

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ ПРОПАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ТРУБЕ С КОЛЬЦЕВЫМИ ПЕРЕГОРОДКАМИ

С. А. Лисаков, А. И. Сидоренко, Е. В. Сыпин, Ю. А. Галенко, А. Н. Павлов

В результате выполнения работ проведено экспериментальное исследование процесса нестационарного горения стехиометрической пропано-воздушной смеси. Разработана конструкция установки для проведения экспериментальных взрывов и предложена методика проведения исследования. Реакционный сосуд экспериментальной установки представляет собой трубу с одним открытым концом, внутренним диаметром 0,5 м и длиной 4 метра. В реакционном сосуде размещались кольцевые перегородки с шагом установки $S=0.5$ м и степенью затенения сечения $BR=0.3$. Экспериментальное исследование выполнялось для различного числа перегородок и источников воспламенения с различной энергией. С увеличением числа перегородок максимальная скорость фронта пламени практически линейно возрастает от 35 м/с для 1 перегородки до 240 м/с для 7 перегородок. При добавлении одной дополнительной перегородки максимальная скорость фронта пламени увеличивается приблизительно на 35 м/с. В результате исследования выполнена проверка адекватности разработанной ранее компьютерной модели на полученных экспериментальных данных. Разработанная компьютерная модель является адекватной и применима для расчета параметров нестационарного горения в трубах с регулярными препятствиями. Относительная погрешность расчета скорости фронта пламени не превышает 18%.

Ключевые слова: Нестационарное горение, пропано-воздушная смесь, скорость фронта пламени, компьютерное моделирование, труба с кольцевыми перегородками, степень затенения сечения, угольная шахта, электровоспламенитель, пиротехнический воспламенитель, реакционный сосуд.

ВВЕДЕНИЕ

В Бийском технологическом институте ведется разработка автоматической системы взрывоподавления на базе оптико-электронных датчиков, способной оценивать скорость фронта пламени и оперативно принимать решение по способу локализации горения до перехода его в детонацию [1, 2]. Основной областью применения подобных систем является горнодобывающая промышленность [3].

Для угольных шахт ускорение пламени и переход пламени от дефлаграции к детонации происходит при наличии ряда факторов, влияющих на возникновение нестационарного турбулизированного горения, в зависимости от наличия различных препятствий, геометрических параметров шахты и формы выработок, возможного воздействия потока вентиляционного воздуха [2,4,5]. Препятствиями в угольных шахтах являются крепь выработок и различное оборудование. Расположение крепи в выработках имеет регулярную структуру и строго регламентировано [6], что позволяет удобно исследовать ее влияние на турбулентное горение.

Коллективом авторов проведены работы по компьютерному моделированию процесса нестационарного горения метано-воздушной смеси в условиях угольной шахты [2]. Однако для подтверждения результатов моделирования требуется наличие экспериментальных данных.

Поэтому в разряд актуальных выдвигается задача экспериментального исследования нестационарного горения горючей смеси в зависимости от параметров турбулизирующих препятствий. Это позволит выполнить проверку адекватности разработанной модели; кроме того, полученные данные дополнят уже известные сведения о характере ускорения пламени в трубах с кольцевыми перегородками.

Целью данной работы является экспериментальное исследование процесса нестационарного горения горючей смеси.

В соответствии с целью необходимо решить следующие задачи:

– разработать конструкцию установки для проведения экспериментального исследования нестационарного горения;

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ ПРОПАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ТРУБЕ С КОЛЬЦЕВЫМИ ПЕРЕГОРОДКАМИ

- разработать методику проведения экспериментального исследования;
- провести экспериментальное исследование и проанализировать полученные экспериментальные данные. В результате анализа результатов необходимо определить влияние различного числа перегородок и источников воспламенения с различной энергией на скорость нестационарного горения.
- выполнить проверку адекватности компьютерной модели на экспериментальных данных, полученных на установке.

УСТАНОВКА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ

Экспериментальные исследования нестационарного горения, сопоставляемые с условиями горения в угольных шахтах, как правило, проводятся в трубах с одним закрытым и одним открытым концом [7–9]. Поджиг горючей предварительно перемешанной смеси выполняется у закрытого конца трубы. Препятствиями, турбулизирующими горение, являются кольцевые перегородки, регулярно расположенные по длине трубы, поскольку их геометрия наилучшим образом соответствует геометрии крепи шахт. 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) (Рисунок 1). Параметр S в известных исследованиях изменяется в пределах от $0,25D$ до $2D$. Степень затенения меняется в пределах от $0,1$ до $0,75$.

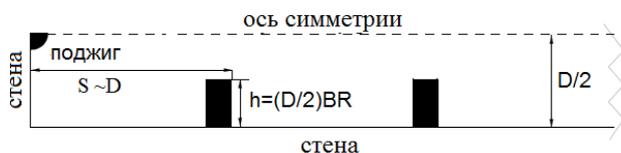
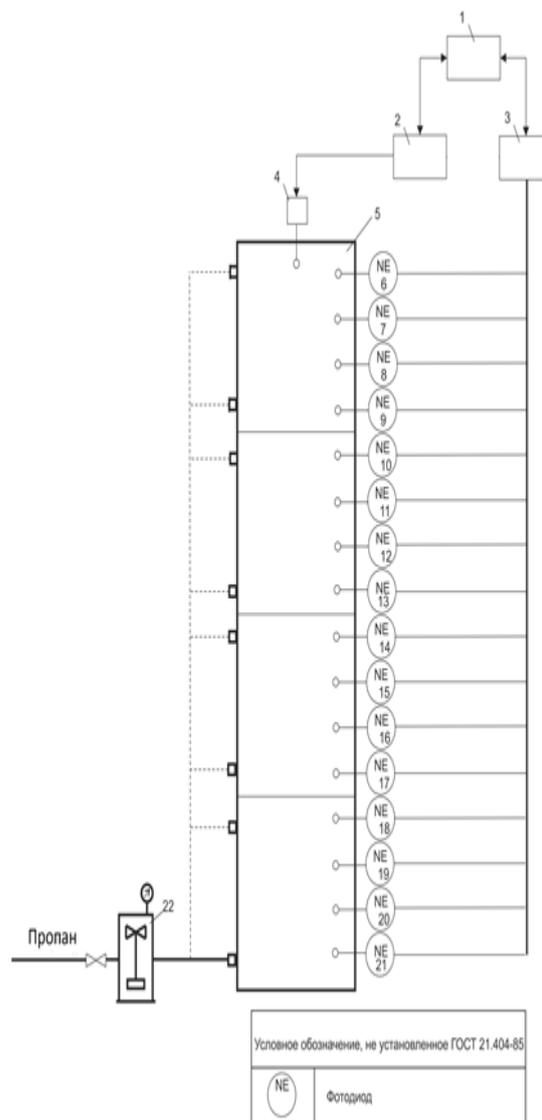


Рисунок 1 – Схема размещения регулярных препятствий

При проведении экспериментов в качестве горючего было предложено использовать имеющейся в наличии пропан и выполнять исследование для стехиометрической пропано-воздушной смеси. По результатам исследования необходимо получить экспериментальные данные о скорости распространения фронта пламени в зависимости от числа перегородок и энергии источника зажигания. На основе анализа экспериментальных данных необходимо определить влияние

различного числа перегородок и источников воспламенения с различной энергией на скорость нестационарного горения.

Для проведения исследования разработана экспериментальная установка, позволяющая измерять скорость распространения фронта горения пропано-воздушной смеси. Функциональная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.



1 – персональный компьютер; 2 – удаленный пульт управления; 3 – модуль АЦП LTR11; 4 – система воспламенения; 5 – реакционный сосуд установки; 6-21 – измерительные датчики; 22 – расходомер

Рисунок 2 – Функциональная схема установки для проведения экспериментальных исследований

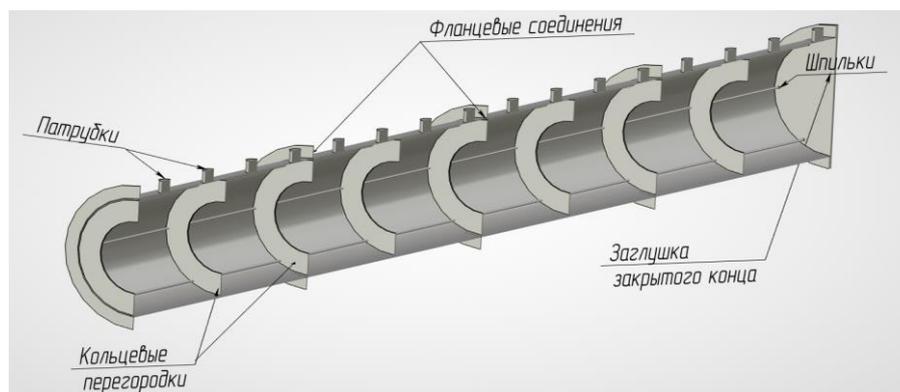


Рисунок 3 – Конструкция реакционного сосуда

Экспериментальная установка содержит реакционный сосуд, заполняемый требуемым объемом горючего газа – пропана. Количество газа, поступающего в сосуд, контролируется с помощью расходомера. Что позволяет точно задать требуемую концентрацию пропана. Для равномерного заполнения используется 8 патрубков для подвода газа, распределённых по длине реакционного сосуда. Поджиг газа осуществляется дистанционно системой воспламенения.

По длине экспериментальной установки расположены 16 точек регистрации мгновенной скорости фронта пламени (фотодиодных датчиков). Сигналы с фотодиодных датчиков регистрируются с помощью автоматизированной измерительной системы, состоящей из предварительных усилителей, модуля аналого-цифрового преобразования и персонального компьютера.

Автоматизированная измерительная система осуществляет следующие функции:

- предварительное усиление сигналов с фотодиодных датчиков;
- аналогово-цифровое преобразование сигналов фотодиодных датчиков;
- запуск системы воспламенения;
- регистрация измерительных данных;
- синхронизация работы функциональных блоков системы.

При проектировании геометрические размеры реакционного сосуда и кольцевых препятствий устанавливались исходя из анализа известных экспериментальных исследований [7–10], по результатам которого определены геометрические параметры труб и кольцевых препятствий, оказывающие эффективный турбулизирующий эффект на ускорение пламени.

Ускорение пламени эффективно на диаметрах труб, превышающих 0,1 м при степе-

ни затенения от 0,3 до 0,6. Это обусловлено тем, что для диаметров труб, меньших 0,1 м, эффективное ускорение пламени обеспечивается только использованием препятствий специальной формы [10]. Также это связано с тем, что на начальной стадии ускорение пламени наиболее эффективно для больших степеней затенения. Однако при дальнейшем ускорении для больших степеней затенения ускорение замедляется из-за увеличения потерь импульса на препятствиях. Кроме того, для обеспечения переноса результатов экспериментов в детонационной трубе на угловую шахту желательнее использование трубы большего диаметра. Достаточно большой диаметр трубы также позволит осуществить экспериментальные исследования опико-электронных датчиков, помещая их внутрь реакционного сосуда. При этом необходимо обеспечить удобство обслуживания установки и ее мобильность. Исходя из указанных соображений внутренний диаметр трубы (реакционного сосуда) был выбран равным 0,5 м при общей длине 4 м. Для удобства транспортировки реакционный сосуд состоит из четырех цилиндрических блоков, скрепленных фланцевым соединением (рисунок 3).

Поскольку экспериментальная установка представляет собой сосуд, работающий под внутренним избыточным давлением (до 1 МПа [2]), толщина стенки должна составлять не менее 3 мм в соответствии с расчетами по ГОСТ Р 52857.2-2007 [11].

С одного конца реакционный сосуд заглушен металлической крышкой, с другого конца – загерметизирован пленочной мембраной для обеспечения возможности заполнения горючим газом. Внутри труба содержит кольцевые перегородки (рисунок 4), предназначенные для турбулизации пламени, с параметрами $S=0.5$ м и $BR=0.3$. Указанные па-

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ ПРОПАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ТРУБЕ С КОЛЬЦЕВЫМИ ПЕРЕГОРОДКАМИ

раметры перегородок обеспечивают оптимальные условия развития взрывного горения. Перегородки соединяются между собой шпильками.

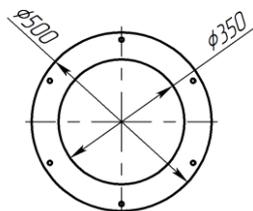


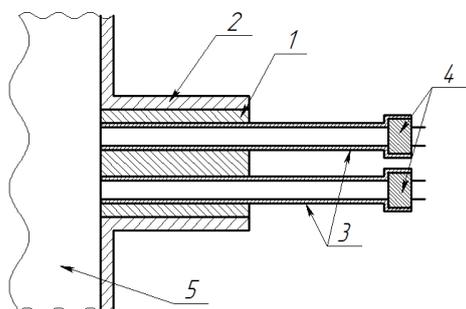
Рисунок 4 – Кольцевая перегородка

Поджиг выполняется у закрытого конца сосуда. В качестве воспламенителей используются электровоспламенитель – пережигаемая электрическим током вольфрамовая нить с энергией 0,5 Дж и пиротехнический воспламенитель с энергией 30 Дж.

Энергия электровоспламенителя в виде пережигаемой вольфрамовой нити определялась путем интегрирования по времени произведения осциллограмм тока и напряжения при ее пережигании в соответствии с ГОСТ Р МЭК 61241-2-3-99 [12]:

$$W = \int I(t)U(t)dt.$$

Фотодиодные датчики с помощью пробки 1, устанавливаются в патрубки 2 реакционного сосуда (рисунок 5). Фотодиодный датчик представляет собой пару фотодиодов, расположенных по направлению распространения фронта пламени (вдоль трубы) на расстоянии 15 мм друг от друга. Фотодиоды 4 с помощью гильзы 3 вынесены на расстояние 100 мм от края сосуда для уменьшения углового поля с целью более точного определения момента прохождения фронта пламени.



1 – пробка; 2 – патрубок; 3 – гильзы для фотодиодов; 4 – фотодиоды; 5 – реакционный сосуд

Рисунок 5 – Схема размещения фотодиодных датчиков

В качестве модуля аналого-цифрового

преобразования используется модуль L-783 фирмы L-card [13]. Запуск системы воспламенения выполняется с помощью удаленного пульта управления. Регистрация измерительной информации и синхронизация работы функциональных блоков системы осуществляются с помощью персонального компьютера.

На испытания установка поставляется в следующей комплектации:

- корпус установки (четыре цилиндрических блока, кольцевые перегородки);
- газовые шланги, баллон с газом, редуктор, расходомер;
- электровоспламенители и пиротехнические воспламенители;
- 16 датчиков скорости перемещения фронта пламени;
- автоматизированная измерительная система;
- кабели для организации линий связи, иницирования воспламенителя и питания.

На рисунке 6 представлена фотография установки, подготовленной к проведению испытания, и кадр видеосъемки при горении газа.



а



б

а – экспериментальная установка в сборе; б – экспериментальная установка в момент взрыва

Рисунок 6 – Фотографии экспериментальной установки

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика проведения испытаний заключается в выполнении следующих действий:

1. Установить на стапель цилиндрические блоки, соединить блоки фланцевым соединением.

2. Реакционный сосуд в сборе жестко закрепить на стапеле, исключив продольные и поперечные перемещения.

3. Смонтировать датчики скорости фронта пламени в патрубки установки и подсоединить к ним измерительные линии.

4. Установить воспламенитель через патрубок у заглушенного конца реакционного сосуда.

5. Перед проведением испытаний провести проверку готовности экспериментальной установки.

5.1 Проверить готовность системы инициирования процесса:

- подключить линию инициирования к воспламенителю;
- проконтролировать исправность воспламенителя;
- отключить линию инициирования от воспламенителя.

5.2 Проверить готовность измерительных линий и системы регистрации:

- зарегистрировать сигналы всех датчиков;
- сравнить полученные сигналы с ожидаемыми в начальный момент испытаний.

6. После подтверждения готовности системы инициирования, измерительных линий и системы регистрации установить на открытом конце установки плёночную мембрану, препятствующую свободному выходу газа из реакционного сосуда.

7. Подать в реакционный сосуд заданный

объём газа из баллона через редуктор РВ-90, настроенный на давление 40 кгс/см², и расходомер газа Гранд 1.6: по 6 м³ пропана в каждый из восьми патрубков подачи газа.

8. Выдержать паузу 15 минут для перемешивания пропана с воздухом в реакционном сосуде.

9. Подключить линию инициирования к системе запуска и дистанционно с пульта управления осуществить запуск процесса.

10. Выполнить регистрацию измеряемых параметров с помощью аналого-цифрового преобразователя и компьютера.

При проведении исследования изменяется число используемых перегородок и тип воспламенителя (пережигаемая электрическим током вольфрамовая нить и пиротехнический воспламенитель). Перегородки устанавливаются с шагом 0,5 м от закрытого конца трубы: первая на расстоянии 0,5 м, вторая – 1 м и т.д.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальное исследование проводилось на базе испытательной площадки предприятия АО «ФНПЦ «Алтай» по договору НИР №2129/17. При выполнении экспериментального исследования проведено 10 опытов с нестационарным горением пропано-воздушной смеси.

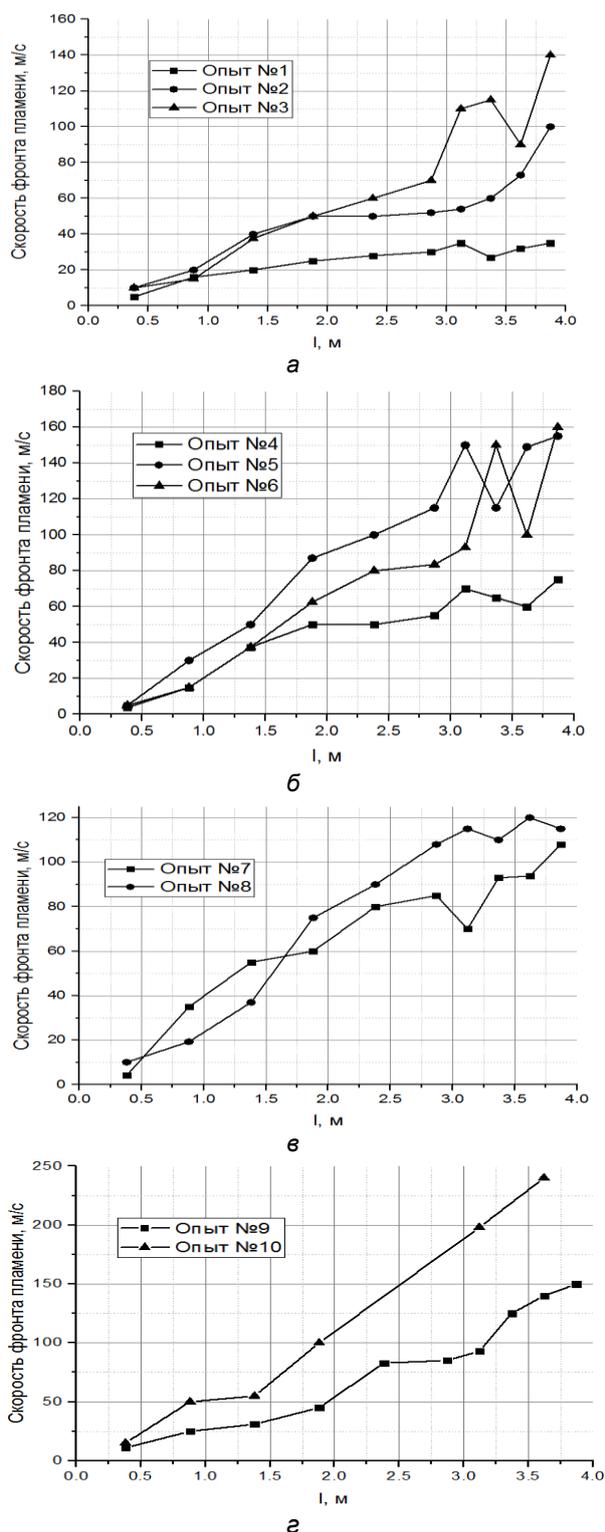
Условия проведения опытов представлены в таблице 1.

Результаты экспериментального исследования в виде зависимостей скорости фронта пламени в виде зависимости скорости фронта пламени по длине установки для проведенных опытов представлены на рисунке 7.

Таблица 1. Условия проведения опытов

№ опыта	Число перегородок	Тип воспламенителя, энергия, Дж	Максимальная скорость горения, м/с
1	1	Электровоспламенитель, 0,5 Дж	35
2	1	Пиротехнический воспламенитель, 30 Дж	100
3	1	Пиротехнический воспламенитель, 30 Дж	140
4	2	Пиротехнический воспламенитель, 30 Дж	75
5	2	Пиротехнический воспламенитель, 30 Дж	155
6	2	Пиротехнический воспламенитель, 30 Дж	160
7	3	Электровоспламенитель, 0,5 Дж	110
8	3	Электровоспламенитель, 0,5 Дж	120
9	4	Электровоспламенитель, 0,5 Дж	150
10	7	Электровоспламенитель, 0,5 Дж	240

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ ПРОПАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ТРУБЕ С КОЛЬЦЕВЫМИ ПЕРЕГОРОДКАМИ



а – опыты 1, 2, 3 с одной перегородкой;
 б – опыты 4, 5, 6 с двумя перегородками;
 в – опыты 7, 8 с тремя перегородками;
 г – опыты 9 и 10 с 4 и 7 перегородками соответственно

Рисунок 7 – Зависимость скорости фронта пламени по длине установки

На рисунке 7а показаны зависимости для одной перегородки. При этом максимальная скорость фронта при использовании электровоспламенителя (опыт № 1) достигает 35 м/с, а при использовании пиротехнического воспламенителя с большей энергией зажигания максимальная скорость возрастает – до 140 м/с. Опыты № 2 и 3 проводились в одинаковых условиях и полученные результаты хорошо согласуются между собой.

На рисунке 7б показаны зависимости для двух перегородок при применении пиротехнического воспламенителя. Из результатов видно, что опыты № 5 и 6 удовлетворительно согласуются между собой. При этом максимальная скорость фронта пламени составляет 160 м/с. В опыте № 4 максимальная скорость не превысила 75 м/с и не согласуется с опытами 5 и 6. Это может быть связано с нарушением условий проведения экспериментов, а именно отклонением концентрации смеси от стехиометрической из-за разгерметизации реакционного сосуда установки.

Данные о скорости фронта пламени по длине трубы, полученные при использовании трех перегородок и электровоспламенителя приведены на рисунке 7в. Максимальная скорость фронта пламени, полученная в опытах, составляет 120 м/с. Опыты № 7 и 8 проводились в одинаковых условиях и их результаты хорошо согласуются между собой.

На рисунке 7г приведены результаты опыта №9 при использовании четырех перегородок и результаты опыта №10 для семи перегородок. Воспламенение смеси в данных опытах производилось электровоспламенителем. В опыте №9 максимальная скорость фронта пламени достигает 150 м/с, а в опыте № 10 – 240 м/с.

Зависимость максимальной скорости фронта пламени от числа перегородок, полученной в опытах при воспламенении горючей смеси электровоспламенителем приведена на рисунке 8.

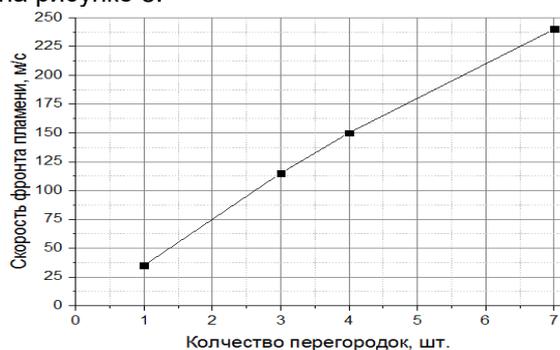


Рисунок 8 – Зависимость максимальной скорости фронта пламени от числа перегородок при воспламенении электровоспламенителем

В результате анализа результатов экспериментов определено влияние различного числа перегородок и источников воспламенения с различной энергией на скорость нестационарного горения

При использовании пиротехнического воспламенителя с большей по сравнению с электровоспламенителем энергией зажигания (в 60 раз) максимальная скорость фронта пламени увеличивается в 4 раза.

Для опытов при использовании электровоспламенителя с увеличением числа перегородок максимальная скорость фронта пламени практически линейно возрастает от 35 м/с для одной перегородки до 240 м/с для семи перегородок. Из зависимости видно, что при добавлении одной дополнительной перегородки максимальная скорость фронта пламени увеличивается приблизительно на 35 м/с.

Полученная зависимость скорости фронта пламени от числа перегородок согласуется с результатами исследований других авторов, приведенных в работах [14, 15]. В работе [14] рассматривалось влияние числа перегородок прямоугольной формы (от 1 до 3) на скорость распространения фронта пламени в трубе квадратного сечения. В данных исследованиях максимальная скорость фронта пламени увеличивалась приблизительно на 20 м/с с добавлением дополнительной перегородки.

ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В работах [1, 2] изложены подходы к компьютерному моделированию процесса нестационарного горения углеводородовоздушных смесей для условий, характерных для угольных шахт. Для моделирования турбулентного течения используется модель на базе осредненных нестационарных (URANS) уравнений Навье-Стокса. Для турбулентных переменных k и ϵ используется стандартная k - ϵ модель. Модель горения основана на одностадийной необратимой брутто реакции горения. Скорость брутто реакции описывается моделью вихревой диссипации (EDM), представленную в работе [16]. В качестве модели переноса энергии излучением используется диффузионная модель P-1. Расчет коэффициента поглощения продуктов горения осуществляется на базе модели взвешенной суммы серых газов (ВССГ) [1, 2].

Компьютерное моделирование выполнялось с помощью специализированного программного обеспечения FlowVision [17, 18] в

двумерной постановке для исходных данных, соответствующих проведению эксперимента (таблица 2).

Таблица 2. Исходные данные для проведения моделирования

Параметр	Значение
Граничные условия	Труба диаметром 0,5 м с одним закрытым и одним открытым концом и кольцевыми перегородками с параметрами $S=0,5$; $BR=0,3$, поджиг располагается у закрытого конца. Количество кольцевых перегородок - 7
Температура воспламенения (для поджига)	650 °C
Массовый стехиометрический коэффициент (пропан-воздух)	15,6
Температура смеси	20 °C
Давление	10 ⁵ Па

Для двумерной постановки задачи высота кольцевого препятствия определялась, как $h=(D/2) \cdot BR$ согласно [11] (рисунок 1).

Для проверки адекватности результаты компьютерного моделирования были сопоставлены с экспериментальными данными о зависимости скорости распространения фронта пламени от длины установки (рисунок 9).

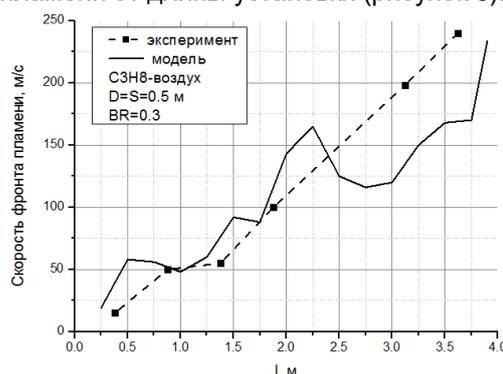


Рисунок 9 – Распределение скорости фронта пламени по длине установки

Экспериментальные данные о скорости фронта пламени и результаты расчетов на базе компьютерного моделирования хорошо согласуются друг с другом. Относительная погрешность расчета скорости не превышает 18%. Расхождения могут быть обусловлены неучтенными в модели потерями энергии, а

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2018

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ ПРОПАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ТРУБЕ С КОЛЬЦЕВЫМИ ПЕРЕГОРОДКАМИ

также объемными эффектами в реальной трехмерной трубе, не учитываемыми при двумерном моделировании.

По результатам проверки адекватности можно сделать вывод о том, что разработанная авторами компьютерная модель [1, 2] применима для расчета параметров нестационарного горения пропано-воздушных смесей в трубах с регулярными препятствиями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работ проведено экспериментальное исследование процесса нестационарного горения пропано-воздушной смеси.

Решены следующие задачи:

- разработана конструкция установки для проведения экспериментального исследования нестационарного горения;
- разработана методика проведения экспериментального исследования;
- проанализированы полученные экспериментальные данные;
- выполнена проверка адекватности компьютерной модели на экспериментальных данных, полученных на установке.

Конструкция установки содержит реакционный сосуд и автоматизированную измерительную систему. Реакционный сосуд экспериментальной установки представляет собой трубу с одним открытым концом, внутренним диаметром 0,5 м и длиной 4 метра. В реакционном сосуде размещались кольцевые перегородки с шагом установки $S=0.5$ м и степенью затенения сечения $BR=0.3$. Автоматизированная измерительная система выполняет запуск эксперимента и регистрирует сигналы фотодиодных датчиков для последующего определения скорости фронта пламени.

Методика экспериментального исследования заключалась в: подготовке экспериментальной установки к опыту; подаче пропана в реакционный сосуд; воспламенении смеси; выполнении регистрации измерительных данных.

Исследование проводилось для различного числа используемых перегородок и типов воспламенителей (электровоспламенитель и пиротехнический воспламенитель).

При использовании пиротехнического воспламенителя с большей энергией зажигания, чем у электровоспламенителя (0,5 Дж и 30 Дж соответственно) максимальная скорость возрастает в 4 раза.

С увеличением числа перегородок максимальная скорость фронта пламени практически линейно возрастает от 35 м/с для од-

ной перегородки до 240 м/с для семи перегородок. При добавлении одной дополнительной перегородки максимальная скорость фронта пламени увеличивается приблизительно на 35 м/с.

Разработанная компьютерная модель является адекватной и применима для расчета параметров нестационарного горения пропано-воздушных смесей в трубах с регулярными препятствиями. Относительная погрешность расчета скорости фронта пламени не превышает 18%.

Дальнейшая работа направлена на проведение экспериментальных исследований для перегородок с другими геометрическими параметрами. Также в ходе экспериментов предполагается дополнительно измерять температуру и давление в реакционном сосуде.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта №17-08-00844.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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).
2. 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 // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2017. – № 4 (Принято в печать).
3. Программно-аппаратный комплекс для управления многоточечной системой определения координат очага возгорания / Лисаков С.А., Кураев А.В., Сыпин Е.В., Павлов А.Н. // Ползуновский вестник. – 2014. – № 2. – С. 179–182.
4. 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.
5. Sapko, M. J., Weiss, E. S., & Watson, R. W. (1987b) Size scaling of gas explosions (23 pp.). U.S. Bureau of Mines RI 9136.
6. Васючков Ю. Ф. Горное дело: Учеб. для техникумов / Ю. Ф. Васючков. – М.: Недра, 1990. – 512 с.
7. Kuznetsov, M., Ciccirelli G., Dorofeev S., Alekseev V., Yankin Yu, and Kim T. H. DDT in Methane-Air Mixtures, Shock Waves, Vol. 12, 2002, pp. 215–220.
8. 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 ICERS, 2013, Taipei, Taiwan, pp. 1-6.
9. 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.

10. Ускорение перехода горения в детонацию в газах: от К. И. Щёлкина до наших дней/ С. М. Фролов // Физика горения и взрыва. – 2012. – № 3. С. 13-24.

11. ГОСТ Р 52857.2-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых плоских и днищ и крышек [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2008.

12. ГОСТ Р МЭК 61241-2-3-99 Электрооборудование, применяемое в зонах, опасных по воспламенению горючей пыли. Часть 2. Методы испытаний. Раздел 3. Метод определения минимальной энергии зажигания пылевоздушных смесей. Гостстандарт России, Москва. 1999. – 16 с.

13. ООО «Л КАРД» [Электронный ресурс] / Индустриальные системы управления и сбора данных. – Режим доступа: <http://www.lcard.ru/>

14. Zhiming, Q.U., 2010. Numerical study on shock wave propagation with obstacles during methane explosion. Appl. Mech. Mater. Trans Tech Publ. 114e118.

15. S. K. Kundu, J. Zanganeh. A Review on Understanding Explosions from Methane-Air Mixture. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 40, 2016, pp. 507-523.

16. 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.

17. FlowVision. Версия 3.09.04. Руководство пользователя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://flowvision.ru/index.php/public-downloads/category/8dokumentatsiyaflowvision?download=112:3-09-04-pdf-enu>

18. Маркова, Т.В. Развитие моделей горения в ПК flowvision [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

http://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_es12_tesis3.pdf

Лисаков Сергей Анатольевич, инженер каф. МСИА, БТИ (филиал) ФГБОУ ВПО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», Россия, 659305, Бийск, ул. Трофимова 27, тел.: (3854) 432450, e-mail: foxlsa@mail.ru

Сидоренко Антон Игоревич, канд. техн. наук, доцент каф. МСИА, БТИ (филиал) ФГБОУ ВПО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», Россия, 659305, Бийск, ул. Трофимова 27, тел.: (3854) 432450, e-mail: pan@bti.secna.ru

Сыпин Евгений Викторович, канд. техн. наук, профессор каф. МСИА, БТИ (филиал) ФГБОУ ВПО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», Россия, 659305, Бийск, ул. Трофимова 27, тел.: (3854) 432450, e-mail: sev@bti.secna.ru

Галенко Юрий Анатольевич, д.ф.-м.н., профессор, БТИ (филиал) ФГБОУ ВПО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», Россия, 659305, Бийск, ул. Трофимова 27, тел.: (3854) 432450, E-mail: gal@bti.secna.ru

Павлов Андрей Николаевич, канд. техн. наук, доцент каф. МСИА, БТИ (филиал) ФГБОУ ВПО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», Россия, 659305, Бийск, ул. Трофимова 27, тел.: (3854) 432450, e-mail: pan@bti.secna.ru