	1,98%	Combustion of the coal-methane-air mixture in the heat recovery burner.pdf	<a href="http://journals.tsu.ru">http://journals.tsu.ru</a>	23 Ноя 2016	Модуль поиска Интернет
[02]	0%	Скачать полнотекстовую версию	<a href="http://journals.tsu.ru">http://journals.tsu.ru</a>	26 Ноя 2016	Модуль поиска Интернет
[03]	0%	vestmim_3_41_beta.pdf	<a href="http://journals.tsu.ru">http://journals.tsu.ru</a>	26 Ноя 2016	Модуль поиска Интернет
[04]	0,77%	<a href="http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vtis:000617603/SOURCE1">http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vtis:000617603/SOURCE1</a>	<a href="http://vital.lib.tsu.ru">http://vital.lib.tsu.ru</a>	18 Ноя 2019	Модуль поиска Интернет
[05]	3,06%	<a href="http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vtis:000660010/SOURCE1">http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vtis:000660010/SOURCE1</a>	<a href="http://vital.lib.tsu.ru">http://vital.lib.tsu.ru</a>	18 Ноя 2019	Модуль поиска Интернет
[06]	0%	Горение угле-метановоздушной смеси в горелке с рекуперацией тепла	<a href="https://cyberleninka.ru">https://cyberleninka.ru</a>	05 Мая 2020	Модуль поиска Интернет
[07]	2,48%	vestmim_4_48_09.pdf	<a href="http://journals.tsu.ru">http://journals.tsu.ru</a>	17 Ноя 2017	Модуль поиска Интернет
[08]	1,67%	<a href="http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vital:10546/SOURCE01">http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vital:10546/SOURCE01</a>	<a href="http://vital.lib.tsu.ru">http://vital.lib.tsu.ru</a>	24 Янв 2020	Модуль поиска Интернет
[09]	0%	Горение угле-метановоздушной смеси в горелке с рекуперацией тепла   Вестн Том	<a href="http://journals.tsu.ru">http://journals.tsu.ru</a>	23 Ноя 2016	Модуль поиска Интернет
[10]	1,38%	pdf	<a href="http://crmlib.org.ru">http://crmlib.org.ru</a>	07 Авг 2018	Модуль поиска Интернет
[11]	1,39%	Взаимодействие нанообъектов на основе углерода с компонентами природного г...	<a href="http://ams.tsu.ru">http://ams.tsu.ru</a>	06 Ноя 2018	Модуль поиска Интернет
[12]	0%	<a href="http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vital:9733/SOURCE01">http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vital:9733/SOURCE01</a>	<a href="http://vital.lib.tsu.ru">http://vital.lib.tsu.ru</a>	24 Янв 2020	Модуль поиска Интернет
[13]	0%	Автореферат диссертации	<a href="http://nigsu.ru">http://nigsu.ru</a>	25 Июл 2018	Модуль поиска Интернет
[14]	0,56%	Топочные процессы и топочные устройства - Отечественная библиография 1970-2...	<a href="http://prometeus.nsc.ru">http://prometeus.nsc.ru</a>	07 Мая 2020	Модуль поиска Интернет
[15]	0,6%	Влияние скорости подачи газа на устойчивость горения метановоздушной смеси в...	<a href="http://journals.tsu.ru">http://journals.tsu.ru</a>	23 Ноя 2016	Модуль поиска Интернет
[16]	0,51%	<a href="https://esu.citis.ru/dissertation/NXNLFCEMTCPIUSWMRUJDVQ">https://esu.citis.ru/dissertation/NXNLFCEMTCPIUSWMRUJDVQ</a>	<a href="https://esu.citis.ru">https://esu.citis.ru</a>	21 Мар 2018	Модуль поиска Интернет
[17]	0%	Выпуск №3(2009)	<a href="http://new.nigsu.ru">http://new.nigsu.ru</a>	21 Ноя 2016	Модуль поиска Интернет
[18]	0%	Шаблоны титульных листов ВКР	<a href="http://tsu.ru">http://tsu.ru</a>	04 Мая 2020	Модуль поиска Интернет



[19]	0,49%	не указано	не указано	раньше 2011	Цитирование
[20]	0,39%	<a href="http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/MIS:000621843/SOURCE1">http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/MIS:000621843/SOURCE1</a>	<a href="http://vital.lib.tsu.ru">http://vital.lib.tsu.ru</a>	18 Ноя 2019	Модуль поиска Интернет
[21]	0,28%	<a href="https://esu.citis.ru/dissertation/JF02GLJSGPIK1EEQUOJ3T7">https://esu.citis.ru/dissertation/JF02GLJSGPIK1EEQUOJ3T7</a>	<a href="https://esu.citis.ru">https://esu.citis.ru</a>	21 Мар 2018	Модуль поиска Интернет

Монк / Монков Д.М.

АФ Крайнов А.Ю.

Федер Шеремет Д.В.