

В.В. Даничев, М.Н. Загуменный, Л.П. Смирнов

Российский научный центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЖИГАНИЯ МЕТАНА В ВИХРЕВОЙ ГОРЕЛКЕ

АННОТАЦИЯ

Моделируется процесс сжигания природного газа в промышленной 300 кВт горелке с помощью CFD подхода. Для расчета использовалась программа GIDR-3M. Оценка правильности расчетов производится сравнением по некоторым параметрам с экспериментальными данными, полученными в Burner Engineering Research Laboratory и опубликованными в [1].

1. ВВЕДЕНИЕ

Численное моделирование позволяет исследовать процесс горения с учетом влияния множества факторов, а также помогает при проектировании промышленных горелок с требуемыми характеристиками.

В данной работе рассматривается вертикально расположенная горелка с осесимметричной геометрией, на вход которой подается закрученный поток воздуха, поэтому для учета вихревого течения расчет выполнен на трехмерной сетке. В процессе расчета отслеживаются массовые фракции CH_4 , H_2O , O_2 , CO_2 , N_2 , решаются четыре транспортных уравнения и задается уравнение — сумма массовых долей равняется единице. В численных исследованиях использовались: стандартная k - ε -модель турбулентности, модель горения Магнуссена и методика расчета радиационного теплового потока по модели Роззеленда.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МОДЕЛИ

2.1. Методика расчета лучистых тепловых потоков дифференциальным методом Роззеленда

В случае «серой» среды плотность потока излучения q_r может быть вычислена следующим образом [2]: $q_r = (16\sigma\Gamma T^3)\nabla T$,

$$\text{где } \Gamma = \frac{1}{3(\gamma + \sigma_s)},$$

γ — коэффициент поглощения,

σ_s — коэффициент рассеяния излучения.

Или в дискретном виде:

$$q_{rj} = (16\sigma\Gamma T_{ij}^3)(T_j - T_i)/s_{ij}, \quad \gamma = -\ln(1 - \varepsilon_{ij})/s_{ij},$$

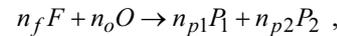
где s_{ij} — расстояние между узлами; ε_{ij} — степень черноты j -й поверхности i -го контрольного объема. Степень черноты газовой смеси, определялась на основе графических зависимостей для насыщенных

слоев углекислого газа и водяного пара, представленных в [2]: $\varepsilon = 0.3(m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}})$

T_{ij} — средняя температура j -й поверхности i -го контрольного объема.

2.2. Турбулентная модель горения газов (Магнуссена—Хартъегера)

Реакция горения:



где F , O , P_1 и P_2 обозначают соответственно топливо, окислитель, продукты реакции; n_i — число молекул i -го вещества.

В случае сгорания метана реакция запишется в виде: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

$$n_f = 1, \quad n_o = 2, \quad n_{p1} = 1, \quad n_{p2} = 2.$$

Скорость образования i -го вещества определяется скоростью турбулентного смешения:

$$R_i = -4\rho \frac{\varepsilon}{k} M_i n_i \min \left[\frac{C_f}{n_f M_f}, \frac{C_o}{n_o M_o}, 0.5 \frac{C_\Sigma}{\sum n_{pj} M_{pj}} \right],$$

где M_i , C_i — молекулярный вес и массовая концентрация i -го вещества, $C_\Sigma = C_{P1} + C_{P2}$.

$S_i = M_i n_i / M_f n_f$ — массовый стехиометрический коэффициент i -го вещества.

Модель горения включает транспортное уравнение для каждого вещества и уравнение энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho C_i + \text{div}(\rho \vec{U} C_i) - \text{div} \left(\left(\rho D_{cp} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \text{grad} C_i \right) = R_i,$$

где $Sc_t = 0.7$ — турбулентное число Шмидта.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho H + \text{div}(\rho \vec{U} H) - \text{div}(\Gamma_T \nabla H) = -R_f \Delta H_{Rf} + \nabla q_r,$$

где $\Gamma_T = \left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right)$, ΔH_{Rf} — теплота сгорания

топлива. По умолчанию $Pr_t = 0.9$.

Описание k - ε -модели турбулентности можно найти в работе [3].

3. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ГОРЕЛКИ

Промышленная 300 кВт вихревая горелка представляет собой тело вращения, образованное коническими и цилиндрическими поверхностями. Топливо CH_4 поступает в радиальном направлении

относительно оси горелки через 24 отверстия симметрично расположенные на внутренней поверхности концентрической трубки. Предварительно закрученный поток воздуха поступает на входное отверстие с торца концентрической трубки. Размеры горелки отображены на рис. 1. Более подробную информацию о геометрии входного сопла горелки можно найти в работе [1].

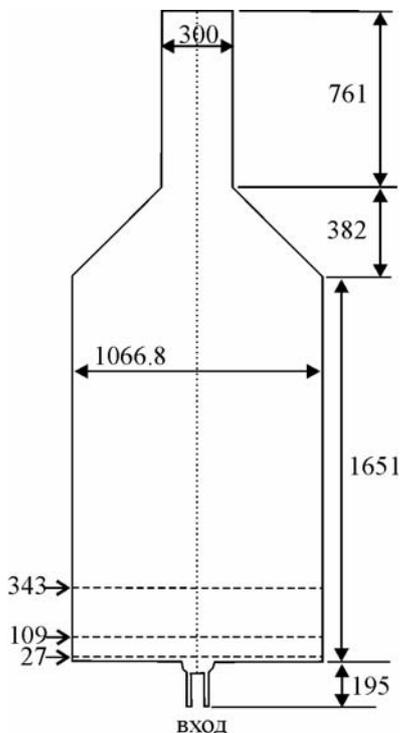


Рис. 1. Геометрия горелки и расположение контрольных сечений. Размеры указаны в миллиметрах

4. СВОЙСТВА ПОТОКА

Плотность воздушно-газовой смеси определялась по закону идеального газа: $\rho = \frac{p_{\text{ор}}}{RT \sum \frac{m_{i'}}{M_{i'}}$,

$$\rho = \frac{p_{\text{ор}}}{RT \sum \frac{m_{i'}}{M_{i'}}$$

где R — универсальная газовая постоянная; $m_{i'}$ — массовая фракция (доля) вещества i' , $M_{i'}$ — молекулярный вес вещества i' . Теплоемкость воздушно-газовой смеси определялась по закону перемешивания: $C_p = \sum m_{i'} C_{p,i'}$, где $C_{p,i'}$ — теплоемкость вещества i' . Теплоемкость веществ CH_4 , H_2O , O_2 , CO_2 , N_2 определяется в виде ряда от T :

$$C_p(T) = A_1 + A_2T + A_3T^2 + \dots$$

Таблица 1. Физические свойства смеси

Коэффициент диффузии, $D_{\text{ср}}$, м ² /с	$2.88 \cdot 10^{-5}$
Турбулентное число Шмидта, Sc_t	0.7
Коэффициент рассеивания, σ_s , 1/м	10^{-9}
Внешнее (атм) давление, $p_{\text{ор}}, p_a$	101325

Таблица 2. Физические свойства топлива

Молекулярный вес, кг/кмоль	16.313
Уд. теплоемкость C_p , Дж/кг·К	полином
Тепл. сгорания, ΔH , Дж /кмоль	$1.063 \cdot 10^8$

Таблица 3. Коэффициенты ряда для определения теплоемкости веществ

Вещество	CO ₂	Топливо	O ₂
A ₁	535.4	2005	876.3
A ₂	0.6393	-0.3407	0.06141
A ₃	-0.0001823	0.002362	0.0001861
A ₄	$-5.956 \cdot 10^{-8}$	$-1.178 \cdot 10^{-6}$	$-3.006 \cdot 10^{-7}$
A ₅	$3.784 \cdot 10^{-11}$	$1.703 \cdot 10^{-10}$	$2.295 \cdot 10^{-10}$
Вещество	H ₂ O	N ₂	
A ₁	1938	1027	
A ₂	-0.5904	0.01081	
A ₃	0.001215	$4.955 \cdot 10^{-5}$	
A ₄	$-7.158 \cdot 10^{-7}$	$-1.21 \cdot 10^{-8}$	
A ₅	$1.519 \cdot 10^{-10}$	0	

Коэффициент теплопроводности газовой смеси: $\lambda(T) = B_1 + B_2T$, где $B_1 = 7.6736 \cdot 10^{-3}$ Вт/м·К, $B_2 = 5.8837 \cdot 10^{-5}$ Вт/м·К².

Коэффициент динамической вязкости газовой смеси: $\mu(T) = C_1 + C_2T$, где $C_1 = 7.6186 \cdot 10^{-6}$ кг/(м·с), $C_2 = 3.26223 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с·К).

5. ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Граничные условия на стенках печи по температуре приведены в табл. 4.

Таблица 4. Температура на стенках конструкции

Граница	Температура, К	Степень черноты
Стенки рядом с входным к-ом	312	0.6
Передняя стенка центрального цилиндра	1173	0.6
Конус входного канала	1173	0.6
Конус огнеупорной кладки	1273	0.6
Нижний торец печи	1100	0.6
Цилиндрическая стена печи	профиль	0.6
Конус выпускного канала	1305	0.6
Выпускной цилиндрический канал	1370	0.6

Профиль температуры на цилиндрической стенке:

$$T(x) = m_0 + m_1(x + 0.195) + \dots + m_6(x + 0.195)^6,$$

где $0 < x < 1.65$ м, т.е. вдоль цилиндрической стенки.

Таблица 5. Коэффициенты температурного профиля вдоль цилиндрической стенки горелки

m_0	$1.257 \cdot 10^3$	m_4	$1.46151 \cdot 10^4$
m_1	$-2.1777 \cdot 10^3$	m_5	$-5.83885 \cdot 10^3$
m_2	$9.93349 \cdot 10^3$	m_6	$8.98612 \cdot 10^2$
m_3	$-1.74799 \cdot 10^4$	-	-

Входные граничные условия по потоку представлены в таблице 6, где входная скорость потока воздуха в осевом направлении обозначена символом u , в радиальном направлении — v , а в тангенциальном — w .

Таблица 6. Входные граничные условия по потоку

Параметр	Воздух	Топливо
Средняя осевая скорость, u_{cp} , м/с	31.35	0
Осевая скорость, u , м/с	проф.	0
Радиальная скорость, v , м/с	0	157.25
Средняя окружная скорость, w_{cp} , м/с	20.97	0
Окружная скорость, w , м/с	проф.	0
Температура, К	312	308
Интенсивность турбулентности, %	17	5
Масштаб турбулентности, м	0.0076	0.0009

Компоненты входной скорости потока воздуха заданы в виде профиля (зависимость от радиуса):

$$u(y) = f_{cor}(c_0 + c_1y + c_2y^2 + \dots + c_6y^6);$$

$$w(y) = f_{cor}(d_0 + d_1y + d_2y^2 + \dots + d_6y^6);$$

где $0.033 < y < 0.0435$ м, $f_{cor} = 1.1178$.

Таблица 7. Коэффициенты для профиля скорости на входном участке потока воздуха

c_0	$-4.818842687 \cdot 10^4$	d_0	$-6.8960497786 \cdot 10^4$
c_1	$7.5296927935 \cdot 10^6$	d_1	$1.1673343271 \cdot 10^7$
c_2	$-5.0278973235 \cdot 10^8$	d_2	$-8.3022991429 \cdot 10^8$
c_3	$1.8419946151 \cdot 10^{10}$	d_3	$3.1709554128 \cdot 10^{10}$
c_4	$-3.9029890015 \cdot 10^{11}$	d_4	$-6.8471484249 \cdot 10^{11}$
c_5	$4.5212286090 \cdot 10^{12}$	d_5	$7.9124212930 \cdot 10^{12}$
c_6	$-2.2263357665 \cdot 10^{13}$	d_6	$-3.8173590138 \cdot 10^{13}$

В данном расчете участок подачи топлива через 24 отверстия на внутренней поверхности концентрической трубки был заменен сплошным участком на дистанции в осевом направлении: $0.12 < x < 0.1362$. Эквивалентная радиальная скорость потока топлива на этом участке рассчитывалась исходя из условия сохранения расхода: $v = 0.272$ м/с.

Таблица 8. Массовые доли веществ на входе

Параметр	Воздух	Топливо
Массовая доля CH_4	0	0.97
Массовая доля CO_2	0	0.008
Массовая доля N_2	0.7685	0.022
Массовая доля O_2	0.2315	0

6. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ РАЗБИЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Из-за присутствия вращательной компоненты потока рассматривалась полная сборка конструкции в секторе 360 град., содержащая 126102 узла и 122496 конечных элементов — гексаэдров.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

В процессе валидации сравниваются, предсказанные кодом GIDR-3M, распределения осевой скорости, массовых фракций CO_2 , O_2 и температуры в сечениях 27, 109 и 343 мм вниз по потоку с данными эксперимента [1].

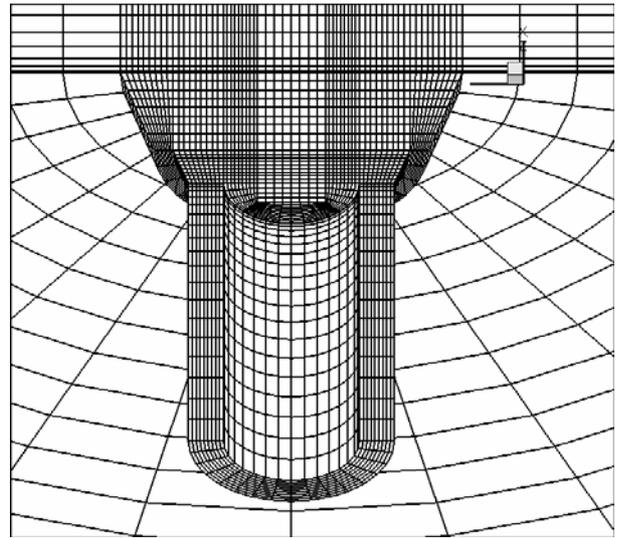


Рис. 2. Фрагмент расчетной сетки входной части

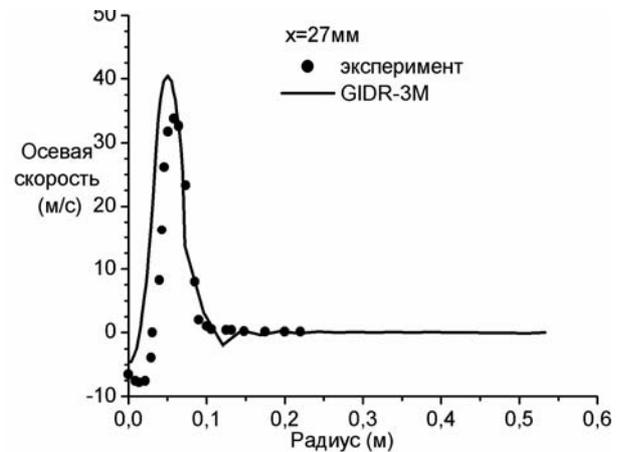


Рис. 3. Распределение осевой скорости в сечении $x = 27$ мм

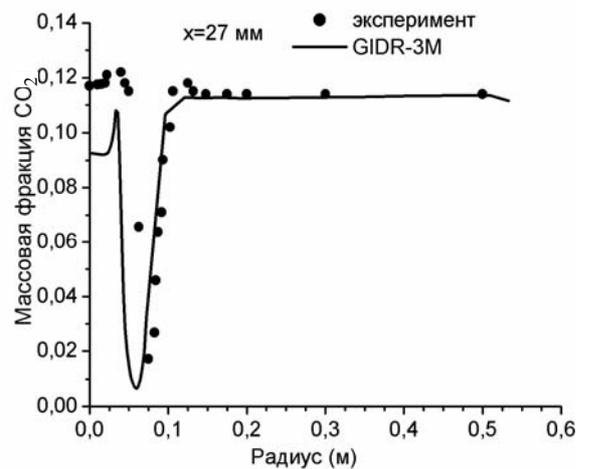


Рис. 4. Распределение массовой фракции CO_2 в сечении $x = 27$ мм

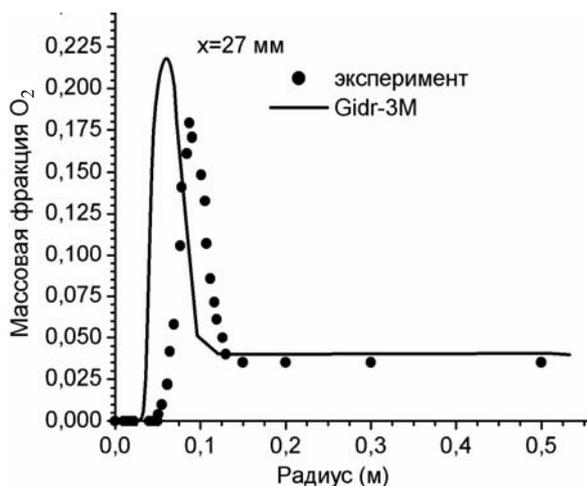


Рис. 5. Распределение массовой фракции O_2 в сечении $x = 27$ мм

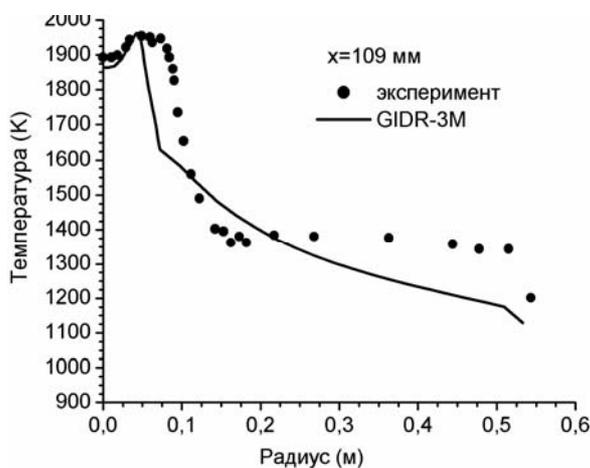


Рис. 6. Распределение температуры в сечении $x = 109$ мм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализованы в составе CFD кода Gidr-3M модели, позволяющие рассчитывать горение газов. Пример численного моделирования горения в 300кВт печи показал удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

Полученная точность вычислений позволяет проводить исследования горения, и получать основные характеристики печей и горелок на этапе проектирования.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

x, y, z — декартова система координат;

\vec{U} — вектор скорости;

T — температура, К;

H — энтальпия, Дж/кг;

t — время, с;

ρ — плотность, $кг/м^3$;

λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

C_p — теплоемкость при постоянном давлении Дж/(кг·К);

μ_t — турбулентная вязкость, $кг/(м \cdot с)$;

k — кинетическая энергия турбулентных пульсаций, $м^2/с^2$;

ε — скорость диссипации величины k , $м^2/с^3$;

ΔH_{Rf} — теплота сгорания, Дж/кмоль;

Sc_t — турбулентное число Шмидта;

q_r — плотность потока излучения, Вт/м²;

γ — коэффициент поглощения, 1/м;

σ_s — коэффициент рассеяния излучения, 1/м;

D_{cp} — коэффициент диффузии, $м^2/с$;

C_i, m_i — массовая концентрация (доля) вещества i ;

Pr_t — турбулентное число Прандтля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sayre, A., Lallemand, N., Duguе, J., and Weber, R., Scaling Characteristics of Aerodynamics and Low- No_x Properties of Industrial Natural Gas Burners, The SCALING 400 Study, Part IV: The 300 kW BERL Test Results, IFRF Doc No F40/y/11, International Flame Research Foundation, The Netherlands.
2. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия, 1975.
3. Загуменный М.Н. Расчет трехмерных турбулентных течений с использованием нестационарной k - ε -модели турбулентности // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках: Тр. XIV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. В 2-х т. Т.1. М.: Издательство МЭИ, 2003. 462 с.