

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

С.А. Лисаков, Е.В. Сыпин, М.Н. Зырянова, А.Н. Павлов, Ю.А. Галенко

Бийский технологический институт, г. Бийск

Выполнено моделирование процесса нестационарного горения метано-воздушной смеси в угольных шахтах. Сформулированы аналитические зависимости для выполнения моделирования нестационарного горения метано-воздушной смеси на базе программного комплекса FlowVision. Проверена адекватность компьютерной модели на экспериментальных данных, приведенных в литературе для 7 экспериментов, а также на собственных экспериментальных данных. Средняя относительная погрешность модели составляет от 10 до 20%. Разработанная модель масштабируется на трубы с большими диаметрами от 2 до 4 м и может быть применима для расчета нестационарного горения для условий угольных шахт. Проведено моделирование нестационарного горения для условий угольной шахты. В результате для рассматриваемых конфигураций шахт установлено, что: максимальная скорость фронта пламени при детонации достигает 1400 м/с; максимальная температура в расчетной области при детонации составляет 2440 °С; максимальное избыточное давление при детонации составляет 4 МПа; расчетные значения плотности потока излучения при детонации достигают 2200 кВт/м².

Ключевые слова: моделирование, нестационарное горение, метано-воздушная смесь, переход горения в детонацию, угольная шахта.

ВВЕДЕНИЕ

В Бийском технологическом институте в рамках гранта РФФИ №17-08-00844 а осуществляется разработка научных основ для создания автоматической системы взрывоподавления на базе оптико-электронных датчиков, способной оценивать скорость фронта пламени и оперативно принимать решения по способу локализации горения до перехода его в детонацию [1, 2]. При этом необходимым базисом является исследование процесса нестационарного горения метано-воздушной смеси для условий, характерных в угольных шахтах, на основе математического моделирования.

В работе [2] выполнена постановка задачи моделирования нестационарного горения: выбраны подходы к исследованию и моделированию турбулентных течений при нестационарном горении и сформулированы исходные данные для моделирования.

Исходные данные для проведения моделирования, приведенные в табл. 1.

Табл. 1 – Исходные данные для проведения моделирования [2]

Параметр	Значение
Модель турбулентного течения	Модель на базе осредненных нестационарных уравнений Навье-Стокса (URANS)
Модель для турбулентных	Стандартная k-ε модель

переменных k и ε	
Модель горения	Одностадийная необратимая реакция горения стехиометрической метано-воздушной смеси
Модель скорости брутто реакции	Модель вихревой диссипации (EDM)
Модель переноса энергии излучением	Диффузионная модель P-1
Модель для расчета коэффициента поглощения продуктов горения	Модель взвешенной суммы серых газов (ВССГ)
Граничные условия	Трубы диаметрами 2 и 3 м с одним закрытым и одним открытым концом и кольцевыми перегородками с параметрами S=0,15-0,4 D; BR=0,05-0,15, поджиг располагается у закрытого конца трубы
Температура воспламенения (для поджига)	650 °С
Массовый стехиометрический коэффициент (метан-воздух)	17,24
Температура смеси	20 °С

Давление	10 ⁵ Па
----------	--------------------

Целью данной работы является проведение исследования процесса нестационарного горения метано-воздушной смеси для условий угольной шахты на базе компьютерного моделирования.

Задачами при выполнении моделирования являются:

– сформулировать аналитические зависимости для выполнения моделирования нестационарного горения метано-воздушной смеси;

– проверить адекватность компьютерной модели на экспериментальных данных, приведенных в литературе, а также на собственных экспериментальных данных;

– оценить масштабируемость компьютерной модели на трубы с диаметрами, сопоставимыми с шириной выработки шахт, с учетом экспериментальных данных, приведенных в литературе;

– провести исследование нестационарного горения для условий угольной шахты и определить скорость горения, температуру, давление, плотность потока излучения продуктов горения.

МОДЕЛЬ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

После анализа возможных вариантов реализации модели горения метано-воздушной смеси [2] предпочтение было отдано специализированному программному обеспечению FlowVision [3], в котором присутствуют все математические модели, указанные в исходных данных.

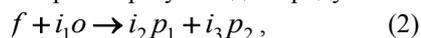
При моделировании нестационарного горения в FlowVision решаются полные уравнения Навье-Стокса (уравнение неразрывности и уравнение движения), уравнение энергии, уравнение состояния газа, уравнения для скалярных величин, описывающих концентрацию топлива, окислителя, продуктов сгорания. Уравнения решаются с помощью метода конечных объемов [4].

Модель горения FlowVision предполагает, что в смеси присутствуют, минимум, три вещества и протекает одна необратимая брутто-реакция [4].

При этом можно задать брутто-реакцию, в которой образуется один продукт (в общем случае - смесь газов):



либо реакцию, в которой образуется два продукта:



где f – компонент «горючее»; o – компонент «окислитель»; p – компонент «продукты горения»; i_1 – массовый стехиометрический коэффициент при окислителе; $i_{2,3}$ – массовые стехиометрические коэффициенты при продуктах горения p_1 и p_2 .

Для приведённых далее уравнений предполагается более общая реакция (2).

Для компонента «горючее» в общем случае решаются однородное уравнение для восстановленной массовой доли горючего:

$$\frac{\partial(\rho Y_f^*)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho Y_f^* V) + \vec{\nabla} \cdot J_{f,eff}^* = 0, \quad (4)$$

и неоднородное – для истинной массовой доли горючего:

$$\frac{\partial(\rho Y_f)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho Y_f V) + \vec{\nabla} \cdot J_{f,eff} = -W_f, \quad (5)$$

где ρ – плотность смеси, кг/м³; Y_f – истинная массовая доля горючего; V – вектор скорости потока газовой смеси, м/с; $J_{f,eff}$ – диффузионный поток компонентов газовой смеси, кг·м⁻²·с⁻¹; W_f – скорость реакции горения, кг/(м³·с).

Звёздочка (*) обозначает восстановленные массовые доли и диффузионные потоки компонентов газовой смеси.

Выражение для скорости реакции горения в уравнении (5) определяется моделью вихревой диссипации (EDM) [4]:

$$W_f = C \left(\frac{\mu \varepsilon}{\rho k^2} \right)^{0.25} \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(Y_f, \frac{Y_0}{i_i} \right), \quad (6)$$

где $C=23,6$ – параметр константы турбулентной реакции, взятый из работы [5]; μ – динамический коэффициент молекулярной вязкости, Па·с; k – турбулентная энергия м²·с⁻³; ε – скорость диссипации турбулентной энергии, м²·с⁻³; ρ – плотность, кг/м³.

Истинная массовая доля окислителя определяется по условию [4]:

$$Y_o = \begin{cases} Y_o^* - \Delta f \cdot i_1, & \text{если } Y_o^* > \Delta f \cdot i_1 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (7)$$

Восстановленная массовая доля окислителя Y_o^* вычисляется по формуле (8) [4]:

$$Y_o^* = 1 - Y_f^* - Y_{p1}^* - Y_{p2}^* - \sum_{i=p2+1}^N Y_i. \quad (8)$$

Истинные массовые доли продуктов горения Y_{p1} и Y_{p2} вычисляются по формулам (9), (10):

$$Y_{p1} = Y_{p1}^* + \Delta f \cdot i_2, \quad (9)$$

$$Y_{p2} = Y_{p2}^* + \Delta f \cdot i_3;$$

$$\Delta f = Y_f^* - Y_f. \quad (10)$$

Удельная термодинамическая энтальпия находится в результате решения уравнений (11, 12) итерационным методом:

$$h(T) = \sum_{i=1}^N h_i(T) Y_i, \quad (11)$$

$$h_i(T_{abs}) = h_0(298.15) + \int_{298.15}^{T_{abs}} C_p(T) dT, \quad (12)$$

где h_0 – энтальпия образования при 298.15 К, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$; C_p – удельная теплоёмкость $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; Y_i – массовая доля вещества i ; T – температура, К.

В программном комплексе FlowVision момент инициирования горения описывается возникновением соответствующей температуры воспламенения в заданной области.

В качестве модели для турбулентных переменных k и ϵ используется стандартная k - ϵ модель. Модель переноса энергии излучением представляет собой диффузионную модель P-1. Описание данных моделей приводится в документации на программный комплекс FlowVision [3].

Модель для расчета коэффициента поглощения продуктов горения представляет собой модель взвешенной суммы серых газов (ВССГ), которая не входит в FlowVision. Поэтому данная модель была реализована отдельно с помощью компонента «Редактор формул».

Коэффициент поглощения продуктов горения a рассчитывается по формуле [6-8]:

$$a = -\frac{\ln(1 - \epsilon_{\text{изл}})}{s}, \quad (13)$$

где $\epsilon_{\text{изл}}$ – коэффициент излучения продуктов горения; s – толщина слоя продуктов горения, м.

Коэффициент излучения продуктов горения рассчитывается согласно выражению [6-8]:

$$\epsilon_{\text{изл}} = \sum_{i=0}^I a_i(T)(1 - e^{-k_i p_{\text{sum}}^s}), \quad (14)$$

где a_i – весовой коэффициент излучения для i -того серого газа, k_i – коэффициент поглощения для i -того серого газа, $(\text{атм} \cdot \text{м})^{-1}$; p_{sum} – сумма парциальных давлений всех поглощающих газов, атм, T – температура, К, I – количество серых газов.

Весовой коэффициент излучения для $i=0$ рассчитывается по формуле:

$$a_0 = 1 - \sum_{i=1}^I a_i, \quad (15)$$

Весовые коэффициенты излучения для $i>0$ определяются полиномиальной функцией [6-8]:

$$a_i = \sum_{j=1}^J b_{i,j} T^{j-1}, \quad (16)$$

где $b_{i,j}$ – полиномиальные коэффициенты; J – количество полиномиальных коэффициентов.

Значения коэффициентов k_i и $b_{i,j}$ взяты из источника [8] для продуктов горения метано-воздушной смеси – паров воды и углекислого газа при отношении их парциальных давлений $p_{\text{H}_2\text{O}}/p_{\text{CO}_2}=2$. Коэффициенты представлены в таблице 1.

Для учета влияния давления на коэффициент поглощения в модель ВССГ вводятся поправки в виде масштабирующих коэффициентов с учетом данных

представленных в работе [9]. При полном давлении $P_n > 1,1$ атм, вместо k_i используется выражение:

$$k_i \rightarrow k_i P_n^m, \quad (17)$$

где $m=0,2$ – коэффициент, определенный с учетом температуры и парциальных давлений продуктов горения метановоздушной смеси из литературных данных [9].

РАССТАНОВКА ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ В РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Расчетная область представляет собой трубу с одним закрытым и одним открытым концом и препятствиями внутри трубы. Поджиг располагается у закрытого конца. Препятствия, турбулизирующие горение, представляют собой кольцевые перегородки, регулярно расположенные по длине трубы.

Параметрами перегородок являются шаг установки S , пропорциональный диаметру трубы D , и степень затенения сечения кольцевыми перегородками BR (отношение площади препятствия к площади поперечного сечения трубы).

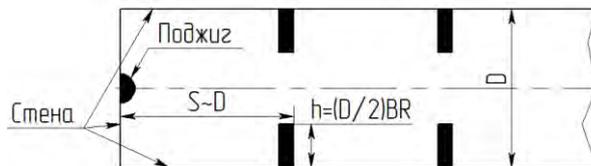


Рис. 1 – Геометрия расчетной области

Решение задачи моделирования нестационарного горения в трубе с препятствиями выполняется в двумерной постановке для сокращения вычислительных затрат. Задача решается в вертикальной плоскости симметрии, соответствующей продольному сечению трубы.

Для двумерной постановки задачи высота кольцевого препятствия определяется, как $h=(D/2) \cdot BR$ согласно [10] (рис. 1). Данная зависимость дает несколько завышенное значение по высоте по сравнению с фактическим использованным в эксперименте [10].

Грани, соответствующие продольному сечению трубы (параллельно плоскости рисунка, выделены черным цветом на рис. 2), имеют тип граничного условия – «Симметрия» (используется терминология программного комплекса FlowVision): твердая поверхность, на которой реализуются условия непротекания и проскальзывания для переменной «Скорость». Грани, ограничивающие трубу сверху и снизу, закрытый конец трубы и кольцевые перегородки (выделены белым цветом на рис. 2) имеют тип граничного условия – «Стенка»: поверхность, имитирующие твердые преграды. Открытый конец трубы (выделен красным цветом на рис. 2) имеет тип – «Свободный выход»: поверхность, через которую поток выходит из расчетной области. Источник зажигания (модификатор «Поджиг»)

располагается в центре грани, соответствующей закрытому концу трубы.



Рис. 2 – Расстановка граничных условий и расположение модификатора «поджиг»

Начальная расчетная сетка принята равномерной в плоскости симметрии. Количество расчетных ячеек по направлениям $x \times y \times z$ задавалось, соответственно, $1000 \times 1 \times 20$. Таким образом, общее число расчетных ячеек равно 20000. При выполнении расчета устанавливалась «Неявная» схема интегрирования (2-й порядок точности) [3].

На первых 10 итерациях шаг по времени задавался постоянным с учетом отношения характерного размера области расчета к характерной скорости в ней. На последующих итерациях шаг по времени задавался числом Куранта $CFL \leq 1$ (шаг по времени меняется в процессе расчета с учетом его результатов) [3].

В качестве опорных величин при моделировании в программном комплексе FlowVision установлены атмосферное давление равное 10^5 Па и температура 273 К. Таким образом, температура в расчетной области выражается в град. С и используется избыточное давления вместо абсолютного. В качестве начальных условий установлена температура смеси равная 20 °С (соответствует средней температуре по шахте), а избыточное давление установлено 0 Па [11].

В расчетной области изначально задается предварительно перемешанная метано-воздушная смесь со стехиометрической массовой относительной концентрацией метана равной 0,0548. Поджиг смеси выполняется с помощью модификатора. Температура воспламенения смеси составляет 650 °С.

В соответствии со сформулированными граничными условиями, параметрами расчета и исходными данными было проведено компьютерное моделирование нестационарного горения метано-воздушных смесей.

ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проверка адекватности моделирования выполняется с использованием данных экспериментальных исследований, приведенных в работах [10,12-16], и данных собственных экспериментальных исследований по

нестационарному горению в трубах с регулярными препятствиями.

В работах [10, 12-13] эксперименты проводились в детонационных трубах с одним открытым и одним закрытым концом. Поджиг смеси выполнялся на закрытом конце трубы с помощью электрической искры. Для измерения давления и скорости фронта пламени использовались быстродействующие пьезоэлектрические преобразователи давления и фотодиоды.

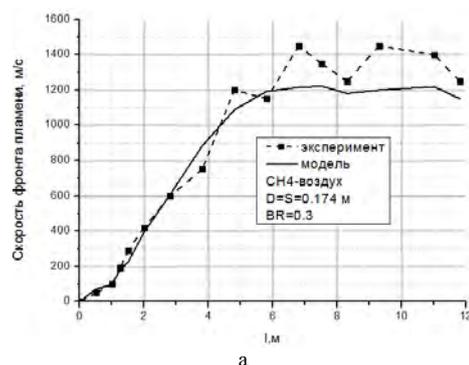
Трубы с кольцевыми перегородками

В работе [12] эксперименты проводились для начальных условий, соответствующих температуре $T = 293$ К и давлению 101 кПа, с использованием метано-воздушных смесей с объемными концентрациями от 5,5 до 17 %. Чистота метана составляла 99,9 %. Эксперименты проводились в двух детонационных трубах. Первая труба имела длину 12 м и внутренний диаметр 0,174 м. Вторая труба имела внутренний диаметр 0,52 м и длину 34,5 м. Трубы оснащены кольцевыми перегородками со степенью затенения сечения $BR=0,3$ и 0,64; расстояние между препятствиями равно диаметру трубы $S=D$.

Моделирование выполнялось для геометрических параметров труб и кольцевых препятствий и условий проведения, соответствующих экспериментальным. При этом использовалась метано-воздушная смесь с концентрацией 9,5 %.

Шаг по времени на первых 10 итерациях для труб с $D=S=0,174$ м равен 10^{-6} с. Для труб с $D=S=0,52$ м шаг по времени равен 10^{-5} с.

Зависимости скорости распространения фронта пламени по длине трубы, полученные экспериментально и с помощью моделирования для стехиометрических метано-воздушных смесей, приведены на рис. 3.



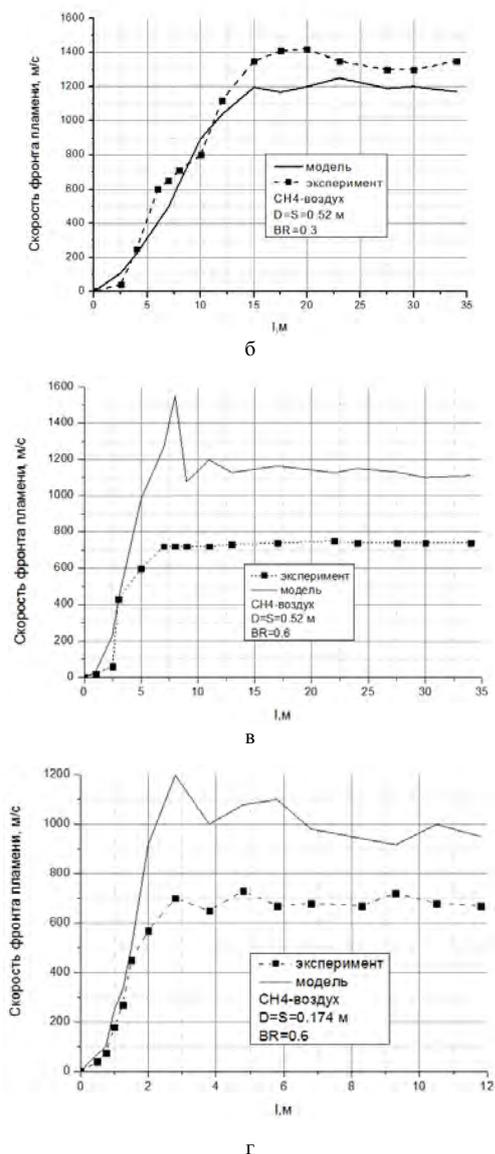


Рис. 3 – Скорости распространения фронта пламени по длине трубы с кольцевыми перегородками

Скорости фронта пламени, рассчитанные по модели, хорошо согласуются с экспериментальными для труб с диаметрами 0.174 и 0.52 м и $BR=0.3$, что видно из рис. 3 а и 3 б. Средняя относительная погрешность расчета скорости фронта пламени для эксперимента с параметрами $D=S=0.174$ м, $BR=0.3$, $l=12$ м (рис. 3а) составила 11%, а для эксперимента $D=S=0.52$ м, $BR=0.3$, $l=35$ м (рис. 3б) – 14%.

Для экспериментов с параметрами $D=S=0.52$ м, $BR=0.6$, $l=35$ м (рис. 3 в) и $D=S=0.174$ м, $BR=0.6$, $l=35$ м (рис. 3 г) расчетные значения скорости фронта пламени хорошо согласуются с экспериментальными только на начальных участках труб. На дальнейших участках труб в экспериментах в отличие от расчетов

переход горения в детонацию не наблюдается, что обуславливает погрешности по расчету скоростей около 40 %. Расхождения могут быть обусловлены неучтенными в модели потерями энергии, а также объемными эффектами в реальной трубе, не учитываемыми при двумерном моделировании [13].

Измеренные датчиками в экспериментах [11] максимальные значения давления по длине трубе составляют от 2 до 3 МПа. Расчетные значения составляют от 1,8 до 3,2 МПа, что хорошо согласуется с данными эксперимента.

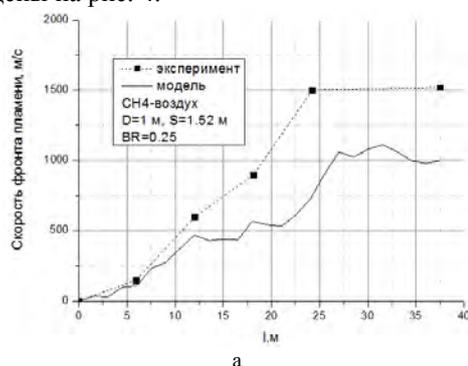
Трубы с односторонними перегородками в виде балок

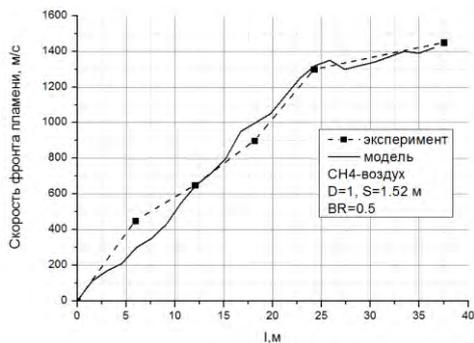
В работах [10, 13] приведены результаты экспериментов для детонационной трубы (длина 73 м, внутренний диаметр 0,105 м), оснащенной 15-ю перегородками в виде балок, размещенных с одной стороны и имеющих степень затенения сечения 0,25 и 0,5. Расстояние между перегородками составляло 1,52 м. Эксперименты проводились для атмосферных начальных условий при температуре $T=293$ К и давлении 101 кПа с использованием смесей природный газ-воздух с объемными концентрациями от 5,1 до 15 %. Содержание метана в природном газе составляло не менее 90 %.

При реализации в программном FlowVision комплексе модель была модернизирована в соответствии с видом препятствий и значениями геометрических параметров труб и препятствий. Условия проведения моделирования задавались в полном соответствии с условиями проведения экспериментов.

При моделировании использовалась стехиометрическая смесь природный-газ воздух (9,5% природного газа). Шаг по времени на первых 10 итерациях равен 10^{-4} с.

Зависимости скорости распространения фронта пламени по длине трубы, полученные экспериментально и с помощью моделирования для смеси природный-газ воздух (9,5% природного газа) приведены на рис. 4.





б

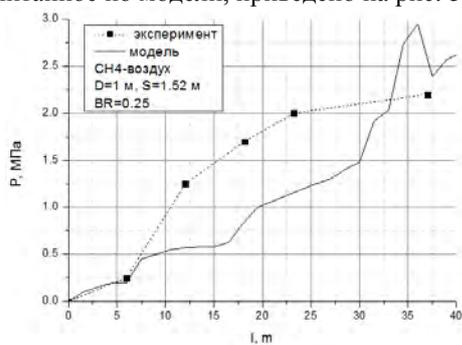
а – $D=1$ м, $S=1.52$ м, $BR=0.25$; б – $D=1$ м, $S=1.52$ м, $BR=0.5$

Рис. 4 – Скорости распространения фронта пламени по длине трубы с односторонними перегородками в виде балок

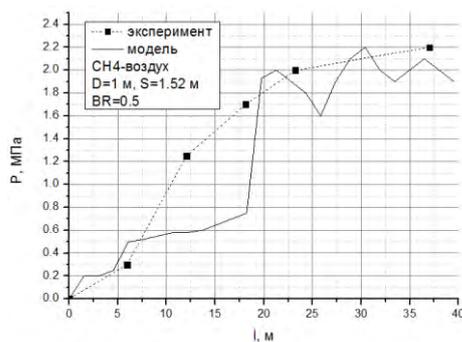
Для эксперимента с $BR=0.25$ (рис. 4 а) расчетные значения скорости фронта пламени хорошо согласуются с экспериментальными на начальном участке трубы (до 12 м) – относительная погрешность не превышает 25%. На дальнейших участках труб расчетная скорость занижена по сравнению с экспериментальной. Переход горения в детонацию наблюдается как для эксперимента, так и при моделировании. Расхождения могут быть обусловлены объемными эффектами, не учитываемыми при двумерном моделировании.

Для эксперимента с $BR=0.5$ (рис. 4 б) расчетные значения скорости фронта пламени хорошо согласуются с экспериментальными – относительная погрешность не превышает 20%.

Максимальное избыточное давление в различных точках по длине трубы, измеренное экспериментально и рассчитанное по модели, приведено на рис. 5.



а



б

а – $D=1$ м, $S=1.52$ м, $BR=0.25$; б – $D=1$ м, $S=1.52$ м, $BR=0.5$

Рис. 5 – Максимальное избыточное давление в различных точках трубы с односторонними перегородками в виде балок

Экспериментальные и расчетные данные для максимального избыточного давления удовлетворительно согласуются друг с другом.

Собственные экспериментальные исследования

Собственные экспериментальные исследования проводились коллективом авторов для стехиометрической пропано-воздушной смеси для начальных условий, соответствующих температуре $T=293$ К и давлению 101 кПа. Эксперименты проводились в детонационной трубе с одним открытым и одним закрытым концом, имеющей длину 4 м и внутренний диаметр 0,5 м. Труба была оснащена кольцевыми перегородками со степенью затенения сечения $BR=0,3$. Измерение скорости фронта пламени выполнялось с помощью быстродействующих фотодиодных датчиков.

Моделирование выполнялось для условий эксперимента. Шаг по времени на первых 10 итерациях равен 10^{-4} с.

Зависимости скорости распространения фронта пламени по длине трубы, полученные экспериментально и с помощью моделирования для стехиометрической пропано-воздушной смеси приведены на рис. 6.

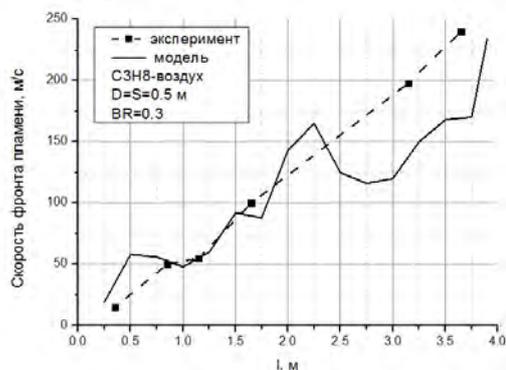


Рис. 6 – Скорость распространения фронта пламени по длине трубы для собственных экспериментов

Экспериментальная скорость фронта пламени и расчетная хорошо согласуются друг с другом. Средняя относительная погрешность расчета скорости составляет 18%.

Экспериментальные угольные шахты

В работе [14] представлены результаты экспериментов по исследованию скорости пламени в экспериментальной шахте Лэйк Линн (США). Результаты моделирования сопоставлялись результатами эксперимента № 347. Исследование проводилось в шахте с сечением $2*5,5$ м на участке длиной 60 м. Первые 14 м оборудованы креплениями водяного барьера, турбулизирующими пламя. Крепления представляют собой полки закрепленные к потолку шахты и расположенные на расстоянии 0,5 м

от потолка. Ширина полок составляет 0,3 м. Крепления располагаются на расстоянии 2 м друг от друга по длине шахты. Остальной участок шахты по длине от 14 до 60 м не имеет регулярных препятствий. Однако при его моделировании устанавливалась шероховатость стен шахты равная 0,1 м. Концентрация метана в смеси с воздухом составляла 9 % об.

Результаты расчета скорости фронта пламени и экспериментальные данные (эксперимент № 347, Лэйк Линн) представлены на рис 8.

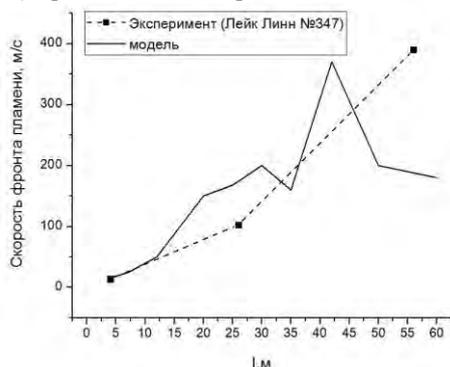


Рис. 8 – Скорость распространения фронта пламени по длине шахты Лэйк Линн (эксперимент № 347)

Экспериментальные данные о скорости фронта пламени и результаты ее расчетов на базе компьютерного моделирования удовлетворительно согласуются друг с другом. Расхождения могут быть обусловлены неучтенными объемными эффектами и отклонениями при задании геометрии реальной шахты при моделировании.

В работе [15] представлены результаты экспериментов по исследованию скорости пламени в экспериментальной шахте Брюстон (США). Исследование проводилось в шахте с сечением 2*2,7 м на участке с длиной 20 м. Первые 15 м оборудованы кольцевой крепью со степенью затенения сечения BR=0.19. Элементы крепи имеют ширину 0,2 м и высоту 0,19 м и располагаются на расстоянии 1,5 м друг от друга. Остальной участок шахты по длине от 15 до 20 м имеет регулярные препятствия шириной 0,2 м и высотой 0,32 м, располагаемые с одной стороны на расстоянии 3 м друг от друга. Концентрация природного газа в смеси с воздухом составляла 8,5 % об.

Результаты расчета скорости фронта пламени и экспериментальные данные для шахты Брюстон представлены на рис 9.

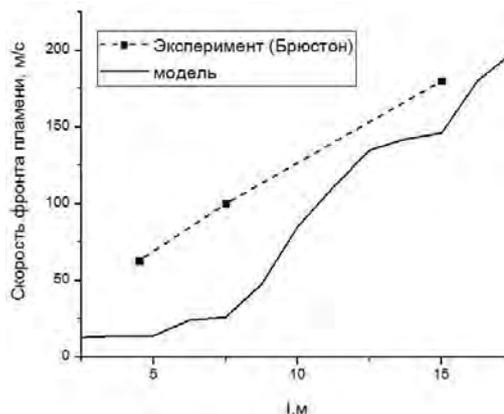


Рис. 9 – Скорость распространения фронта пламени по длине шахты Брюстон

Из рис. 9 видно удовлетворительное соответствие экспериментальных данных о скорости фронта пламени и результатов расчетов на базе компьютерного моделирования.

По результатам проверки адекватности установлено, что разработанная компьютерная модель применима для расчета параметров нестационарного горения метано-воздушных смесей в трубах и шахтах с регулярными препятствиями.

ОЦЕНКА МАСШТАБИРУЕМОСТИ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

Известные экспериментальные исследования нестационарного горения, как правило, проводятся в трубах с диаметрами меньшими, чем диаметр шахты (от 0,17 до 1 м), что связано с большой сложностью, трудоемкостью и высокой стоимостью исследований в трубах большого диаметра (3 м и более).

Следовательно, важно сопоставить результаты исследований с учетом их масштабируемости на большие диаметры труб. Сопоставление может быть выполнено для экстраполированных экспериментальных данных по отношению расстояния l , при котором происходит переход горения в детонацию, к диаметру трубы D [10, 13]. Экспериментальные данные для труб меньшего диаметра 0,174, 0,52 м при BR=0.3 с кольцевыми перегородками и трубы диаметром 1 м при BR=0.25 с перегородками в виде балок, размещенных с одной стороны в трубе, сопоставляются с данными моделирования для этих труб (рис.7). Для трубы диаметром 3 м с модельными данными сопоставляются экстраполированные экспериментальные данные (пунктирная линия). При этом моделируется труба с BR=0.3 и с перегородками, расположенными с одной стороны.

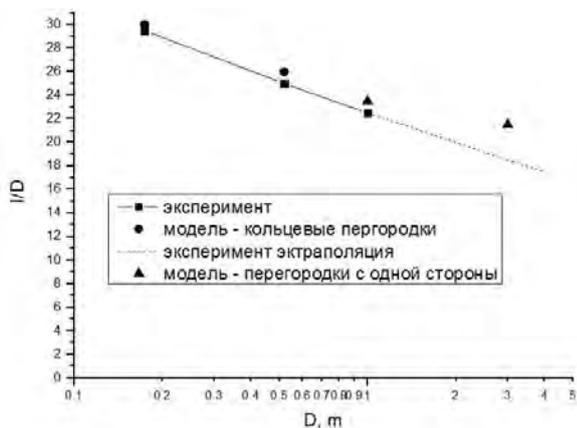


Рис.7 – Отношение I/D в зависимости от диаметра трубы

Значения отношения I/D для модели и для эксперимента уменьшаются с увеличением диаметра трубы. Расстояние, при котором происходит переход горения в детонацию I, для труб с односторонними перегородками меньше чем для труб с кольцевыми перегородками [10, 13]. Отношение I/D (по результатам моделирования) для диаметра 1 м равно 23,5, для 3 м – 21,5.

Таким образом, модель является масштабируемой на трубы с диаметрами от 2 до 4 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

Развитие турбулизированного горения для условий угольной шахты определяется наличием различных препятствий, геометрическими параметрами шахты и формы выработок [16].

Минимальная площадь поперечного сечения для различных условий проведения выработки находится в пределах от 5,4 до 7 м² при ширине и высоте около 2,5 м. Максимальное значение площади поперечного сечения, как правило, не превышает 30 м² для ширины 6 м и высоты 5 м [16].

Препятствиями в угольных шахтах наиболее часто являются крепи выработок и различное оборудование. Расположение крепи в выработках имеет регулярную структуру и строго регламентировано [16], что позволяет исследовать ее влияние на турбулентное горение.

В рамках выполнения исследования рассматривается влияние на турбулизацию горения препятствий в виде крепи выработок угольных шахт. Для крепи используют двутавровые балки высотой 0,14-0,2 м, рельсы высотой 0,1-0,14 м и специальный взаимозаменяемый профиль высотой 0,088-0,137 м. Расстояние между элементами крепи (балками, рельсами и т.д.) по длине выработки принимают равным от 0,5 до 1,25 м [16].

Диаметр трубы пересчитанный через площадь сечения выработки угольной шахты составляет от 2 до 3 м. С учетом геометрических параметров крепи выработок параметры перегородок для диаметра D=2

м составляют S= 0,5 и 1,25 м, BR=0,2, а для D=3 м - S=0,45 и 1,2 м, BR=0,15.

При моделировании шаг по времени на первых 10 итерациях для труб с геометрическими параметрами соответствующими угольной шахте принимался равным 10⁻³ с.

Результаты расчета скорости распространения фронта пламени по длине трубы с геометрическими параметрами, характерными для угольных шахт, приведены на рис 10.

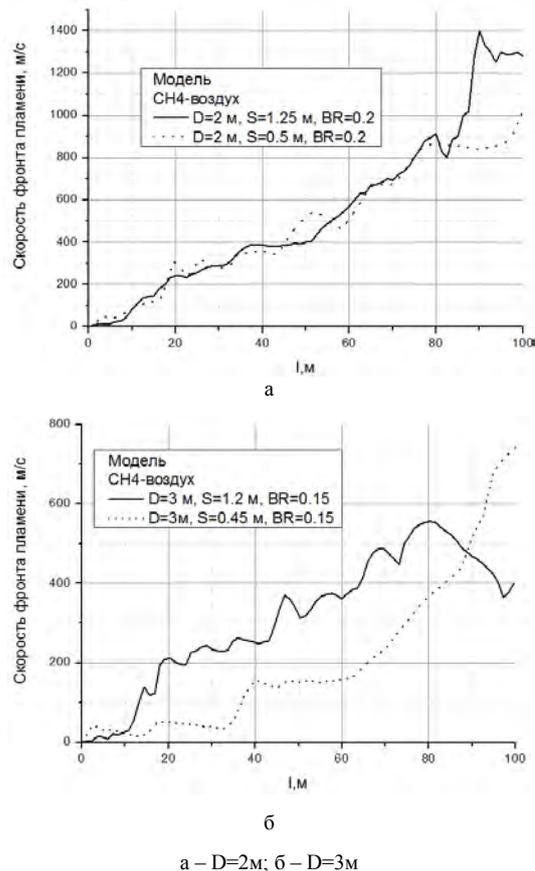


Рис. 10 – Скорости распространения фронта пламени по длине трубы с D = 2 и 3 м

При моделировании нестационарного горения для угольных шахт с эквивалентным диаметром 2 м и при S=0,5, и при S=1,25 м наблюдается переход горения в детонацию. Для S=1.25 м максимальная скорость фронта на пламени достигает 1400 м/с; для S=0.5 м – 1000 м/с.

Для угольных шахт с эквивалентным диаметром 3 м переход горения в детонацию не наблюдается. Максимальная скорость фронта пламени достигает 742 м/с для S=1.2 м и 556 м/с для S=0.45 м.

Изменение максимальной температуры и избыточного давления в зависимости от времени для модели с параметрами D=2 м, S=1.25 м, BR=0.2 приведено на рис. 11.

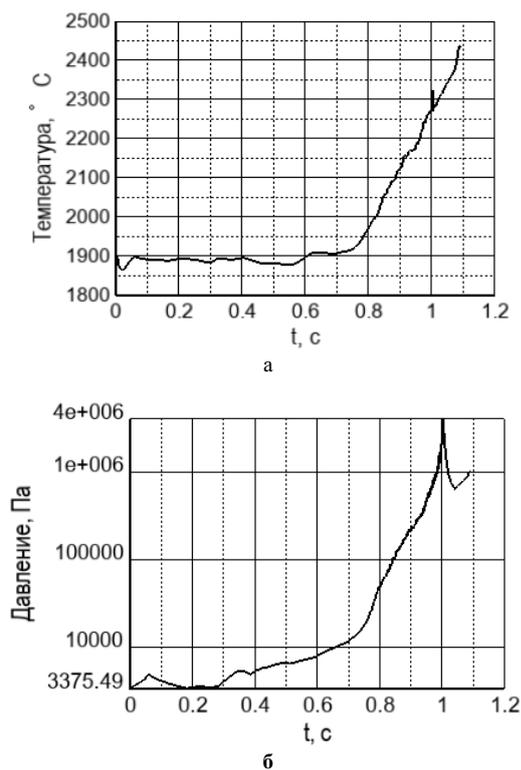


Рис. 11 – Изменение максимальной температуры (а) и избыточного давления (б) в зависимости от времени для модели с параметрами $D=2$ м, $S=1.25$ м, $BR=0.2$

Исходя из данных, представленных на рис. 11, переход горения в детонацию происходит через 1 с после воспламенения смеси. На начальной стадии температура горения составляет 1900 °С и является близкой к адиабатической температуре горения метано-воздушной смеси 1950 °С. Максимальная температура в расчетной области достигается при детонации (2440 °С), что согласуется данными приведенными в литературе [10] – 2500 °С. На начальной стадии избыточное давление не превышает 10 кПа. Максимальное избыточное давление при детонации достигает 4 МПа и также согласуется с экспериментальными данными [10, 12].

Температурное поле для участков расчетной области в различные моменты времени при моделировании шахты с параметрами $D=2$ м, $S=1.25$ м, $BR=0.2$ приведено на рис. 12.

Воспламенение метано-воздушной смеси инициируется с помощью точечного источника (поджига) у закрытого конца трубы. На начальной стадии формируется огненный шар, расширяющийся до стен трубы (рис. 12 а). При этом возникают слабые волны сжатия, которые отражаются от поверхностей трубы, сталкиваются с пламенем и приводят к мелкомасштабным возмущениям. Возмущения приводят к увеличению поверхности пламени и, как следствие, к увеличению выделения энергии и более

быстрому тепловому расширению горячих газов [10, 13]. Механизм ускорения пламени связан, главным образом, с ростом площади поверхности пламени [10, 13].

На начальных участках трубы передний фронт пламени распространяется симметрично относительно продольной оси. При этом в верхней и нижней части между препятствиями остается несгоревшая смесь. В результате площадь поверхности пламени увеличивается (рис. 12 б, в).

Со временем образуется расширенная зона реакции, распространяющаяся на расстоянии в несколько раз превышающем диаметр трубы – 30-40 м (рис.12 г). Затем зона стабилизируется, поскольку сгорает смесь, расположенная далеко позади переднего фронта пламени [10, 13]. При этом средняя скорость фронта пламени становится постоянной – участок трубы от 35 до 50 м (рис. 12 д).

Факторами, которые дополнительно увеличивают площадь поверхности пламени, являются взаимодействия пламени со слоями сдвига и рециркуляция на препятствиях. Ускорение потока при прохождении пламени через препятствие вызывает неустойчивость Рэлея-Тейлора (неустойчивость границы раздела между двумя средами разной плотности, которая возникает, когда менее плотная среда выталкивает более плотную). Неустойчивость Рихтмайера-Мешкова (частный случай неустойчивости Рэлея-Тейлора) возникает при неустойчивости границ сред с разной плотностью (продукты горения и горючее) при ускорении под воздействием проходящей ударной волны. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца развивается на поверхности пламени, когда поток продуктов горения проходит через узкую часть канала, а сдвиговой слой образуется ниже по потоку от препятствия [10, 13].

Через 0,911 с после поджига скорость фронта пламени достигает скорости звука в смеси. Пламя продолжает ускоряться и через 0,988 с достигает скорости звука в продуктах горения 890 м/с (рис. 12 е). Переход горения в детонацию происходит через 1 с после воспламенения смеси, скорость фронта достигает 1400 м/с, затем снижается и фронт пламени продолжает двигаться со скоростью 1300 м/с (рис. 12 ж).

При расчетах турбулентных течений с горением или процессов, проходящих при высокой температуре, важен учет энергии излучения, которая может иметь значительную долю от общего потока энергии [17]. Также необходимы данные об излучении, которые являются исходными для дальнейшего проектирования оптико-электронной системы контроля нестационарного горения.

В ходе проведения исследований устанавливалось влияние излучения на параметры нестационарного

горения. При моделировании с учетом излучения наблюдается отставание фронта пламени на 20 мс в течение всего времени по сравнению с моделью, не учитывающей излучение. При этом значения скорости фронта пламени, температуры и давления существенно не изменяются, что соответствует результатам, приведенным в литературе [18], о том, что в случае волны горения, распространяющейся от закрытого конца трубы, тепловые потери от излучения продуктов горения практически не оказывают влияния на распространение пламени в газовой смеси.

Результаты расчета максимальной плотности потока излучения продуктов горения в расчетной области для модели с параметрами $D=2$ м, $S=1.25$ м, $BR=0.2$ представлены на рисунке 13.

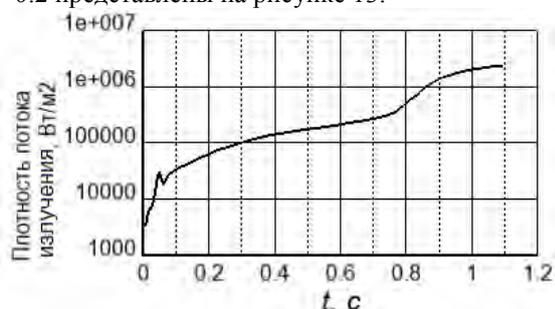


Рис. 13 – Максимальная плотность потока излучения продуктов горения в расчетной области для модели с параметрами $D=2$ м, $S=1.25$ м, $BR=0.2$

На начальной стадии результаты расчета плотности потока согласуются с теоретическими и экспериментальными данными о плотности потока с поверхности огненных шаров с диаметрами от 0,5 до 10 м – 50-350 кВт/м² [19, 20]. При детонации для метано-воздушных смесей значения плотности потока излучения, приведенные в литературе, лежат в диапазоне от 1000 до 3350 кВт/м² [20]. Полученные расчетные значения плотности потока излучения достигают 2200 кВт/м² и согласуются с экспериментальными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнено моделирование процесса нестационарного горения метано-воздушной смеси в угольных шахтах.

Сформулированы аналитические зависимости для выполнения моделирования нестационарного горения метано-воздушной смеси на базе программного комплекса FlowVision.

Проверена адекватность компьютерной модели на экспериментальных данных, приведенных в литературе для 7 экспериментов, а также на собственных экспериментальных данных. Средняя относительная погрешность модели составляет от 10 до 20%. Разработанная компьютерная модель является адекватной и применима для расчета параметров нестационарного горения метано-

воздушных смесей в трубах с регулярными препятствиями.

Разработанная модель масштабируется на трубы с диаметрами от 2 до 4 м и может быть применима для расчета нестационарного горения для условий угольных шахт.

Проведено моделирование нестационарного горения для условий угольной шахты с учетом геометрии шахты и препятствий. В результате для рассматриваемых конфигураций шахт установлено, что:

- максимальная скорость фронта пламени при детонации достигает 1400 м/с;
- максимальная температура в расчетной области при детонации составляет 2440 °С;
- максимальное избыточное давление при детонации составляет 4 МПа;
- расчетные значения плотности потока излучения при детонации достигают 2200 кВт/м².

Результаты компьютерного моделирования являются исходными данными для разработки оптико-электронной системы контроля нестационарного горения в угольных шахтах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта 17-08-00844.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Детонация реакционноспособных газовых смесей как задача об очаговом тепловом взрыве / О.Б. Кудряшова, Ю.А. Галенко, Е.В. Сыпин, Н.Ю. Тупикина // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2017. – № 2. – С. 53–58.
2. Постановка задачи моделирования процесса нестационарного горения метано-воздушной смеси в угольных шахтах / С.А. Лисаков, Е.В. Сыпин, Н.Ю. Тупикина, Ю.А. Галенко // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2017. – № 4 (Принято в печать).
3. FlowVision. Версия 3.09.04. Руководство пользователя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://flowvision.ru/index.php/public-downloads/category/8dokumentatsiyaflovision?download=112:3-09-04-pdf-enu>
4. Маркова, Т.В. Развитие моделей горения в ПК flowvision [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_es12_tesis3.pdf
5. Magnussen B.F., and Hjertager B.H. (1976) "On Mathematical Modelling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion," Sixteenth Symposium (International) on Combustion, pp. 719-729.
6. ANSYS Fluent Theory Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.scribd.com/doc/316668483/ANSYS-Fluent-Theory-Guide-pdf>
7. T. F. Smith, Z. F. Shen, and J. N. Friedman. "Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model". J. Heat Transfer. 104. 602–608, 1982.
8. Dorigon L.J., Duciak G., Brittes R., Cassol F., Galarca M., Franca F.H.R. (2013). WSGG correlations based on HITEMP 2010 for computation of thermal radiation in non-isothermal, non-homogeneous H₂O/CO₂ mixtures. IJHMT 64, pp. 863–873.
9. D. K. Edwards and R. Matavosian. "Scaling Rules for Total Absorptivity and Emissivity of Gases". J. Heat Transfer. 106. 684–689, 1984.
10. E.S. Oran, V.N. Gamezo, and D.A. Kessler Deflagrations, Detonations, and the Deflagration-to-Detonation Transition in Methane-Air Mixtures, Naval Research Laboratory, Washington, DC, 2011, 125 p.

11. Прикладное моделирование горения углеводородных смесей / А.И. Сидоренко, С.А. Лисаков, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин, Г.В. Леонов // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – №1. – С. 93-99.

12. Kuznetsov, M., Ciccarelli G., Dorofeev S., Alekseev V., Yankin Yu, and Kim T. H. DDT in Methane-Air Mixtures, Shock Waves, Vol. 12, 2002, pp. 215–220.

13. V. N. Gamezo, R. K. Zipf, Jr., D. A. Kessler, E. S. Oran. DDT in Natural Gas-Air Mixtures on Large Scales: Experiments and Simulations, 24th ICDERS, 2013, Taipei, Taiwan, pp. 1-6.

14. Weiss, E. S., Cashdollar, K. L., Mutton, I. V. S., Kohli, D. R., & Slivensky, W. A. (1999) Evaluation of reinforced cementitious seals (35 pp.). NIOSH RI 9647.

15. Sapko, M. J., Weiss, E. S., & Watson, R. W. (1987b) Size scaling of gas explosions (23 pp.). U.S. Bureau of Mines RI 9136.

16. Васючков Ю. Ф. Горное дело: Учеб. для техникумов / Ю. Ф. Васючков. – М.: Недра, 1990. – 512 с.

17. Юн А.А. Моделирование турбулентных течений. Изд. 2-е, иенр. и доп. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. – 352 с

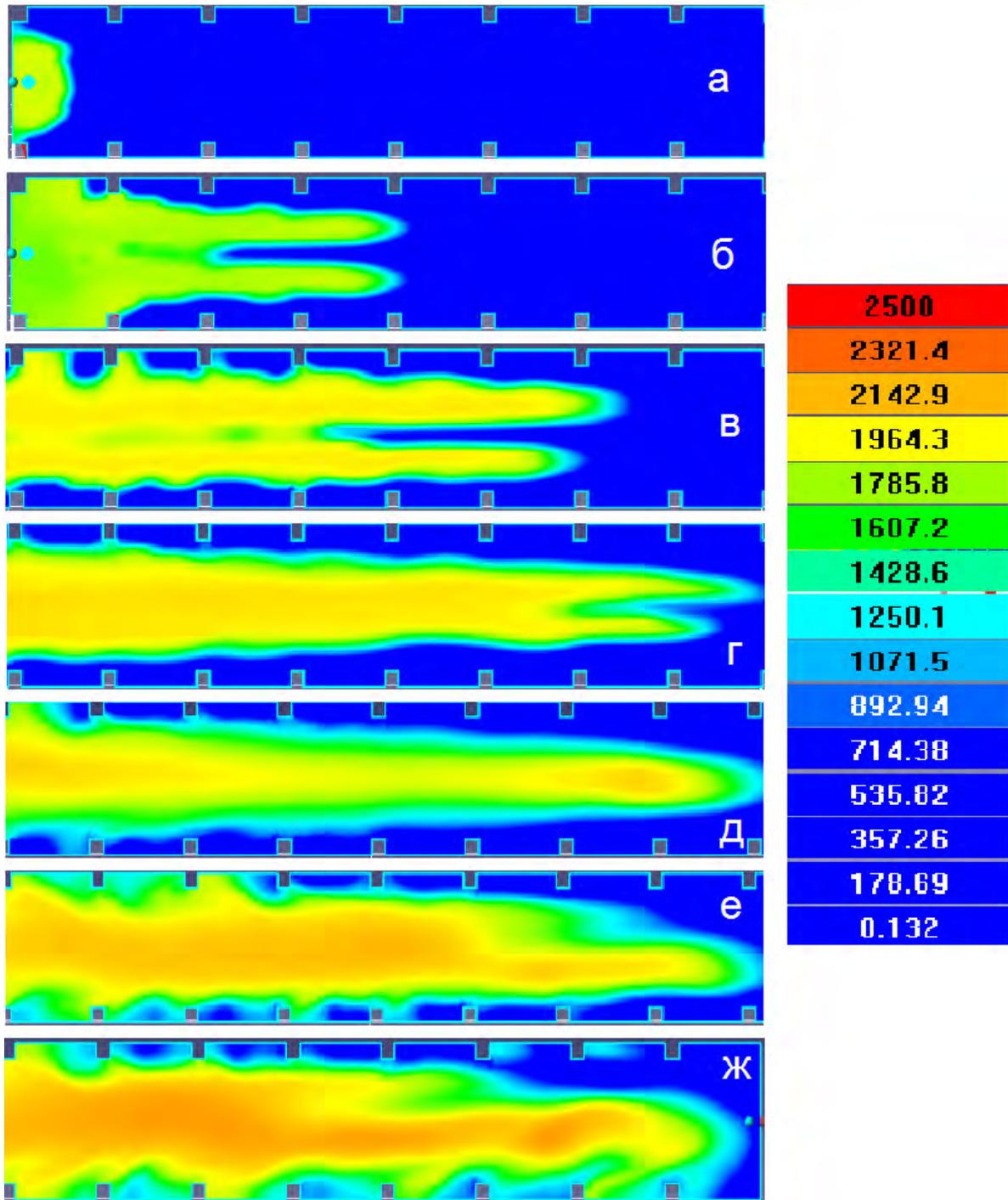
18. Влияние поглощения излучения микрочастицами на скорость пламени и режимы горения / М.Ф. Иванов, А.Д. Киверин, М.А. Либерман // ЖЭТФ, 2015, том 148, вып. 1 (7), с. 190-204.

19. Компьютерное моделирование излучения пламени при горении метано-воздушных смесей на начальной стадии развития / С.А. Лисаков, А.И. Сидоренко, Е.В. Сыпин, А.Н. Павлов, Г.В. Леонов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2016. – № 3. – С. 32–41.

20. Hadjipanayis, M.A., Beyrau, F., Lindstedt, R.P., Atkinson, G., Cusco, L. (2015). Thermal Radiation from Vapour Cloud Explosions, Process Safety and Environmental Protection, 94,517–527.

Таблица 1 – Коэффициенты для модели ВССГ при $p_{H_2O}/p_{CO_2}=2$ [8]

i	$k_i, (\text{атм}\cdot\text{м})^{-1}$	$b_{i,1}$	$b_{i,2}, (\text{K}^{-1})$	$b_{i,3}, (\text{K}^{-2})$	$b_{i,4}, (\text{K}^{-3})$	$b_{i,5}, (\text{K}^{-4})$
1	0.192	$5.62 \cdot 10^{-2}$	$7.84 \cdot 10^{-4}$	$-8.86 \cdot 10^{-7}$	$4.25 \cdot 10^{-10}$	$-7.44 \cdot 10^{-14}$
2	1.719	$1.43 \cdot 10^{-1}$	$1.80 \cdot 10^{-4}$	$-1.08 \cdot 10^{-8}$	$-6.97 \cdot 10^{-11}$	$1.77 \cdot 10^{-14}$
3	11.37	$1.36 \cdot 10^{-1}$	$2.57 \cdot 10^{-4}$	$-3.71 \cdot 10^{-7}$	$1.58 \cdot 10^{-10}$	$-2.27 \cdot 10^{-14}$
4	111.016	$1.22 \cdot 10^{-1}$	$-2.33 \cdot 10^{-5}$	$-7.49 \cdot 10^{-8}$	$4.28 \cdot 10^{-11}$	$-6.61 \cdot 10^{-15}$



а – 0.0776 с, l: 0-10 м; б – 0.489 с, l: 0-10 м; в – 0.84 с, l: 10-20 м; г – 0.911 с, l: 30-40 м; д – 0.976 с, l: 70-80 м;
 е – 0.998 с, l: 85-95 м; ж – 1.00192 с, l: 90-100 м;

Рис. 12. Температурное поле ($^{\circ}\text{C}$) для участков расчетной области в различные моменты времени при моделировании шахты с параметрами $D=2$ м, $S=1.25$ м, $BR=0.2$