

ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва»

**Калинина Кристина  
Леонидовна**

# **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССИВОВ РЕАГИРУЮЩИХ ДИФФУЗИОННЫХ СТРУЙ**

Руководитель: д.т.н. Гурьянов Александр Игоревич

**Рыбинск, 2019**

Традиционные камеры сгорания работали по схеме **диффузионного горения**:

- + стабильное пламя
- + высокая температура
- высокая скорость образования NOx

Современные камеры сгорания работают по схеме **кинетического горения**:

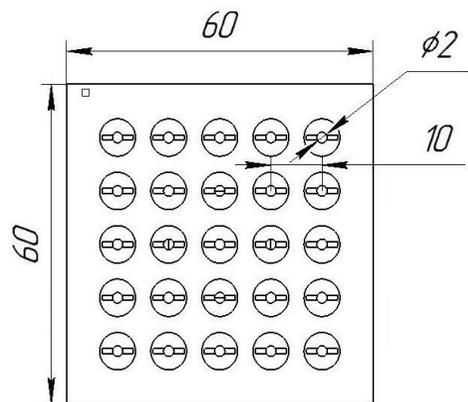
- высокая вероятность срыва пламени
- максимальная температура ниже, чем при использовании диффузионной схемы
- + низкая скорость образования NOx
- не позволяет работать при значениях степени повышения давления выше 45

---

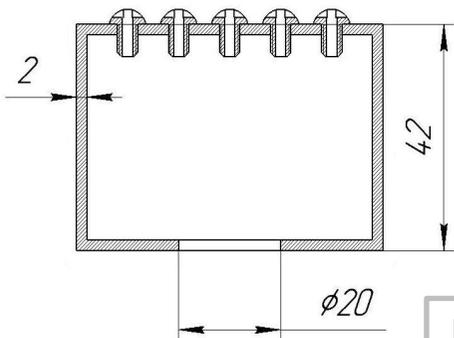
Одним из вариантов решения проблем проскока и высокой эмиссии может быть применение **диффузионного горения с разделением зоны реакции**. Это позволит:

- сократить объемы камеры сгорания
- сократить время пребывания газов в зоне реакции
- снизить концентрацию NOx при такой же скорости их образования

Экспериментальное  
горелочное  
устройство



Фронтальный вид

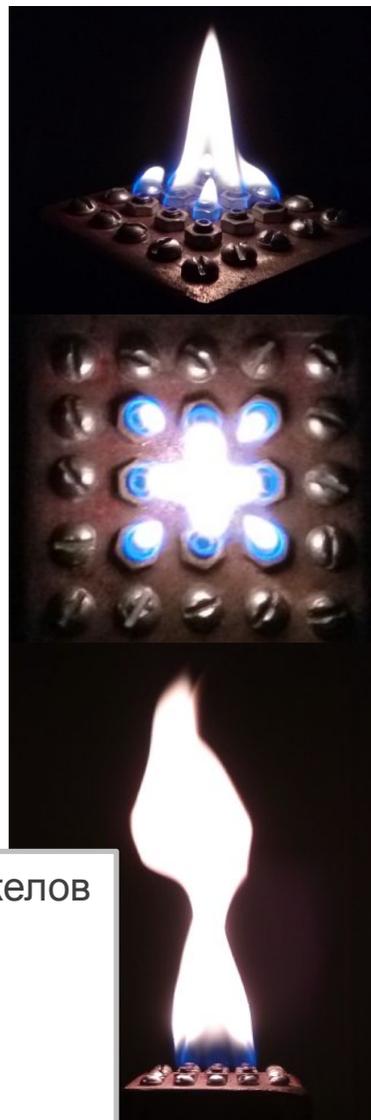


Поперечный разрез

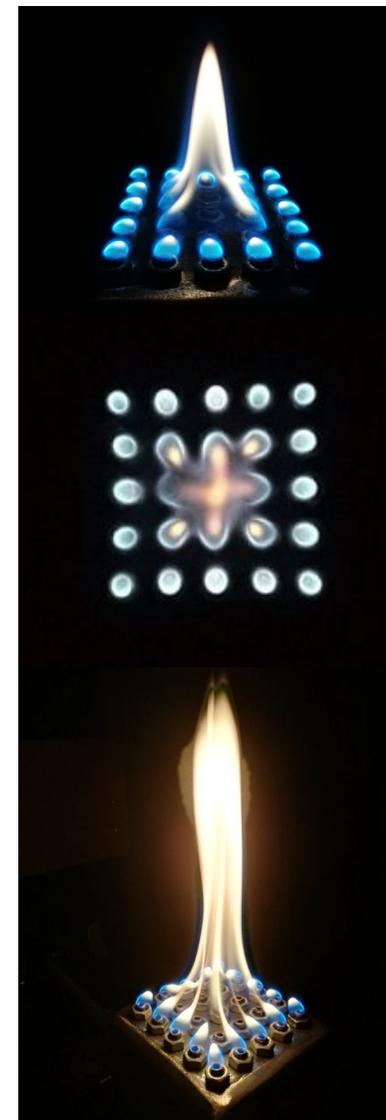
Один факел



Массив факелов 2x2



Массив факелов 5x5



В системах реагирующих микрофакелов  
**возникают нестационарные  
взаимодействия,**

- которые сопровождаются:
- согласованными колебаниями;
  - срывом пламени.

Расчетная модель:

- **область горения** - цилиндр диаметром 0,25 м и высотой 0,6 м
- **проточная часть горелки** – куб 0,03 x 0,05 x 0,05 м и цилиндры форсунок высотой 0,005 м, диаметром 0,002 м
- блочная структурированная сетка из 1,7 млн узлов
- на выходе из топливных форсунок задано локальное сгущение с относительным коэффициентов 1,2
- для решения применены стационарные трехмерные уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу
- модель турбулентности k-ε
- описание горения – модель PDF Flamelet и BVM с подключенной схемой окисления пропана в воздухе
- задана массовая сила тяжести, направленная противоположно вектору импульса струй

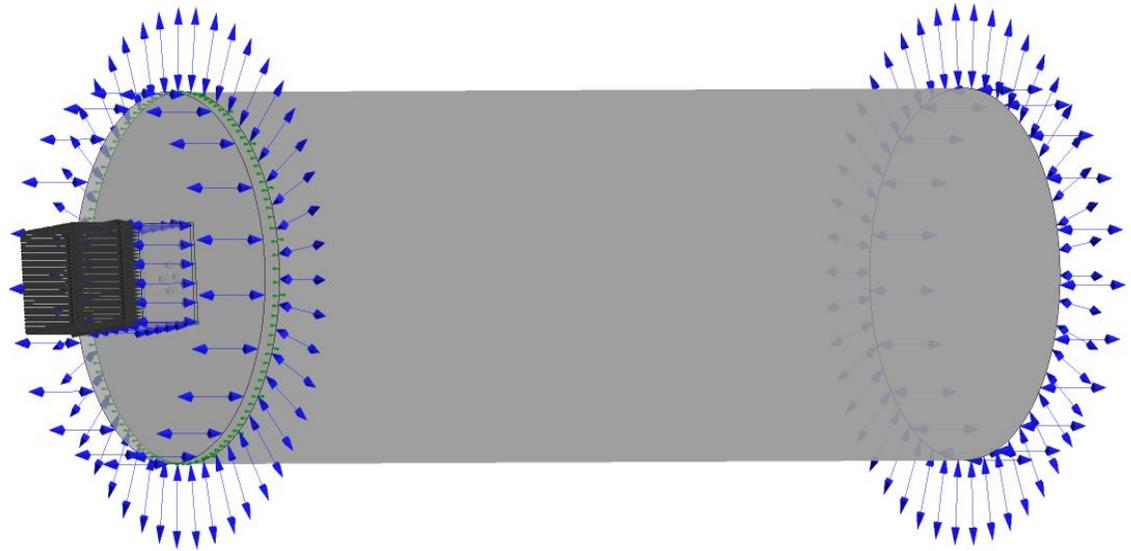


Рисунок 1 – Расчетная модель: а) – расчетная модель, состоящая из атмосферного цилиндра и горелки; б) – модель горелки

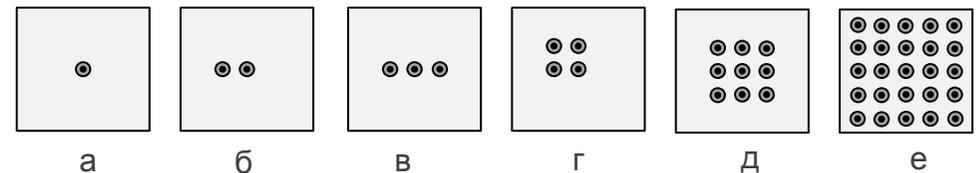


Рисунок 2 – Варианты расположения форсунок: а – одиночная струя; б, в – линейные массивы; г-е – двумерные массивы

# СПЕКТРЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ИОН-РАДИКАЛОВ

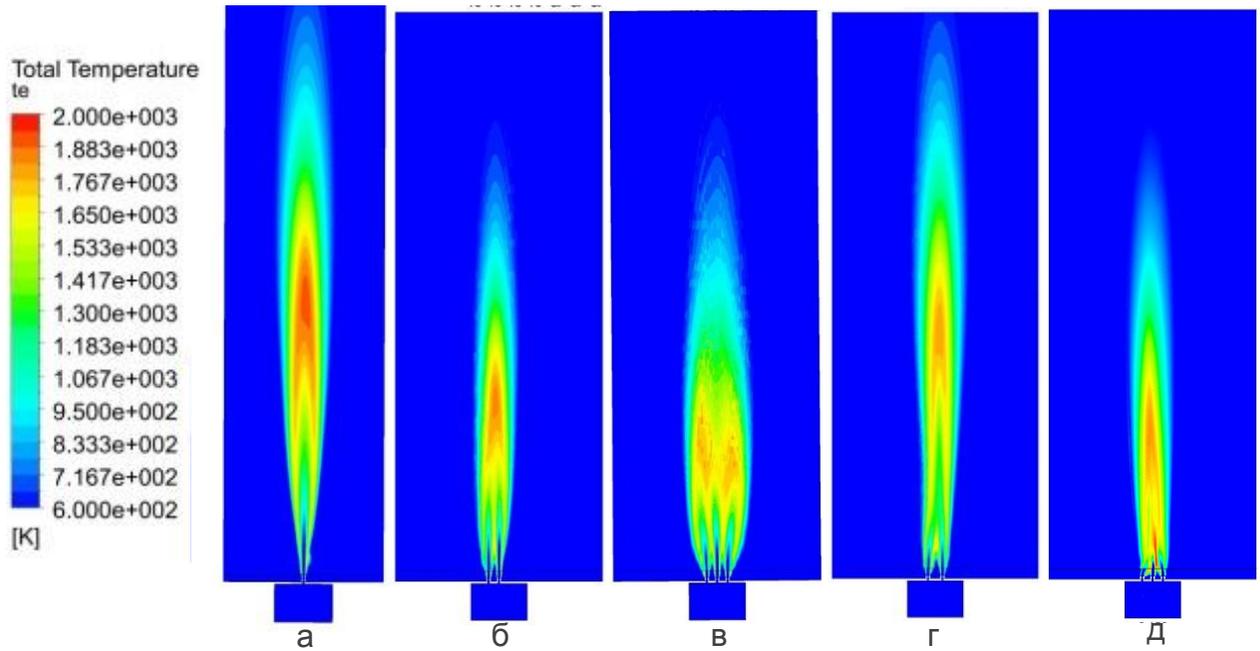


Рисунок 4 – Распределение температуры: а – одиночная струя; б – линейный массив из двух форсунок; в – линейный массив из трех форсунок; г – двумерный массив из четырех форсунок; д – двумерный массив из девяти форсунок

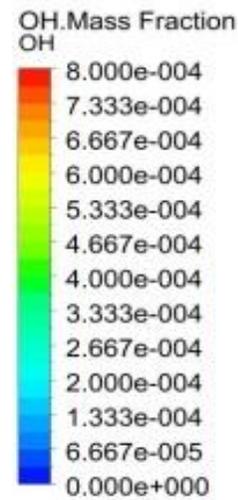


Рисунок 5 – Распределение OH-радикалов при горении: а – линейного массива из 2 форсунок; б – двумерный массив из 4 форсунок

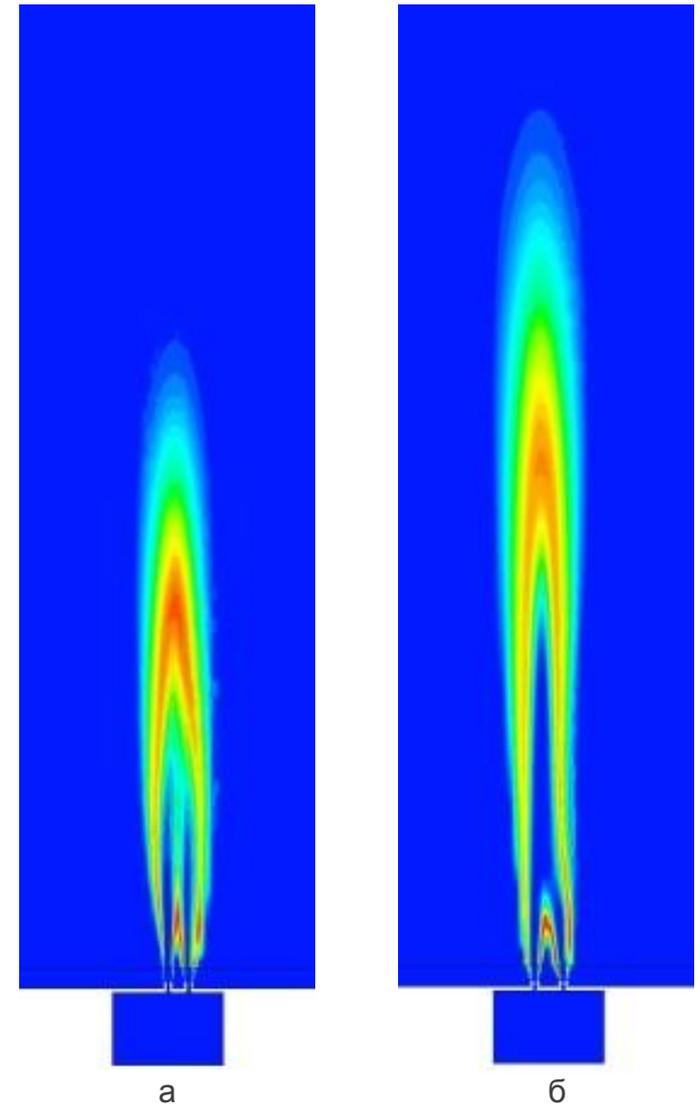


Таблица 1. Параметры диффузионных факелов при фиксированном расходе топлива

	G = 0,045 г/с					
	1 струя	2 струи	3 струи	2x2	3x3	5x5
$l/d$	169	115	80	98	94	95
$S_{OH} \cdot 10^{-3}, m^2$	30,6	37	38,6	36	42,4	47,2
$S_{Mf} \cdot 10^{-3}, m^2$	22,6	27	30,8	26,3	29,6	33,9
$V_{cp}, m/c$	2,1	1,7	1,5	1,4	1,4	1,3
$g_{C3H8} \cdot 10^{-4}$	6,9	10,8	12	12,8	11,3	3,9
Re	960	490	290	250	110	40

$l$  — длина факела, мм;  
 $S_{OH}$  — площадь изоповерхности ОН-радикалов,  $m^2$ ;  
 $S_{Mf}$  — площадь изоповерхности коэффициента избытка воздуха,  $m^2$ ;  
 $\alpha$  — коэффициент избытка воздуха;  
 $V_{cp}$  — осредненная по площади факела скорость течения, м/ч;  
 $g_{OH}$  — массовая доля ОН-радикалов;  
 $g_{C3H8}$  — массовая доля топлива.

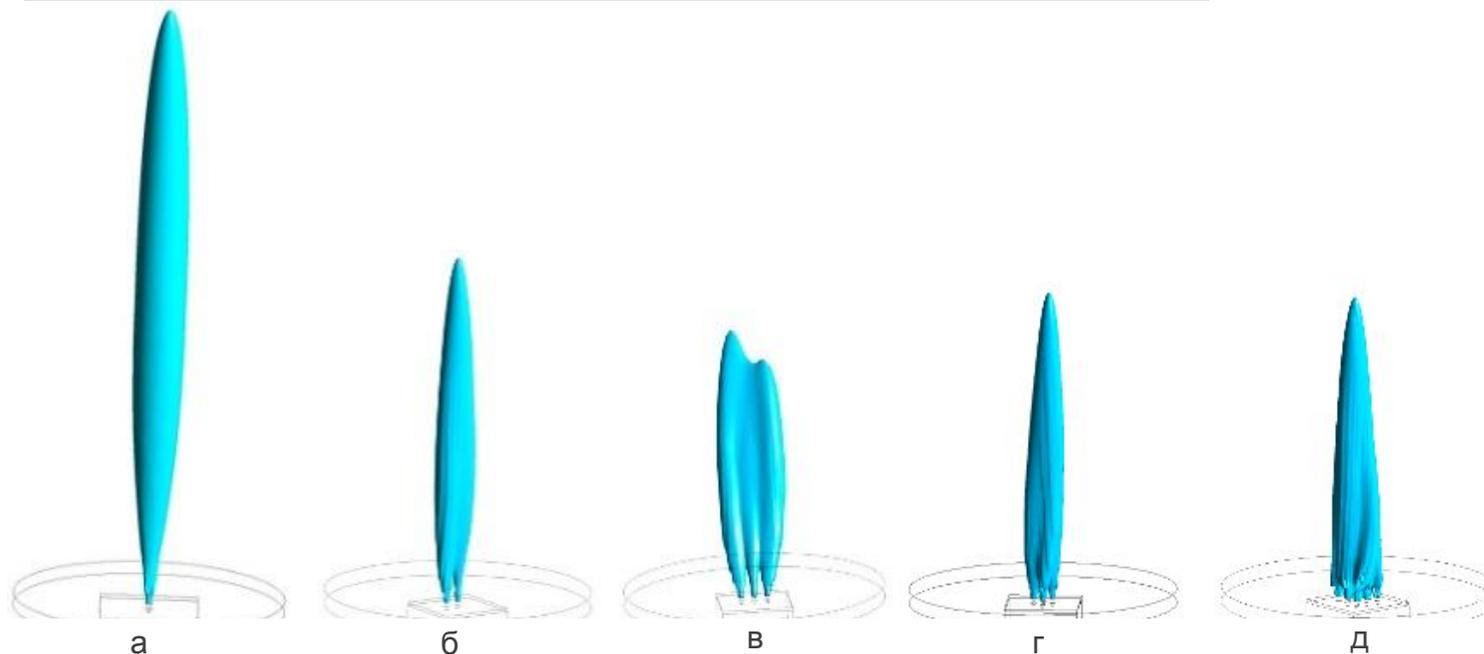


Рисунок 3 – Изоповерхности массовой доли ОН-радикалов  $g_{OH} = 0,0005$ : а – одиночная струя; б, в – линейные массивы; г, д – двумерные массивы

# СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ VVM И PDF

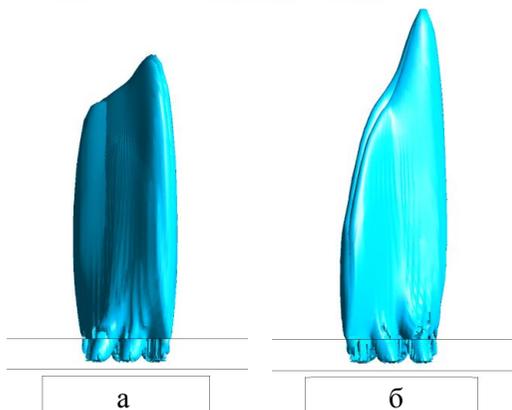


Рисунок 6 – Изоповерхности массовой доли OH-радикалов  $g_{OH} = 0,0005$ : а – модель горения VVM; б – модель горения PDF Flamelet

	Массив 3x3 $G_T = 0,027$ г/с	
	Модель горения VVM	Модель горения PDF
$l/d$	50	55
$S_{OH} \cdot 10^{-3}, \text{M}^2$	25,5	24,5
$S_{Mf} \cdot 10^{-3}, \text{M}^2$	18,4	17,6
$V_{cp}, \text{M/с}$	1,08	1,11
$g_{C_3H_8} \cdot 10^{-4}$	11,3	10,4

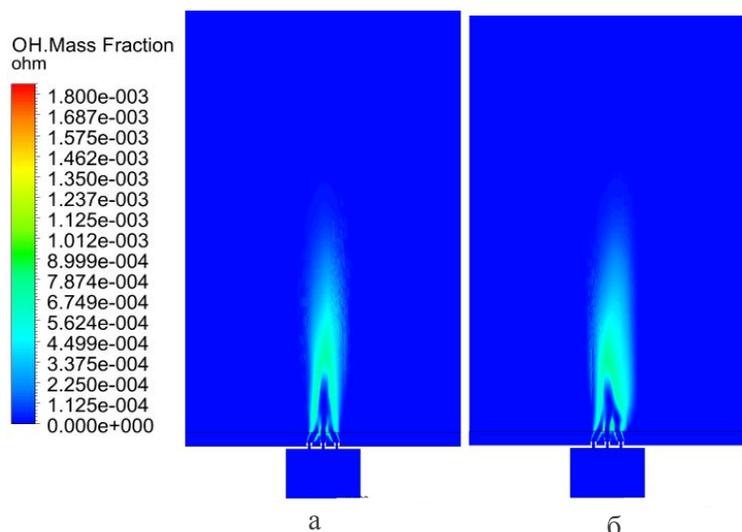


Рисунок 7 – Распределение OH-радикалов при горении: а – модель горения VVM; б – модель горения PDF

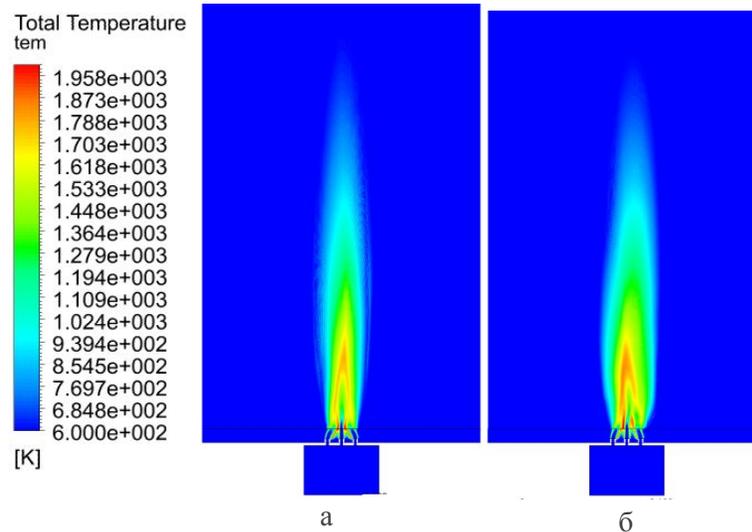


Рисунок 8 – Распределение температуры: а – модель горения VVM; б – модель горения PDF

Разделение зоны горения на несколько взаимодействующих диффузионных факелов приводит к:

- **уменьшению длины факела** (массив из 3 факелов – 80 калибров, массив 3x3– 94 калибра, в сравнении с одиночным факелом, длиной 169 калибров)
- **увеличению площади реакции** (площадь одиночного факела  $30 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ , площадь массива 3x3  $42 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ )
- смещению максимальной температуры на периферию факела (из-за недостатка окислителя в приосевой зоне)

Сравнение результатов расчета на моделях горения BVM и PDF показало:

- длина факела, площадь фронта пламени и число несгоревшего топлива незначительно отличаются (5-8%) при расчете на моделях горения BVM и PDF
- обе модели дают результаты, отличные от эксперимента на 15-20%

Течение в системах микрофакелов является сложным и требует дополнительных расчетов в нестационарной постановке

**Спасибо за внимание**