

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ

ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «МАКЕЕВСКИЙ НАУЧНО-  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТ  
В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»  
(МакНИИ)

на правах рукописи

**Безбородов Владимир Алексеевич**

УДК 622.411.33

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА И СРЕДСТВ  
ВЗРЫВОЗАЩИТЫ ГАЗОПРОВОДОВ СИСТЕМ  
УТИЛИЗАЦИИ ШАХТНОГО МЕТАНА**

Специальность 05.26.01 – «Охрана труда»

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель,  
доктор технических наук  
Кудинов Юрий Васильевич

Идентичность всех экземпляров диссертации ПОДТВЕРЖДАЮ:

Ученый секретарь диссертационного совета Д 01.008.01

д.т.н., доц.



И.А.Бершадский

Макеевка 2018 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ .....	5
РАЗДЕЛ 1	
СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА .....	12
1.1. Потенциальные объемы утилизации шахтного метана на угольных шахтах Донбасса .....	12
1.1.1 Метан в вентиляционных системах угольных шахт .....	15
1.1.2 Метан шахтных дегазационных систем .....	16
1.1.3 Метан, добываемый скважинами, пробуренными с поверхности .....	17
1.1.4 Способы извлечения метана из отработанных горизонтов и закрытых шахт .....	18
1.2. Анализ зарубежного опыта утилизации и обеспечение безопас- ности .....	18
1.3. Способы утилизации газа дегазационных систем на шахтах Донбасса .....	23
ВЫВОДЫ .....	26
РАЗДЕЛ 2	
АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ УТИЛИЗАЦИИ, СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИХ СРЕДСТВ ВЗРЫВОЗАЩИТЫ СТУШМ. ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЙ ЭКСПЕРИ- МЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	28
2.1. Сжигание кондиционного метана в тепло-генераторных установ- ках угольных шахт .....	29
2.2. Сжигание шахтного метана в двигателях теплоэлектростанций ...	31
2.3. Компримирование метана угольных месторождений .....	35

2.4. Утилизация некондиционных метановоздушных смесей . . . . .	37
2.5. Современное состояние средств взрывозащиты газотранспортных систем . . . . .	42
2.5.1 Огнепреградители . . . . .	43
2.5.2 Автоматические средства взрывозащиты газотранспортных систем СТУШМ . . . . .	46

ВЫВОДЫ . . . . .	51
------------------	----

### РАЗДЕЛ 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ТУШЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ . . . . .	54
3.1. Влияние толщины стенки трубопровода на процессы горения . . . . .	54
3.2. Совершенствование устройств тушения стабилизированного пламени . . . . .	61
3.3. Влияние роста давления исходной смеси на пределы горения МВС . . . . .	69
3.4. Оценка критического диаметра огнепреграждающего элемента с ростом давления . . . . .	75

ВЫВОДЫ . . . . .	79
------------------	----

### РАЗДЕЛ 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ТУШЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ТРУБОПРОВОДАХ . . . . .	81
4.1. Определение влияния толщины стенки на срезе «свечи» на процессы горения . . . . .	81
4.2. Экспериментальные исследования процессов горения и тушения пламени в трубопроводах . . . . .	85
4.3. Определение верхнего и нижнего пределов горения с повышением давления больше атмосферного . . . . .	103
4.4. Определение критического диаметра огнепреграждающего элемента с ростом давления . . . . .	107
4.5. Испытания устройства тушения пламени . . . . .	109

4.6. Определение аэродинамического сопротивления газовому потоку	111
4.7. Испытания устройства тушения пламени МВС на выполнение основной функции .....	113
ВЫВОДЫ .....	116
РАЗДЕЛ 5 .....	
ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ШАХТНОГО МЕТАНА. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	118
ВЫВОДЫ .....	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	126
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Характеристика установок .....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Патент на корисну модель №6809 .....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Техническое задание на устройство тушения стабилизированного пламени в газовых магистралях .....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Акт №3 на внедрение устройства тушения стабилизированного пламени .....	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Приказ №553 от 23.10.2008 г. ....	147

## ВВЕДЕНИЕ

Ежегодно дегазационные системы шахт Донбасса (47 шахт) извлекают 315-330 млн. м<sup>3</sup> метана, из которых только 140 млн. м<sup>3</sup> утилизируется (сжигают в шахтных котельных – 13 шахт, электрогазогенераторах – 3 шахты, факельных установках – 5 шахт, используют для заправки автомобилей – 1 шахта и обогрева воздухоподающих стволов – 2 шахты). Остальной каптируемый газ выбрасывается в атмосферу.

Более широкому использованию шахтного метана мешало отсутствие средств его утилизации (электрогазогенераторов и др.), средств взрывозащиты и нормативных документов по безопасности транспортирования и утилизации. В настоящее время налажен серийный выпуск целого ряда потребителей, позволяющих утилизировать даже небольшие объемы газа дегазации. Требования же по безопасности утилизации до последнего времени не было.

Безопасность транспортирования и утилизация шахтного метана в угольной промышленности зарубежных стран достигается организационно-техническими мерами и использованием средств взрывозащиты.

Установлено, что введение норм минимального содержания в газопроводах систем утилизации метана не устраняет возможность аварийного его воспламенения. В настоящей работе рассматриваются также вопросы разработки технических мер предотвращения вспышек и взрывов в системах газоподготовки и утилизации шахтного метана.

### **Общая характеристика работы.**

**Актуальность работы.** Ежегодно дегазационные системы шахт Донбасса извлекают 315-330 млн. м<sup>3</sup> шахтного метана. За последнее десятилетие объем утилизируемого шахтного метана увеличился с 25 до 140 млн. м<sup>3</sup> в год. Значительно расширился круг средств и способов его использования с применением технологий подготовки, таких как очищение, осушение и обогащение некондиционных (менее 25%) смесей природного газа. Учитывая, что дегазационная и система утилизации шахтного метана объединены общей сетью газопроводов,

возрастает опасность проникновения возгорания или взрыва метана из одной системы в другую. Горение и взрывы шахтного метана в трубопроводах случались неоднократно на шахтах: им.А.Ф.Засядько, «Краснолиманская», им.Ленинского Комсомола, «Юбилейная» (РФ) и др. Безопасность таких систем обеспечивается обязательным применением средств взрывозащиты. Решением проблем горения, взрывов метановоздушных смесей занимались такие значимые ученые как академик Зельдович Я.Б., доктор технических наук Булгаков Ю.Ф., доктор технических наук Дубнов Л.В., доктор технических наук Шевцов Н.Р., доктор технических наук Греков С.П., доктор технических наук Пашковский П.С., кандидаты технических наук Нецепляев М.И., Петрухин П.М., Сергеев В.С. и др. В решение проблемы безопасности транспортирования метановоздушной смеси в трубопроводах большой вклад внесен докторами технических наук Моревым А.М., Кудиновым Ю.В., Айруни А.Т., инженером Алидзаевым Е.Д.

Локализация и тушение пламени в газопроводах осуществляется применением огнепреградителей и автоматических систем обнаружения и подавления пламени. Основным недостатком огнепреградителей является их одностороннее действие: при движении пламени в направлении потока оно эффективно подавляется, при движении пламени навстречу потоку происходит его стабилизация и через некоторое время под воздействием температуры огнепреграждающий элемент разрушается. Системы автоматической взрывозащиты конструктивно сложны и дороги. Для защиты дегазационных систем на шахтах эффективно используется аварийный комплект взрывозащиты, состоящий из огнепреградителя (ОПС) и пламяподавителя (ПГА). Он срабатывает в автоматическом режиме, прост в изготовлении и обслуживании. Основным недостатком являются большие габариты и масса. Комплект взрывозащиты был испытан и рекомендован к использованию при давлениях газа не выше атмосферного.

На основании изложенного исследование процессов горения и тушения метановоздушных смесей (МВС) при давлениях  $P \geq 1$  в газопроводах для совершенствования существующих и создания новых средств взрывозащиты га-

зопроводов систем утилизации шахтного метана является актуальной научно-технической задачей.

**Степень разработанности.** Диссертационная работа выполнялась в соответствии с Государственной программой «Повышение безопасности труда на угледобывающих и шахтостроительных предприятиях (Постановление Кабинета Министров Украины №374 от 29.03.2006 г.) в рамках научно-исследовательской работы МакНИИ «Разработать СОУ-П 10.1.00174088.015:2008 «Транспортирование и использование метана, каптируемого дегазационными системами шахт. Требования безопасности», выполненной по заказу Минуглепрома Украины, № гос. регистрации 0104U010322. При выполнении этой работы автор диссертации был руководителем.

**Цель и задачи исследований.** Целью диссертационной работы являются экспериментальные установления количественных характеристик горения МВС на выхлопных трубах систем утилизации, в камерах кольцеобразного сечения, каналах огнепреграждающих элементов для обоснования направлений совершенствования способа и устройства тушения пламени в системах газопроводов и утилизации шахтного метана, обеспечивающих надежную их взрывозащиту.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ отечественного и зарубежного опыта утилизации шахтного метана, существующих способов и средств взрывозащиты систем газопроводов угольных шахт;
- оценить возможности тушения стабилизированного огнепреградителем пламени продуктами горения транспортируемой смеси при давлениях выше атмосферного;
- провести экспериментальные исследования горения МВС в камерах различного сечения и установить количественные характеристики обеспечения взрывозащиты в зависимости от характеристик МВС и параметров устройств тушения пламени;

- исследовать влияние характеристик МВС на изменение ее концентрационных пределов горения и гашение пламени в каналах огнепреграждающих элементов;
- разработать конструкцию устройств тушения пламени продуктами горения части транспортируемой МВС в камерах различной формы и сечения, провести экспериментальные исследования для установления оптимальных технических параметров;
- разработать предложения в отраслевой стандарт по требованиям безопасности использования метана, каптируемого дегазационными системами шахт.

**Объект исследований** – обеспечение безопасности транспортировки МВС в шахтных системах газопроводов.

**Предмет исследований** – процессы горения шахтного метана, локализации и тушения пламени шахтного метана устройством взрывозащиты при различных параметрах шахтного метана в шахтных системах утилизации.

**Научная новизна** работы заключается в установлении закономерностей процессов горения и тушения МВС в условиях их протекания в сети промышленных газопроводов для разработки параметрического ряда устройств тушения пламени, обеспечивающих взрывобезопасность работ систем газоподготовки и утилизации шахтного метана.

**Теоретическая и практическая значимость работы** состоит в том, что:

- обоснована возможность тушения стабилизированного огнепреградителем пламени продуктами горения транспортируемой смеси из двух изолированных камер;
- установлено влияние толщины стенки торца трубопровода на устойчивость горения МВС;
- разработан и утвержден отраслевой стандарт СОУ-П 10.1.00174088.015:2008 «Транспортирование и использование метана,

- капотируемого дегазационными системами шахт. Требования безопасности»;
- разработано техническое задание на устройство тушения стабилизированного пламени продуктами сгорания транспортируемой МВС в газовых магистралях;
  - разработан параметрический ряд устройств тушения стабилизированного огнепреградителем пламени в газотранспортных трубопроводах систем утилизации;
  - опытные образцы устройства тушения пламени испытаны и внедрены на ПАО «ШАХТОУПРАВЛЕНИЕ «ПОКРОВСКОЕ» для взрывозащиты газотранспортной системы котельной шахты; и на ЧАО «ПОИСК, А.С.» для взрывозащиты поверхностной вакуум-насосной станции (ПВНС), подающих МВС на утилизацию.

**Методология и методы исследований.** Работа выполнялась в соответствии с разработанной методикой, включающей экспериментальные, аналитические и математико-статистические методы исследований. В работе для установления параметров устройства взрывозащиты газопроводов систем утилизации проводились эксперименты на стандартном оборудовании при различных характеристиках МВС. Исследования проводились также на лабораторных стендах, моделирующих газотранспортную систему утилизации шахтного метана. Обработка данных экспериментальных исследований выполнялась методами математической статистики.

**Научные положения, выносимые на защиту, и их новизна** заключаются в том, что:

1. Получил дальнейшее развитие способ тушения стабилизированного пламени транспортируемой в трубопроводе смеси продуктами её горения в изолированной кольцевой камере, путем создания в ней второго фронта горения, что позволило увеличить в 2 раза количество огнегасящих газов и уменьшить диаметр устройств в 1,65 раза.

2. Впервые экспериментально установлено изменение критического диаметра горения шахтного газа с 3,6 до 4,2 мм при росте давления и концентрации в системе утилизации от 0,05 до 2,0 МПа, что позволило установить оптимальные параметры устройства тушения пламени.
3. Впервые обоснована минимально допустимая концентрация шахтного газа в системах газоподготовки к утилизации при давлениях более 0,6 МПа для газопоршневых двигателей – 30%, а для турбин электро-теплоагрегатов – 35%.

**Личный вклад соискателя** состоит в формировании цели и задач исследований, разработке методов их проведения, научных положений и их новизны, проведении аналитических и экспериментальных исследований, обобщении и систематизации результатов исследований, создании и внедрении разработанных средств взрывозащиты в газопроводах систем утилизации шахтного метана.

**Достоверность и обоснованность научных положений**, выводов и рекомендаций работы подтверждена необходимым объемом экспериментальных данных, полученных на натурных моделях газотранспортных систем при изучении горения и тушения МВС, разработке и внедрении устройства взрывозащиты объектов газоподготовки и утилизации шахтного метана (патенты №68509, №22381), а также удовлетворительной сходимостью аналитических и экспериментальных результатов.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты работы обсуждались на второй Международной научно-практической конференции «Пути повышения безопасности в угольной отрасли» (Макеевка: МакНИИ, 2007), Международной научно-практической конференции «Добыча и использование газа метана, привлечение инвестиций» (Донецк, СВУ «Эксподонбасс», 2009), на 1-й Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса» в рамках 1-го Международного форума ДНР 20-22 мая 2015 г. (Донецк, 2015), на Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 20-летию принятия Федерального закона №116-ФЗ «О промыш-

ленной безопасности опасных производственных объектов» (Москва, ЗАО НТЦ ПБ, 2017), на заседании Ученого Совета МакНИИ и его Горных секций.

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 10 статьях в изданиях, входящих в Перечень ВАК Украины, одна из которых опубликована в сборнике «Взрывное дело» академии горных наук России. (Москва, 2006) и в двух патентах на полезную модель.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 разделов, выводов, 5 приложений, списка использованной литературы. Общий объем диссертации составляет 146 стр., из них основной текст содержит 15 таблиц, 39 рисунков.

## РАЗДЕЛ 1

### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

#### 1.1 Потенциальные объемы утилизации шахтного метана на угольных шахтах Донбасса

В Донбассе в угольных пластах и вмещающих породах по различным оценкам содержится от 12 до 27 триллионов кубометров горючего газа [1]. Метан содержится в угольных месторождениях в трех состояниях: свободном, сорбированном и растворенном в воде. Большая часть его (более 80%) сорбирована углем, находящимся сосредоточенным в угольных пластах и рассеянным в породном массиве. Извлечение метана (дегазация) из массива возможно при условии нарушения сорбционного равновесия и увеличения проницаемости углепородного массива, по которому газ движется к скважинам.

Газ, извлекаемый дегазационными установками угольных шахт, относится к природным газам по происхождению, своим свойствам и составу аналогичен природному газу. В таблице 1.1 приведены составы газов некоторых шахт Украины и природного газа некоторых разных месторождений.

Таблица 1.1

Составы газов шахт Украины и природного газа

Шахта, месторождение	Содержание горючих газов, %					Всего гомо- логов	Сум- ма, %	Предел горючести	
	водо- род	метан	этан	про- пан	бутан			ниж- ний	верх- ний
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
«Чайкино»	0,003	96,00	0,250	0,006	0,007	0,263	96,27	5,29	14,99
«Щегловская- Глубокая», ш/у «Донбасс»	0,025	89,00	0,480	0,009	0,000	0,489	89,51	5,28	14,99
им. А.Ф.Засядько	0,150	94,00	3,380	0,840	0,260	4,480	98,63	5,10	14,81

Окончание таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
«Комсомолец Донбасса»	0,000	95,00	0,050	0,000	0,000	0,050	95,05	5,30	15,00
«Красноармей- ская-Западная №1»	0,000	97,00	0,040	0,031	0,009	0,080	97,08	5,30	15,00
«Хрустальская»	0,000	97,00	0,084	0,010	0,000	0,094	97,09	5,30	15,00
«Коммунист»	0,000	96,00	0,015	0,001	0,000	0,016	96,02	5,30	15,00
им. М.И.Кали- нина	0,001	94,00	0,010	0,000	0,000	0,010	94,01	5,30	15,00
Уренгойское (Россия)	0,000	97,88	0,820	0,000	0,000	0,820	98,70	5,27	14,98
Медвежье (Россия)	0,000	99,20	0,120	0,000	0,001	0,121	99,32	5,30	15,00
Газлинское (Узбекистан)	0,000	94,70	3,700	0,120	0,400	4,220	98,92	5,12	14,83

Газ, поступающий на поверхность ВНС, содержит значительную часть воздуха. Это связано с подсосами в скважины и дегазационный трубопровод. Содержание газов в дегазационных системах приведено в таблице 1.1.1.

Шахтный газ по условиям добычи, обеспечения безопасности, транспортирования и утилизации подразделяется на:

- метан, поступающий и транспортируемый в вентиляционных системах шахт;
- метан, добываемый методами дегазации из горных выработок;
- метан, каптируемый скважинами с поверхности;
- метан, извлекаемый из отработанных горизонтов закрытых шахт.

Таблица 1.1.1 – Содержание газов в дегазационных системах угольных шахт

№ п/п	Шахта	Место отбора проб	Содержание, %							
			He	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	по-сле C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	CO <sub>2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	ШУ «Покровское»	Поверхностные дегазационные скважины	0,12	0,00	92,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	Шахта «Чайкино»	Дегазационный трубопровод на ВНС	0,02	0,00	27,8	-	0,05	0,02	0,03	-
3	Шахта им. С.М.Кирова	Дегазационный трубопровод на ВНС	0,00	0,00	19,3	-	0,04	0,002	0,002	-
4	Шахта «Холодная Балка»	Дегазационный трубопровод на ВНС	0,11	0,00	39,0	-	0,00	0,00	0,00	-
5	Шахта им. В.М.Бажанова	Дегазационный трубопровод на ВНС	0,10	0,00	26,0	-	0,10	0,02	0,03	-
6	Шахта «Краснолиманская»	Дегазационный трубопровод на ВНС	0,026	0,00	45,6	0,15	0,028	0,015	-	3,7
7	Шахта «Белореченская»	Дегазационный трубопровод на	0,011	0,001	26,0	0,029	0,008	0,0017	-	0,9

		ВНС								
--	--	-----	--	--	--	--	--	--	--	--

Окончание таблицы 1.1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
8	Шахта «Щеглов- ская- Глубокая»	Дегазаци- онный тру- бопровод на ВНС	0,009	0,002	46,0	0,74	0,084	0,015	-	0,6
9	Шахта «Степная»	Дегазаци- онный тру- бопровод на ВНС	0,00	0,00	24,0	0,008	0,00	0,00	0,00	0,00
10	Шахта «Коммунар- ская»	Дегазаци- онный тру- бопровод на ВНС	0,00	0,00	59,5	0,027	0,00	0,00	0,00	0,00
11	Шахта «Комсомо- лец Донбасса»	Дегазаци- онный тру- бопровод на ВНС	0,063	0,025	46,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,3

### 1.1.1 Метан в вентиляционных системах угольных шахт

По данным МакНИИ концентрация метана в исходящей вентиляционной струе шахты достигает 0,75%, однако средней для газовых шахт следует считать концентрацию 0,50%. Смеси с таким содержанием метана в нормальных условиях не горят.

Для утилизации таких смесей в настоящее время ведутся работы по созданию специальных камер сгорания, обеспечивающих экономическую эффективность этого процесса.

Использование исходящей вентиляционной шахтной струи в качестве дутья в топках котельных и других потребителей не вызывает технических

трудностей и определяется только экономической целесообразностью. С точки зрения возможности взрывов такие смеси не представляются опасными [1].

### 1.1.2 Метан шахтных дегазационных систем

Дегазацию на угольных шахтах осуществляют с целью обеспечения газовой безопасности горных выработок. Дегазационная система представляет собой сеть газопроводов, по которым с помощью вакуум-насосов метан из мест выделения отводится на поверхность [2].

Наибольшее распространение получили дегазация из пластов-спутников, путем отсасывания метана через скважины, пробуренные из горных выработок, и дегазация выработанного пространства отводом метана отростками газопровода («свечами»).

При эксплуатации и проектировании дегазационных систем практически не учитывалась необходимость утилизации каптируемого метана. Это привело к созданию устойчивой тенденции к снижению со временем среднего содержания метана в отсасываемой смеси: так в 1965 и 1970 годах оно составляло соответственно 40 и 41%, а в последние 10 лет всего 22-25%.

Более полная информация об объемах горючего в МВС, транспортируемой шахтными дегазационными системами, представлена в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Метанообильность шахт и объёмы метана,  
каптируемого вакуум-насосными станциями

Год	Количество шахт с дегазацией	Добыча угля, млн. т/год	Метановыделение, тыс. м <sup>3</sup> /сут		Относительная метанообильность, м <sup>3</sup> /т	Средняя эффективность дегазации шахт, %
			всего	каптировано дегазацией		
1	2	3	4	5	6	7
2000	84	51,9	2682,71	445,95	51,7	17
2001	77	43,5	1989,38	377,67	45,8	19

2002	73	34,3	1768,23	310,75	51,6	18
2003	65	28,5	1411,87	274,45	49,5	19

Окончание таблицы 1.2

1	2	3	4	5	6	7
2004	64	27,4	1316,56	207,9	48,0	16
2005	52	29,9	1133,83	210,59	38,0	19
2006	51	30,3	1220,05	248,63	40,3	20
2007	44	30,8	1192,79	254,71	38,7	21
2008	43	30,9	1251,76	259,82	40,5	21
2009	47	34,7	1175,57	254,96	33,9	22
2010	44	34,7	1100,00	263,5	31,7	24
2011	41	34,4	1021,42	269,06	29,7	26
2012	38	32,6	1328,62	314,80	40,8	24
2013	43	28,3	803,8	250,5	28,4	31
2014	43	34,1	1006	306,4	29,5	30,5

Можно отметить, что транспортирование МВС большинства ВНС представляет определенную опасность, которая увеличивается при сжигании смесей с содержанием горючего вблизи нормы (25%). В этих случаях постоянно имеется пламя горения и не исключается возможность образования в аварийном режиме взрывчатых смесей в трубопроводах.

### **1.1.3 Метан, добываемый скважинами, пробуренными с поверхности**

Этот газ извлекается из горных пород шахтных полей или разведанных участков угольного месторождения с газовыми залежами последнего [3,4]. Состав выделяющегося в этих случаях газа и его давление практически одинаковы. Газ требует лишь минимальной подготовки к применению, так как в нем отсутствуют кислород и ядовитые примеси. Технологические процессы добычи и транспортирования газа указанным способом практически не отличаются друг от друга.

Однако при бурении и эксплуатации скважин в пределах шахтного поля не исключается воздействие горных работ в шахтах на сохранность скважин, их герметичность и состав каптируемой смеси.

В настоящее время эти способы добычи метана в Донбассе находятся на стадии исследований и опытно-промышленной проверки техники и технологий их промышленной реализации. В этой связи необходимо установить максимальное расстояние между скважинами и выработанным пространством шахт, при котором может иметь место гидравлическая связь между ними.

#### **1.1.4 Способы извлечения метана из отработанных горизонтов и закрытых шахт**

В Донбассе имеется большое количество отработанных горизонтов и закрытых шахт, выработанные пространства которых заполнены газом с высоким содержанием метана [5,6].

Дегазация закрытых шахт в Донбассе осуществлялась исключительно с целью предотвращения проникновения метана на поверхность. Многолетние исследования МакНИИ, в которых автор принимал непосредственное участие, показали, что максимальные дебиты метана наблюдаются на полях незатопленных закрытых шахт, расположенных на антиклинальных и купольных структурах, а также разрабатывавших пласты с высокой газоносностью [8].

Извлечение метана из закрытых шахт имеет хорошую перспективу. Однако технико-экономическая целесообразность этого способа требует специальных исследований и проработок.

#### **1.2. Анализ зарубежного опыта утилизации и обеспечение безопасности**

Использование шахтного метана в странах Европы [7] началось практически сразу после промышленного применения дегазации (Германия – 1947, Бельгия – 1949 и т.д.) и уже в семидесятых годах объемы его использования в

основных угледобывающих странах составляли ежегодно сотни миллионов кубометров.

В Англии, ФРГ, Франции и Бельгии [8, 9, 10, 11, 12] добычу газа из закрытых шахт начали осуществлять в начале 60-х годов прошлого столетия с целью предотвращения его неорганизованного выхода на земную поверхность и утилизации. Из выработанных пространств газ каптировался по трубопроводам, проложенным через герметичные перемычки ликвидированных вентиляционных стволов.

Опыт дегазации закрытых шахт показал, что объемы извлечения метана из выработанных пространств могут быть настолько велики, что использование его в качестве источника энергии экономически оправдано.

Так, в Саарском бассейне из закрытой в 1959 году шахты «Барбара» за 16 лет было каптировано 200 млн. м<sup>3</sup> метана. Из бельгийской шахты «Фонтен Л'эвек» за 6 лет извлечено 89 млн. м<sup>3</sup> метана (таблица 1.3).

Таблица 1.3

Сведения об объемах извлечения метана из выработанных пространств закрытых шахт через герметичные перемычки вентиляционных стволов

Шахта	Продолжительность извлечения метана, лет	Объем извлеченного метана, млн. м <sup>3</sup>	Средний дебит метана, м <sup>3</sup> /мин	Среднее содержание метана в каптируемом газе, об. %
1	2	3	4	5
Шахта «Сен-Шарль», Лотарингия	16	274	32,6	58
Шахта «Сент-Фонтен», Лотарингия	9	180,1	38,0	54

Окончание таблицы 1.3

1	2	3	4	5
Шахта «Барбара», Саарский бассейн	16	200	23,8	нет данных
Шахта «Фонтен Л'эвек», Бельгия	6	89	28,2	нет данных
Шахта «Авон», Англия	1	7,1	13,6	44

Способ добычи метана из закрытых шахт путем создания разрежения в устьях загерметизированных стволов являлся единственным до того момента, когда в 1975 году на шахте «Новиль» (закрыта в 1950 г.) начали осуществлять работы по дренированию метана через скважины, пробуренные с поверхности.

На выработанные пространства шахты пробурили четыре скважины глубиной 110-250 м и обсадили трубами с внутренним диаметром 95-115 мм. Затем через них подвергли гидрорасчленению окружающие породы давлением 25 бар. Скважинами, под избыточным давлением 88 мм рт.ст., дренировалось 14 м<sup>3</sup>/мин газа с содержанием метана 74-77%, а под разрежением 130 мм рт.ст. – до 27 м<sup>3</sup>/мин газа. Общий дебит каптированного метана за 1979-80 гг. составил 14 млн. м<sup>3</sup> [7, 8].

Этот же способ в 1977 г. применили на шахте «Брюэ» №5, закрытой в 1969 г. Здесь пробурили две скважины глубиной 210 и 222 м до пересечения выработанного пространства. По каждой из них под избыточным давлением 15 мм рт.ст. дренировалось 4,4-4,8 м<sup>3</sup>/мин газа с содержанием метана 66-69%. После подключения скважин к вакуум-насосу суммарный дебит газа составил 40 м<sup>3</sup>/мин. К 1980 г. из закрытой шахты «Брюэ» №5 извлечено 15 млн.м<sup>3</sup> метана со средним расходом 18,5 м<sup>3</sup>/мин.

Таким образом, зарубежный опыт показывает, что каптаж метана из выработанных пространств закрытых шахт и отработанных горизонтов позволяет

не только предотвращать проникновение газа на поверхность и в действующие выработки, но и получать доход от утилизации извлекаемого метана.

Анализ геологических и технических условий шахт, где осуществлялась добыча газа, позволил выявить следующие основные характерные их особенности:

- высокий (от 13 до 112 м<sup>3</sup>/мин) дебит метана по стволам к моменту их ликвидации;
- выработанные пространства имеют аэродинамическую связь с атмосферой через малое количество выработок, выходящих на поверхность;
- выработанные пространства не затапливаются.

Высокий дебит метана из шахт к моменту закрытия обусловлен тем, что мощность вынимаемых пластов, как правило, превышала 2,0 м. Пласты меньшей мощности остаются в недрах и, разгружаясь от горного давления, отдают большие объемы метана. Скорость подвигания очистных забоев велика, поэтому значительное количество газа из сближенных пластов выделяется за пределами действующих лав, после прекращения очистных работ. Промежуток времени между прекращением добычи угля и засыпкой стволов не превышает несколько месяцев.

Месторождения Франции и Германии покрыты мощными меловыми отложениями, поэтому обеспечивается качественная герметизация выработок, что позволяет отсасывать газ под разрежением более 100 мм рт.ст. без подсосов атмосферного воздуха.

В США разрабатывается проект использования дренажного шахтного метана (содержание 60-70%) в топливном элементе с получением 250 кВт электроэнергии, направляемой в электросеть [13]. В США Покахонтас ГЭС извлекает метан из угольных пластов через более чем 600 скважин в количестве около 1,5 млн.м<sup>3</sup> газа в сутки, а по расчетам можно извлечь более 3,64 млн.м<sup>3</sup> [14].

Подобные технологии добычи метана угольных месторождений используются также в Великобритании, Германии, Чехии, Китае, Австралии и других странах.

Единый комплекс процессов добычи, газоподготовки и утилизации шахтного метана существенно повышает экономическую эффективность угледобычи и играет важную роль в улучшении экологической ситуации Земли.

Процесс утилизации шахтного газа в большинстве стран поддерживается внутренним законодательством, выдачей лицензий и содействием заинтересованных организаций.

Учитывая специфику технологий использования МВС угольных предприятий с различной концентрацией метана, особое внимание уделяется вопросам взрывобезопасности процессов транспортирования, газоподготовки и утилизации.

Безопасность транспортирования и утилизации шахтного метана в угольной промышленности зарубежных стран достигается организационно-техническими мерами и использованием средств взрывозащиты.

К первым следует отнести нормирование содержания горючих газов в транспортируемой смеси. В разных странах нормы минимального содержания метана неодинаковы и находятся в пределах от 20 до 40%. Отличие в нормах определяется различным подходом к оценке безопасности. Верхний предел нормы (40% метана) определен из необходимости обеспечения в смеси содержания кислорода не более 12,5%, при котором метановоздушная смесь не горит независимо от концентрации горючего. В других странах норма определяется исходя из верхнего предела горючести метана (16%), установленного коэффициента запаса и точности используемых приборов контроля.

При снижении содержания метана ниже нормы происходит автоматическое отключение подачи МВС потребителю. В отдельных нормативах предусмотрен двухступенчатый механизм отключения газа: при концентрации метана 30% включается предупредительный сигнал о необходимости принятия мер по повышению содержания горючего, а при дальнейшем падении до 20% про-

исходит отключение всей транспортной системы или только подача потребителю.

В качестве технических мер за рубежом используют меры контроля кислорода и т.д. и отключающую аппаратуру, а также огнепреградители и автоматические системы взрывозащиты.

### **1.3. Способы утилизации газа дегазационных систем на шахтах Донбасса**

В Донбассе впервые шахтный метан начали использовать в 1954 году на шахте «Красная Звезда», затем на шахтах им.17-го Партсъезда, №3-бис, №11, №43 шахтоуправления №2-43 и др. В основном это были шахты Торезско-Шахтерского района Донбасса, разрабатывавшие антрацитовые пласты угля, и имеющие высокую газообильность горных выработок. Позже газ начали использовать и на шахтах Донецко-Макеевского и Боково-Хрустальского угленосных районов.

Извлекаемый газ применялся только в шахтных котельных установках, кроме шахтоуправления №11, где метан подавали для отопления столовой и общежития.

В 1974 году из 100 шахт, применявших дегазацию, газ утилизировался только на 21 из них. Это было вызвано тем, что правилами безопасности использование газа от дегазации для промышленных котельных разрешалось при содержании метана в каптируемой смеси не менее 30%. В то же время на большинстве шахт концентрация метана в смеси не превышала 30%.

В настоящее время в Донбассе сжигание кондиционного метана в котельных используется на 10 шахтах Донбасса (таблица 1.4).

Таблица 1.4

Сведения о количестве каптированного и утилизируемого метана  
на шахтах Донбасса по состоянию на октябрь-ноябрь 2013 года

№ п/п	Шахта, ГП	Объем капти- рованного метана, тыс.м <sup>3</sup> /сут	Способ утилизации	Объем утилизи- руемого метана, тыс.м <sup>3</sup> /сут	Доля утилизируе- мого метана от каптиро- ванного, %
1	2	3	4	5	6
1.	Им. М.И.Калинина	3,1	Сжигание в шахт- ной котельной	3,1	100
2.	Шахтоуправление «Донбасс»	50,4	Сжигание в шахт- ной котельной, когенерация	до 40,0	до 79,4
3.	Им.В.М.Бажанова ГП «Макеевуголь»	27,6	Сжигание в шахт- ной котельной	13,6	49,3
4.	Им. С.М.Кирова ГП «Макеевуголь»	10,6	- " -	9,5	89,6
5.	«Холодная Балка» ГП «Макеевуголь»	24,2	- " -	13,7	56,6
6.	«Чайкино» ГП «Макеевуголь»	10,8	- " - обогрев ствола	9,2	85
7.	«Краснолиманская»	40,3	- " - когенерация	23,0	57
8.	ПАО «Ш/у «Покровское»	108-120	- " - когенерация	до 120	100
9.	«Суходольская – Восточная»	79,2	- " - когенерация	79,2	100
10.	«Хрустальская» ГП «Донбассантра- цит»	7,3	Сжигание в шахт- ной котельной	7,3	100

Принимая во внимание данные таблицы 1.4 и перспективы совершенствования работ по дегазации, можно предположить увеличение в ближайшее время объемов утилизации метана.

Таким образом, проведенный анализ зарубежного опыта показывает следующие возможные пути утилизации шахтного метана:

- закачка метана в газопроводы;
- сжигание в шахтных котельных;
- использование в качестве горючего для двигателей внутреннего сгорания;
- для работы генераторных установок и электростанций;
- использование для бытовых нужд;
- для кирпичных заводов (обжиг кирпича);
- в качестве химического сырья;
- на коксующих установках.

Все рассмотренные реализованные проекты утилизации шахтного газа за рубежом предусматривают обязательное применение средств взрывозащиты. В значительной степени системы утилизации оборудуются автоматическими системами обнаружения и тушения пламени.

Следует отметить, что проектирование и эксплуатация переведенных на шахтный метан котельных осуществляется в соответствии с СОУ 10.1.00174088.001-2004 «Дегазация угольных шахт. Требования к способам и схемы дегазации», «Требованиями к безопасной эксплуатации дегазационных систем» и «Правилами газового хозяйства», где недостаточно учтены условия утилизации МВС и не регламентировано применение средств взрывозащиты.

## ВЫВОДЫ

Ресурсы шахтного метана в Донбассе оцениваются в 27 трл.м<sup>3</sup>. В настоящее время из 12 реализованных проектов систем утилизации шахтный газ в значительном объеме используется как топливо для шахтных котельных.

Опыт утилизации шахтного метана за рубежом свидетельствует о том, что извлекаемый дегазационными системами газ употребляется для различных промышленных и бытовых нужд, в зависимости от технической рациональности. Всемирное использование метана угольных месторождений стимулируется не только экономической целесообразностью в мировых угледобывающих странах, но и законодательством. Дополнительный интерес к метану вызывает международные соглашения, инициирующие торговлю квотами на вредные выбросы в атмосферу. Сжигание шахтного газа в энергетических установках приносит не только экономическую прибыль, но и способствует снижению экологической опасности, связанной с разрушением озонового слоя земной атмосферы.

Учитывая возможности дегазационных систем шахт Донбасса (объемы и концентрации) наиболее рациональными направлениями [15, 16] утилизации кондиционного (более 25%) шахтного метана являются:

- сжигание в топках котельных, сушильных камер и воздухонагревательных установках;
- использование в качестве горючего в газотурбинных установках и электрогенераторах с дизельными и внутреннего сгорания двигателями;
- заправка баллонов высокого давления на специальных автоматических газонаполнительных конденсатных станциях (АГНКС) для автотранспорта.

Практический интерес представляет утилизация некондиционных (менее 25%) метановоздушных систем и метана вентиляционных струй. Наиболее перспективным является использование этих смесей посредством обогащения до

кондиционных, добавление инертных газов и подачи дутьевым способом в топки тепло-генераторных установок.

В зарубежной практике для обеспечения взрывозащиты систем утилизации наряду с организационными мероприятиями широко применяются средства взрывозащиты, позволяющие локализовать либо подавить возникший очаг горения.

В этой связи следует отметить, что положения, изложенные в НПАОП 0.00-1.20-98 «Правила безопасности систем газоснабжения Украины» [85] не распространяются на объекты газопотребления и транспортировки шахтного метана. Кроме того, отечественные средства взрывозащиты, пригодные для обеспечения безопасности работ систем газоподготовки и утилизации метана дегазационных систем угольных шахт, отсутствуют.

Для решения обозначенной проблемы необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать условия эксплуатации выбранных способов утилизации и выявить недостатки действующих нормативных документов для обеспечения взрывобезопасности;
- провести анализ существующих способов и средств взрывозащит, выбрать направления исследований и разработать устройство тушения пламени, обеспечивающее взрывобезопасность работы систем газоподготовки и утилизации шахтного газа.

При решении этих задач предполагается выполнить аналитические исследования способов утилизации шахтного метана, определить возможность образования взрывчатых концентраций в трубопроводах систем утилизации.

На основании полученных результатов планируется создать экспериментальные стенды по изучению процессов горения и тушения пламени, разработать методики экспериментальных исследований и провести требуемый объем исследований.

## РАЗДЕЛ 2

### АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ УТИЛИЗАЦИИ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИХ СРЕДСТВ ВЗРЫВОЗАЩИТЫ СТУШМ. ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основываясь на анализе зарубежного опыта [6-9,11,13,14] и учитывая возможности дегазационных систем шахт Донбасса, можно основные пути утилизации шахтного метана представить в виде отдельных направлений, объединенных похожими способами и средствами утилизации.

Первое основное направление утилизации шахтного метана включает способы, базирующиеся на прямом сжигании метана:

- сжигание в котельных;
- сжигание в топках;
- сжигание в воздухонагревательных установках шахт.

Второе направление утилизации включает использование шахтного метана для различных целей и нужд отдельных производств, например:

- использование в производственном цикле металлургических заводов;
- использование шахтного метана для заправки баллонов высокого давления на специальных автоматических газонаполнительных конденсатных станциях (АГНКС) для автотранспорта;
- использование в газотурбинных электростанциях в качестве горючего;
- использование в дизельных электропечах в качестве топлива.

Третье направление утилизации предусматривает использование шахтного метана в новых перспективных, промышленных разработках:

- в свободнопоршневых двигателях;
- в установках низкотемпературного отопления и т.п.

Не исключается возможность промышленного использования новых перспективных направлений утилизации: в свободнопоршневых двигателях, установках низкотемпературного отопления и т.д.

### **2.1. Сжигание кондиционного метана в тепло-генераторных установках угольных шахт**

Перевод котельных установок, работающих на твердом топливе, заключается, в основном, в оснащении котлов газовой регулирующей и контролирующей аппаратурой, а также заменой топочных устройств.

Топочные камеры котлов оборудуются взрывными клапанами, подовыми или смесительными горелками низкого давления. Постоянство давления обеспечивается регулятором РДУК и прибором управления КН-2 [18].

Другим направлением использования шахтного метана путем прямого сжигания является его использование в качестве топлива в огневых калориферах для подогрева воздуха, подаваемого в шахту в зимних условиях (шахта «Чайкино», шахта «Щегловская-Глубокая» и др.).

Для обогрева воздуха такими установками используются водонагреватели газовые смесительные ВГС-1, основными узлами которых являются: блок горелок, блок газового оборудования, щит контроля и управления [15].

В установке подогрева воздуха используется в зависимости от его объема несколько параллельно работающих калориферов ВГС-1, мощностью 1 МВт каждый. Движение воздуха в нагревателе обеспечивается за счет общешахтной депрессии в воздухоподающем стволе. Расход воздуха через каждый ВГС-1 составляет 50 тыс.м<sup>3</sup>/ч. Температура подаваемого воздуха равна +5°С при температуре наружного воздуха минус 29°С.

Этот способ не требует строительства котельных и теплотрасс, а также применения металлоемких воздухонагревателей, что значительно снижает капитальные и эксплуатационные затраты, сроки строительства и ввода отопительных систем в эксплуатацию. Принципиальная схема этого способа приведена на рисунке 2.1.

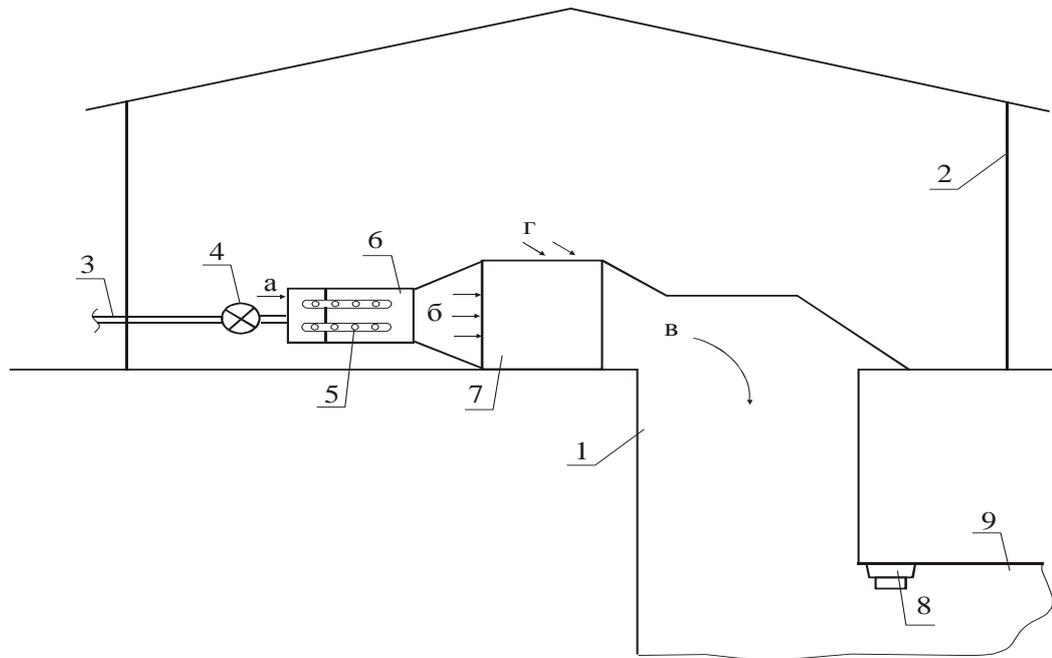


Рисунок 2.1 – Технологическая схема обогрева ствола на основе воздухонагревателей смешительного типа:

1 – ствол; 2 – надшахтное здание; 3 – газопровод; 4 – электромагнитное запорное устройство; 5 – газовые горелки; 6 – камера сгорания природного газа; 7 – камера смешения горячего и холодного воздуха; 8 – датчик метана; 9 – подземная выработка

Холодный воздух (направление «а» на рисунке 2.1) в камере сгорания смешивается с продуктами горения газообразного топлива. Полученный таким образом горячий воздух (направление «б») поступает в камеру смешения с холодным воздухом (направление «г»). Отопленный воздух (направление «в») поступает на проветривание в ствол. Во всех горизонтальных выработках, прилегающих к стволу, устанавливаются датчики метана. При достижении концентрации метана в выработках недопустимых значений датчик подает электрический сигнал на пульт управления, который отключает электророзжиг газовых горелок, а также приводит в действие электромагнитное запорное устройство, обеспечивающее прекращение подачи топлива. Процесс горения прекращается.

Ориентировочное время отключения современными средствами автоматики составляет 25-30 с, что представляет реальную опасность попадания пла-

мени в газотранспортную систему объекта утилизации и затем в дегазационную систему шахты.

Случаи проникновения пламени в газотранспортную систему теплогенераторных установок были зафиксированы почти во всех угольных производственных объединениях. Описания очевидцев и результаты расследования этих аварий показали, что основными причинами возникновения и развития процесса горения являются изменения режима работы дегазационной системы (снижение давления в нагнетающем трубопроводе и концентрации метана, вызванные переподключением скважин либо участков дегазационных газопроводов). Так на шахте «Хрустальская» (г. Красный Луч) в результате работ по переключению поверхностных дегазационных скважин в магистральном трубопроводе снизилась концентрация до 8%. Аппаратура контроля, сблокированная с клапаном-отсекателем, сработала после проникновения пламени из котельной в систему газопроводов. Пламя распространялось по сети трубопроводов (около 1,5 км) до поверхностной ВНС и погасло, предположительно, внутри водокольцевого насоса ВН-50. Комиссия по расследованию причин и обстоятельств аварии установила факт разрушения горелок в топках котельной, то есть МВС сжигалась напрямую из трех трубопроводов, подающих газ в топку котельной.

Проскоки через сбросные трубопроводы «свечи» происходили на шахтах им.М.И.Калинина, «Суходольская-Восточная», им.Н.П.Баракова, «Торезская» и др. Устройства взрывозащиты всех указанных случаев не применялись.

## **2.2. Сжигание шахтного метана в двигателях теплоэлектростанций**

Децентрализация производства электроэнергии – один из основных принципов современной энергетической политики, реализация которого позволяет эффективно использовать местные энергетические ресурсы, в частности, метан угольных месторождений.

Создание параметрического ряда электрогенераторов малой мощности, работающих в паре с газовыми двигателями и газотурбинными установками,

позволит шахтам резко увеличить долю утилизации каптируемого метана и снизить потребление электроэнергии из государственной сети [17].

**Газотурбинные установки** представляют собой блочные автономные автоматизированные установки, не требующие внешнего источника питания. Отличаются мобильностью, высокой надежностью, простотой и легкостью в управлении. Устойчиво работают в автономном режиме, а также параллельно с внешней энергосистемой.

Привод синхронных генераторов электростанций осуществляется газотурбинными двигателями. Электростанции [17,18] оборудованы автоматическими системами запуска, приема нагрузки с последующей непрерывной работой, защитой и сигнализацией по основным параметрам двигателя, а также системой шумоглушения.

Исходя из области применения газотурбинных установок, планируется использовать два их типа, отличающихся по мощности и по качеству используемого газа: для утилизации газа подземной дегазации шахт комплекс ПАЭС-2500 (рисунок 2.2) и использования метана, добываемого скважинами, пробуренными с поверхности контейнер агрегатный ЭГ-1000 (рисунок 2.3). Техническая характеристика обоих типов приведена в Приложении А.

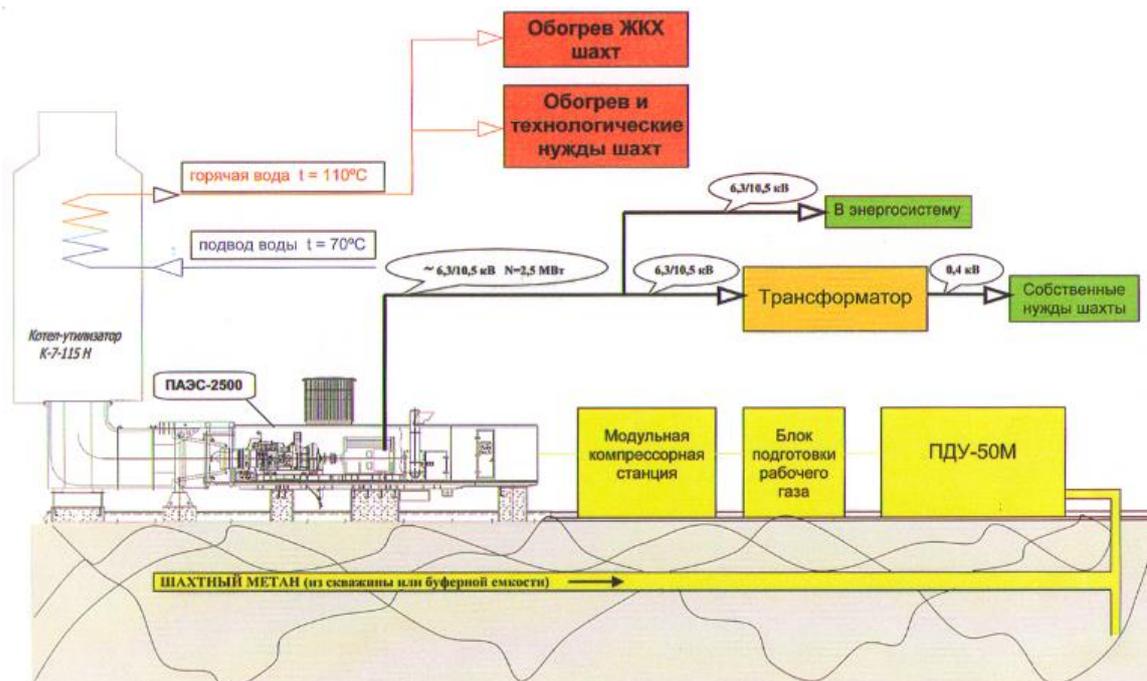


Рисунок 2.2 – Схема утилизации шахтного метана комплексом ПАЭС-2500

## КОНТЕЙНЕР АГРЕГАТНЫЙ

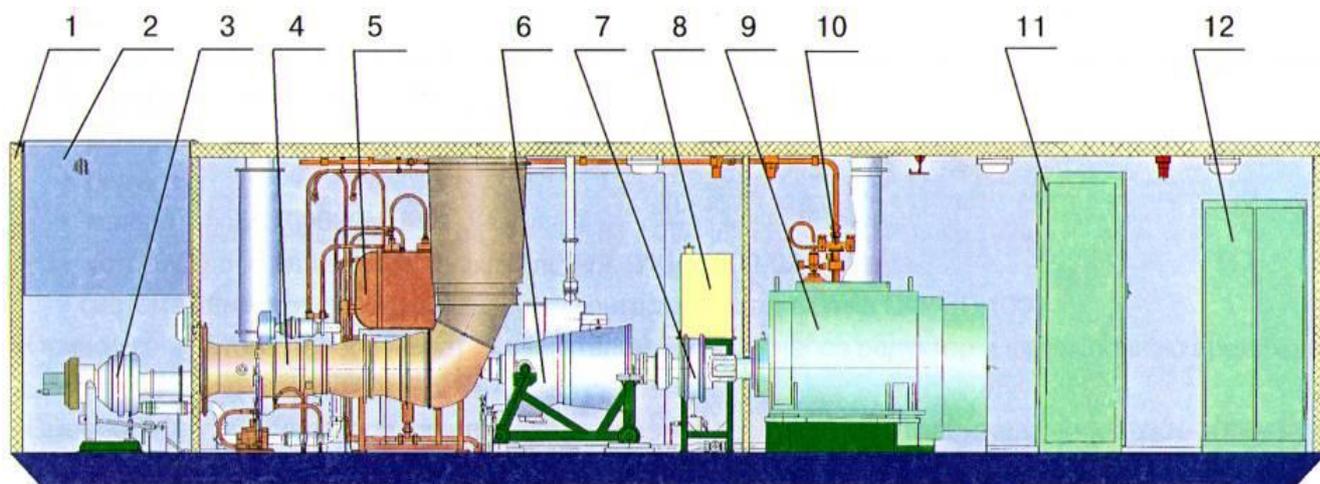


Рисунок 2.3 – Технологическая схема контейнерного агрегата ЭГ-1000

1 – контейнер; 2 – шумоглушитель ввода; 3 – вспомогательная силовая установка АИ-9В; 4 – двигатель ТВЗ-137; 5 – система смазки; 6 – редуктор с приводом агрегатов; 7 – муфта фрикционная; 8 – система топливопитания АИ-9В; 9 – генератор БСГС-630М-6Н1; 10 – система пожаротушения; 11 – устройство комплексное низковольтное УКН-1000-3А; 12 – шкаф питания

Газотурбинные двигатели потребляют сравнительно большое количество метана и не всякая дегазационная система обладает требуемой производительностью для их энергопитания.

При меньших дебитах метана заслуживает внимания использование электрогенераторов, работающих в паре с газовым дизелем или газовым двигателем внутреннего сгорания. Для этой цели предлагаются переоборудованные на газовое топливо дизель-генераторы, выпускаемые заводом «Первомайскдизельмаш» (см. Приложение А).

Газодизель-генератор ГДГ 2А-50-1 предназначен для работы на метано-воздушной смеси и получения электрической и тепловой энергии [18] (см. Приложение А). Испытания опытного образца планируется провести при утилизации МВС от подземной дегазации угольных шахт (содержание метана - более 25%).

Газовый дизель-генератор ДВГ1А-500 предназначен для утилизации кондиционного газа от поверхностной дегазации (содержание горючего – около 100%). Намечается разработка варианта модульного типа с фундаментами облегченной конструкции для возможного его использования в полевых условиях.

Отечественная и зарубежная промышленность [19] в настоящее время освоили серийный выпуск электрогенераторов с дизельными двигателями и двигателями внутреннего сгорания (см.таблицу 3 Приложения А) различной мощности.

Следует отметить, что коэффициент полезного действия газотурбинных электростанций и электрогенераторов с поршневыми двигателями, использующими шахтный метан, составляет около 0,35, поэтому большинство их конструкций включают подсистемы получения тепловой энергии, что уменьшает сроки окупаемости таких теплоэлектростанций. Данные о теплопроизводительности этих энергетических комплексов приведены в таблице 3 Приложения А.

Газогенераторные установки должны работать с низким давлением наддува, которое может быть обеспечено вакуум-насосами, избыточное давление, создаваемое отечественным водокольцевым вакуум-насосом, составляет, примерно, 5 0-100 кПа. Однако некоторые технологии газоподготовки и утилизации тепло-генераторных установок предусматривают сжатие МВС до 22 МПа, что приводит к расширению пределов взрывчатости.

Неоднократные случаи детонации и остановки зафиксированы при эксплуатации когенерационной установки по данным фирмы «CATERPILLAR» (США), располагавшейся на горном отводе шахты «Хрустальская» в г. Красный Луч. Расследования случаев аварийных ситуаций указали на следующие ошибки при проектировании:

- производительность компрессора системы газоподготовки МВС была выше производительности дегазационной системы, что приводило к подсосам воздуха в систему утилизации;

- контроль содержания метана производился на входе в систему утилизации и отсутствовал перед подачей в когенерационную установку;
- не учитывались изменения верхнего предела горения МВС с ростом давления.

Анализ газотурбинных и газогенераторных установок позволил установить следующие общие их недостатки. В системах защиты газогенераторных установок не предусмотрена установка средств взрывозащиты, следовательно, резкое снижение концентрации метана ниже проектной величины может вызвать его взрыв и аварийную ситуацию.

### **2.3. Компримирование метана угольных месторождений**

Компримирование метана угольных месторождений можно осуществлять при заполнении им баллонов высокого давления для автомобилей, оборудованных двигателями на сжатом газообразном топливе или для подачи его в трубопроводы природного газа. Для этой цели используют специальные заправочные компрессорные станции, по своей конструкции аналогичные тем, что используют для закачки природного газа в баллоны.

Серийное изготовление АГНКС осуществляется НПО имени Фрунзе (г.Сумы). Серийные конструкции АГНКС можно использовать для заполнения баллонов метаном угольных месторождений. Кроме того, рядом организаций (институт газа АН Украины, НПО имени Фрунзе) ведется разработка АГНКС меньшей производительности (таблица 2.1), специально предназначенных для этой цели и более соответствующих условиям и дебиту шахтного метана (заправка до 40-50 автомобилей в сутки).

Малогабаритные автомобильные газонаполнительные компрессорные станции, создаваемые на базе оборудования АГНКС М-45, АГНКС-60, АГНКС-75 предназначены для заправки автомобилей, автобусов специального транспорта сжатым до 2,0 МПа природным газом (метаном).

Таблица 2.1

## Технические данные газонаполнительных станций

Показатели АГНКС	А Г Н К С	
	М-45	МБКИ-125/25-1
1	2	3
Давление газа входное, МПа	0,15-0,30	0,40-1,20
Производительность, нм <sup>3</sup> /мин	0,09-3,60	6,70-13,33
Объем заправки автомобиля, нм <sup>3</sup>	60	60
Количество одновременно заправляемых автомобилей	10	-
Давление газа, заправляемого в баллоны, МПа	20,0	2,45
Давление в аккумуляторных блоках, МПа	22,0	-
Количество заправочных колонок со счетчиком газа, шт.	1	-
Охлаждение сжимаемого газа	воздушное	-
Габаритные размеры блока компрессорного, не более, мм		
длина	4300	-
ширина	2600	-
высота (без «свечи»)	2650	-
Масса блока компрессорного, не более, кг	8400	-
Масса станции в объеме поставок, не более, кг	15000	45000
Суммарная потребляемая мощность, не более, кВт	61	132
Норма заправки силикагелем системы осушки и подготовки газа, кг	114	-
Количество компрессоров, шт.	2	-

АГНКС позволяет: использовать в качестве моторного топлива природный газ или шахтный метан, получить независимость от снабжения топливом и высоких цен на бензин и дизельное топливо.

Использование газа как моторного топлива позволяет в 2-2,5 раза снизить расходы на горюче-смазочные материалы, на 40% увеличить мотороресурс двигателей, в несколько раз снизить вредность выбросов выхлопных газов в атмосферу.

Проектирование и строительство АГНКС производится по нормативным документам, определяющим требования к системам централизованного газоснабжения Донбасса, и не учитывают возможность изменения концентрации метана в поверхностных дегазационных скважинах, вызванные ведением горных работ.

Анализ способов и технических средств компримирования метана угольных месторождений показал, что необходимость установки средств взрывозащиты обусловлена проведением регулярного подключения новых и отключения неэффективных дегазационных поверхностных скважин, что приводит к изменению концентрации метана в трубопроводах, подающих МВС компрессором, и необходимости сбросов некондиционных объемов через трубопровод и «свечи» в атмосферу на территории объекта утилизации.

#### **2.4. Утилизация некондиционных метановоздушных смесей**

По данным МакНИИ количество шахтных дегазационных систем, капирующих МВС с содержанием горючего менее 25%, в последние годы достигало 20% и более. Такие дегазационные системы, как правило, имеют невысокую производительность, однако, даже сравнительно малый объем капируемого газа позволяет обеспечить содержание метана в горных выработках в нормативных пределах. Повышение концентрации в отсасываемой смеси специалисты шахт считают или невозможным из-за горно-геологических и горнотехнических условий, или нецелесообразным из-за отсутствия в данный момент необходимых средств. Поскольку объемы некондиционного метана достаточно ве-

лики, то следует считать актуальными разработки способов и средств их утилизации.

Перспективным представляется совместное сжигание разбавленных некондиционных смесей (до 3,5%) и слоя угля, что давало (по данным ИГИ МУП СССР) экономию до 35% ранее потребляемого угля [19].

Среднеазиатским отделением ВНИПИЭнергопрома предложен метод сжигания некондиционного метана дегазации шахт Карагандинского бассейна, которым предусматривается закольцевание 26 вакуум-насосных станций Промышленного и Саранского участков бассейна и сжигание собранной метановоздушной смеси после её разбавления до 2% концентрации горючего совместно с пылеугольным факелом в мощных котлах Карагандинской ТЭЦ-3. Предложенная схема обеспечивает экономический эффект от внедрения - до 1,5 млн. руб. в год [19].

Метановоздушные смеси становятся негорючими при добавлении в них (28-33%) азота или углекислого газа или водяных паров. На этом принципе базируется предложенный среднеазиатским отделением ВНИПИЭнергопрома метод утилизации некондиционных МВС, при котором предполагается добавлять в неё продукты её же горения, которые, как известно, состоят из инертных продуктов горения (азот, углекислый газ и водяной пар) (рисунок 2.4).

Для использования метана вентиляционной струи, выбрасываемой вентиляторами главного проветривания, немецкой фирмой Project Cerman Mining GmbH [20] предложена термическая регенеративная установка. Исходящая вентиляционная струя (рисунок 2.5) поступает в канал (1) и далее через горелку (5) в керамические блоки, подогретые газом (6). При температуре 760-820 °С происходит расщепление частей метана ( $\text{CH}_4$ ) в углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) и водяной пар.

После стартовой фазы установка переходит в автономный терморегим работы, если концентрация газа составляет минимум 0,25%, то есть установка работает без дополнительной энергии.

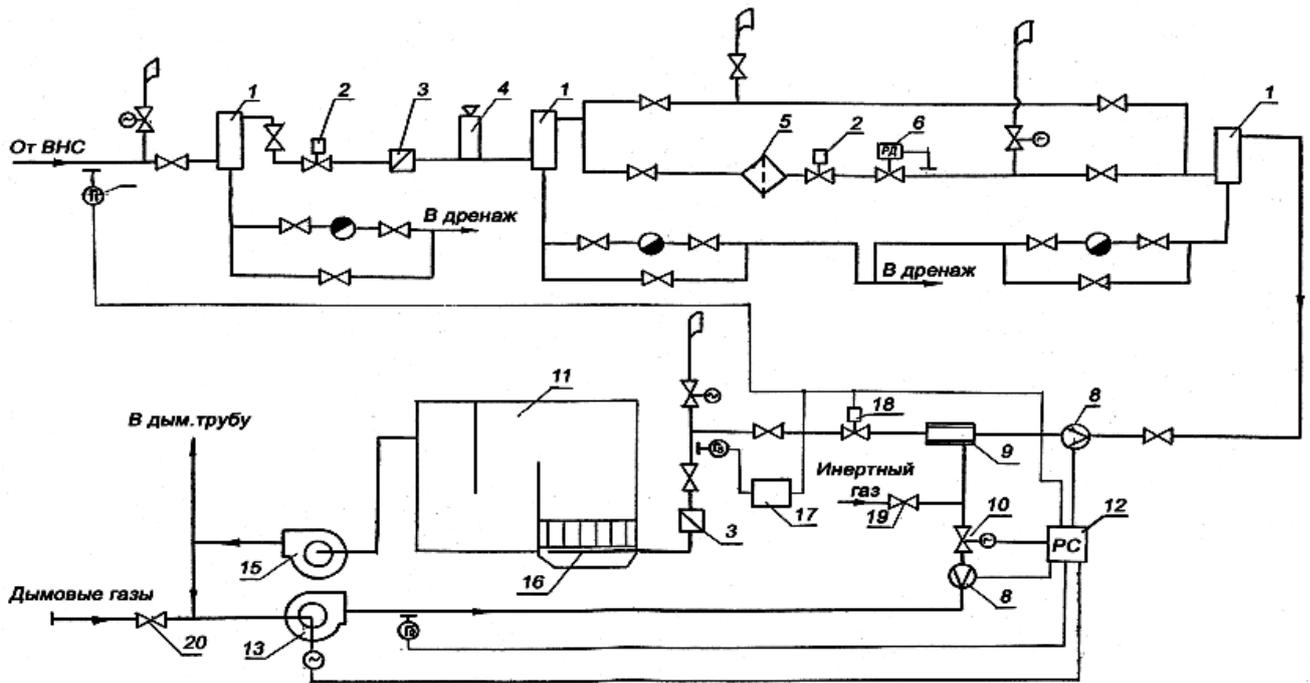


Рисунок 2.4 – Принципиальная схема сжигания некондиционного метана дегазации с рециркуляцией дымовых газов

1 – влагоотделитель; 2 – запорно-предохранительный клапан; 3 – огнепреградитель; 4 – одоризатор; 5 – фильтр; 6 – регулятор давления; 7 – газоанализатор; 8 – расходомер; 9 – смеситель; 10 – регулировочный клапан; 11 – котлоагрегат; 12 – регулятор соотношения; 13 – дымосос; 14 – газоанализатор; 15 – дымосос; 16 – горелка; 17 – прибор контроля; 18 – запорно-предохранительный клапан; 19 – задвижка; 20 – задвижка

Донецким политехническим институтом (ДПИ) совместно с МакНИИ и трестом «Донецкуглеавтоматика» разработана газоподготовительная станция ГПС-1, на которой осуществляется обогащение бедных шахтных МВС (содержание метана менее 25-30%) природным газом и автоматическая стабилизация состава МВС, подаваемой потребителям. ГПС-1 следует применять в тех случаях, когда содержание метана в шахтной МВС менее 25-30%, либо тогда, когда дебит шахтной МВС недостаточен для обеспечения требуемой мощности котлоагрегата.

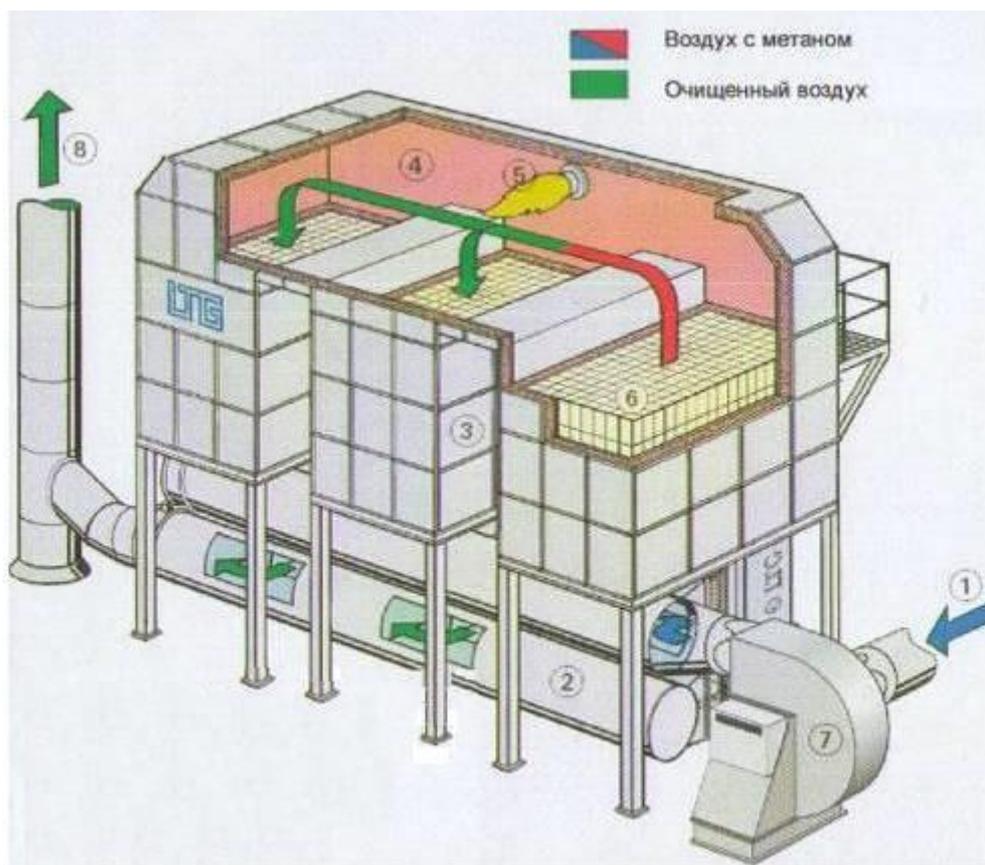


Рисунок 2.5 – Термическая регенеративная установка очистки вентиляционной струи

1 – вентиляционная струя из шахты; 2 – распределительная система воздуха; 3 – стальной блок с внутренней изоляцией; 4 – отделение окисдации; 5 – горелка; 6 – керамический материал теплообменника; 7 – вентилятор исходящей струи; 8 – выход очищенного воздуха

Газо-подготовительные станции (ГПС-1) созданы также на шахте «Донбасс» в Донецке, на шахте им.Н.П.Баракова в Краснодоне, на шахте им.М.И.Калинина в Донецке.

ДПИ совместно с МакНИИ предложена также технологическая схема газо-подготовительной станции ГПС-2, на которой осуществляется обогащение метаном воздушного дутья, подаваемого в топку котлоагрегата. Содержание метана в воздушном дутье должно автоматически поддерживаться на уровне 2,3-2,4%. Для обогащения метаном воздушного дутья используется шахтная МВС с содержанием метана менее 25-30% [20].

Первая ГПС-2 была построена в 1984 году на шахте «Октябрьская» в Донецке. Были проведены только предварительные испытания, которые дали противоречивые результаты. При небольшой толщине слоя каменного угля на решетке топки при подаче воздушного дутья с содержанием метана 2,3% наблюдалось существенное увеличение паропроизводительности котла, повышение температуры пара и давления. При значительной толщине слоя угля на решетке (150 мм и более) изменения в параметрах котлоагрегата были весьма скромными.

Устройство контроля регулирования содержания метана в дутьевом воздухе работало недостаточно надежно: при испытаниях отмечен ряд случаев подачи в топку смеси с содержанием метана до 4,5%, что значительно превышало допустимое (3,5%).

В ДонНТУ были проанализированы возможные аварийные ситуации установок подготовки газа. Здесь аварийная ситуация – это случайное событие, которое может произойти в результате совмещения двух независимых случайных событий – отказа системы защиты и возникновения взрывоопасной метановоздушной смеси. Аварийная ситуация при наличии источника воспламенения может привести к взрыву в топке котельной. По ГОСТу 12.1.010-76 (СССР) вероятность взрыва не должна превышать  $10^{-6}$  год.

Используя теорию марковских процессов, была составлена математическая модель безопасности использования некондиционных метановоздушных смесей. Модель функционирования системы опасная газовая смесь – защита описывается системой линейных дифференциальных уравнений Колмогорова, решение которой с помощью преобразований Лапласа дает возможность найти среднее число  $N_0$  аварийных ситуаций в период времени в зависимости от параметра потока опасных состояний газовой смеси и надежности системы защиты.

Так, например, для установок утилизации шахтного метана в топках с твердым или жидким топливом:

$$H_0 = \lambda_{сз} \cdot (\lambda_{сз} + \lambda_{ум}) / \mu_{сз} \quad (2.1)$$

или:

$$H_0 = h \cdot (\lambda_{сз} + \lambda_{ум}), \quad (2.2)$$

где  $\lambda_{сз}$  - параметр потока отказов системы защиты,  $c^{-1}$ ;

$\lambda_{сз}$  - параметр потока появления взрывоопасного содержания метана и уменьшения (отсутствия) расхода воздуха в трубопроводе смешанного газа;

$\lambda_{ум}$  - параметр потока появления взрывоопасного содержания метана и снижения давления в трубопроводе шахтного газа;

$\mu_{сз}$  - параметр потока восстановления системы,  $c^{-1}$ .

Анализ способов и технических средств утилизации некондиционных МВС и возможных аварийных ситуаций установок подготовки газа с помощью модели функционирования системы опасной газовой смеси позволяет на стадии проектирования установок утилизации некондиционного шахтного метана обеспечивать уровень надежности системы защиты и, при необходимости, разрабатывать мероприятия по её повышению, выбрать соответствующее оборудование и приборы, а также различные схемы резервирования и взрывозащиты.

## **2.5. Современное состояние средств взрывозащиты газотранспортных систем**

В технологических процессах, связанных с добычей, транспортировкой, подготовкой и потреблением шахтного газа, не исключена возможность образования взрывчатых метановоздушных смесей. Взрывоопасные смеси могут образовываться, например, при наличии подсосов воздуха в процессах дегазации, неисправности агрегатов и средств контроля.

Согласно нормативным документам МВС, капируемые дегазационными системами, делятся на: кондиционные, пригодные при нормальных условиях для утилизации (содержание метана более 25%), и некондиционные (содержание метана до 25%), транспортирование и использование которых разрешается

при условии выполнения мер по обеспечению взрывобезопасности, разработанных и согласованных органами Государственного надзора.

В качестве средств взрывозащиты применяют огнепреградители и автоматические системы взрывозащиты [21].

### **2.5.1 Огнепреградители**

Промышленные огнепреградители, отличаясь друг от друга по конструкции огнепреграждающего элемента, размерам и форме корпусов, диаметрам и количеству газопропускных каналов, имеют общий принцип: отбор тепла от пламени и гашение происходит при его контакте с твердой поверхностью узких каналов [21].

В отечественной и мировой практике эксплуатации газотранспортных систем различных отраслей промышленности для локализации пламени широко используются огнепреградители разных конструкций. По месту применения эти устройства подразделяются на две группы: резервуарные, устанавливаемые таким образом, чтобы один из его патрубков (длиной не более трех диаметров трубы) имел свободный выход в атмосферу, и коммуникационные, применяемые внутри оборудования или имеющие по обоим концам трубопроводы.

При больших расходах газоздушных смесей наиболее широко используются следующие виды огнепреградителей: пластинчатые, спирально-ленточные, насадочные, сеточные [21, 22]. Металлокерамические огнепреградители, а также огнепреградители с использованием жидкости (гидрозатворы) применяются для взрывозащиты газотранспортных систем только при малых расходах газа и при больших скоростях газового потока.

Преимуществом огнепреградителей являются:

- простота устройства, отсутствие движущихся частей;
- надежность в работе, высокая помехозащищенность;
- простота обслуживания и ремонта;
- невысокая стоимость изготовления;

- возможность повторного тушения пламени без дополнительного вмешательства человека;
- автономность устройства, отсутствие необходимости подвода энергии и огнетушащих материалов;
- отсутствие вредного воздействия на технологический процесс при тушении пламени.

Однако такие устройства имеют и свои недостатки:

- наличие аэродинамического сопротивления;
- засорение каналов в процессе эксплуатации;
- необходимость размещения в отапливаемом помещении;
- односторонность действия при тушении пламени;
- малая огнестойкость.

В Германии используются пластинчатые, спирально-ленточные и насадочные (шихтовые) огнепреградители. Существует мнение, что эффективность огнепреградителей зависит не только от их параметров (диаметр каналов), но также от характеристик транспортируемой горючей смеси и условий эксплуатации (места установки) устройств. Типичная для Германии технологическая схема дегазационной установки с размещением также огнепреградителей представлена на рисунке 2.6 [23].

На шахтах Чехословакии также используют спирально-ленточные и шариковые огнепреградители, устанавливаемые по трассе газопроводов в специальных будках через каждый километр трубопровода [24].

Подобные средства защиты используют также на шахтах Канады. Их рекомендуют устанавливать на выхлопных трубах резервуаров, на устройствах, подающих МВС в топку, на газопроводах доменных печей и т.д. [25].

На ряде шахт Великобритании работают автоматизированные вакуум-насосные станции, при этом средства взрывозащиты (пластинчатые огнепреградители) устанавливаются на выхлопной трубе и на участках газопровода шахта-ВНС и ВНС-потребитель [26].

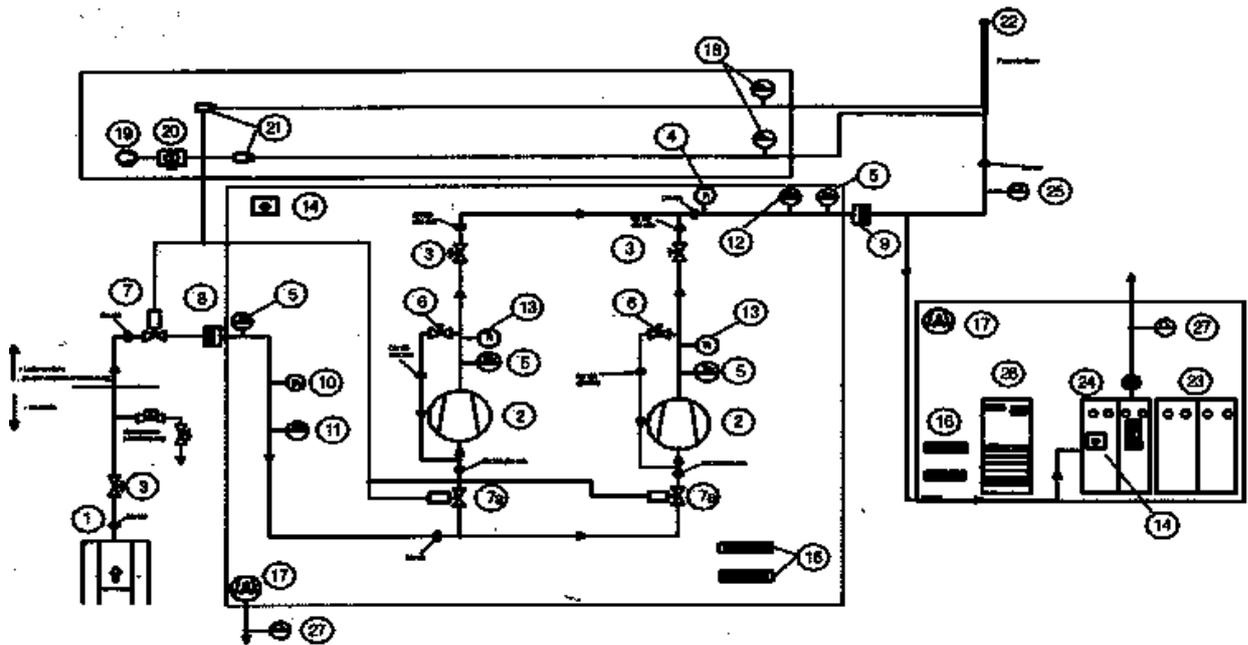


Рисунок 2.6 – Технологическая схема дегазационной установки

1 – скважина с дегазационным трубопроводом; 2 – ротационный вакуум-насос; 3 – запирающий клапан DN 400; 4 – манометр давления; 5 – датчик давления; 6 – запирающий клапан DN 150 (вариант); 7 – быстрозакрывающийся вентиль DN 400, пневм. с 3/2-ходовым клапаном; 7а – обратный клапан, пневм. с 3/2-ходовым клапаном; 8 – огнепреградитель, на всасывании; 9 – огнепреградитель, на выхлопе; 10 – вакуумный манометр; 11 – датчик давления на всасывании; 12 – датчик давления; 13 – термометр; 14 – система контроля состояния атмосферы; 15 – отопление с термостатным регулированием; 16 – отопление с термостатным регулированием; 17 – вентилятор; 18 – переключатель/пожарная сигнализация; 19 – компрессор; 20 – редукционный вентиль; 21 – вентили проветривания быстрого действия; 22 – трубки пожарной сигнализации; 23 – шкаф управления и переключения; 24 – система газоанализа; 25 – измерение объёмного потока; 26 – частотный преобразователь (вариант); 27 – система контроля потока воздуха

На основании исследований МакНИИ под руководством автора установлено, что на шахтах Донбасса в основном применяются сетчатые огнепреградители ОПС-1 [16].

## 2.5.2 Автоматические средства взрывозащиты газотранспортных систем СТУШМ

В последние годы широкое распространение стали получать автоматические средства взрывозащиты, в том числе предназначенные и для газотранспортных систем. Основные показатели отечественных и зарубежных систем обнаружения и подавления взрывов приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Основные показатели отечественных и зарубежных систем обнаружения и подавления взрывов

Способ распыления	Подавляющий агент	Способ обнаружения	Место применения	Показатели
пирозаряд	огнетушащая жидкость	оптический	технолог. аппараты	«Анпибар» [27]
пирозаряд	огнетушащий порошок	оптический	наземные хранилища	АСЛП-1 [28]
взрывчатые вещества (ДШ)	огнетушащий порошок	оптический	горные выработки при ВР	АВП-1 [29]
пирозаряд	огнетушащий порошок	оптический	горные выработки на комбайнах	СЛВА-1 {30,31}
пирозаряд	огнетушащая жидкость	датчик давления	технология обогащения рудования	«Радуга» [32]
сжатым газом	огнетушащий порошок	оптический	самолеты	Фирмы «Гравиер» [33]
взрывч. вещ. ДШ	вода	термоэлектрический	горные выработки	Шахты «Тремония» [34]
взрывч. вещ. ДШ	вода	оптический УФ	горные выработки	«Сершар» [35]
взрывч. вещ. ДШ	огнетушащий порошок	термодатчик, датчик	горные выработки	«Иниекс» [36]
взрывч. вещ. ДШ	вода	оптический ИК	горные выработки	Шахты «Барбара» [37]
сжатым газом	огнетушащий порошок	термодатчик, оптический ИК	горные выработки	Фирмы «Готаль» [38]
взрывч. вещ. ДШ	огнетушащий порошок	оптический ИК	угольные комбайны	ЕСМ 13 [39]
сжатым газом	огнетушащий порошок	оптический	горные выработки	[40]

Окончание таблицы 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Время об- наруже-	5-7	5-7	1	1	5-7	1	н.д.	до 7	н.д.	1	1	1	1
Время начала распыления, мс	40- 80	1500	3-7		до 80	2-4	2-4	2-4	2-4	6- 11	6-11	н.д.	6- 10

В таких устройствах можно выделить четыре составные части: датчик воспламенения и пусковой узел, корпуса которых жестко связаны между собой, взрывоподавляющий агент и побудитель движения подавляющего агента. Возможные варианты выполнения приведены на рисунке 2.7.

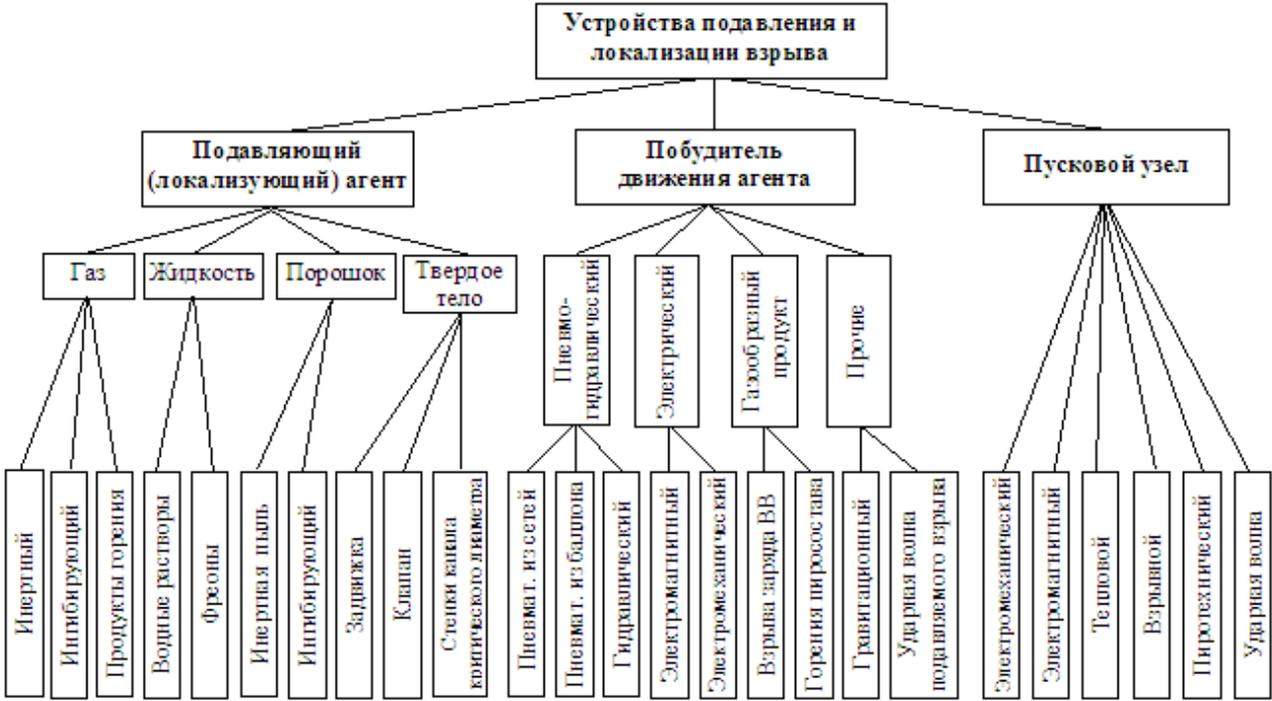


Рисунок 2.7 – Устройства подавления и локализации взрывов

Пусковые узлы взрывоподавителей создают на разных принципах: электромеханическом, электромагнитном, тепловом, электровзрывогидравличе-

ском, пиротехническом и взрывном. К этому узлу предъявляются такие требования - по времени срабатывания оно не должно превышать нескольких миллисекунд. Этому требованию удовлетворяют пусковые узлы, основанные на использовании взрыва электродетонатора. При получении от датчика контроля воспламенения (пламени) электрического импульса взрыв усиливается и подается на электродетонатор, который взрывается, разрушает запорную мембрану и освобождает выходное отверстие сосуда со сжатым газом (или инициирует распыляющий заряд).

Основными преимуществами таких узлов являются минимальное время срабатывания, простота и надежность в работе, что, очевидно, и послужило причиной их широкого применения в системах автоматического подавления взрывов газоздушных смесей в различных отраслях промышленности.

В качестве взрывоподавляющего агента используются флегматизаторы реакции окисления метана: газообразные, жидкие или порошковые. Для флегматизации метановоздушной смеси и прекращения горения в нее достаточно ввести 24% углекислого газа, или 38% азота, или 29% водяного пара. Это наиболее распространенные флегматизаторы, они безопасны при транспортировании, применении и хранении, являются дешевыми и недефицитными веществами, что во многих случаях компенсирует их недостаточно высокую эффективность.

Из жидких флегматизаторов вне конкуренции для применения находятся вода и водные растворы солей. Основные свойства, определяющие объемы ее использования при взрывозащите в различных отраслях промышленности – это такие качества как доступность, удобство транспортирования, широкое применение в промышленности, дешевизна и высокая теплопоглощающая способность. Галоидосодержащие вещества (хладоны) более эффективны, чем вода, но они более дорогие и экологически небезопасны, поэтому их применение ограничено.

Порошкообразные ингибиторы являются одним из основных компонентов современных систем взрывозащиты. В химической промышленности их ис-

пользование ограничено тем, что доставку подавляющего агента при подавлении взрыва МВС в зону создания инертной среды необходимо осуществлять как можно быстрее, поэтому в указанных выше системах, как правило, используются в качестве побудителя движения или сжатый инертный газ из баллонов высокого давления, или продукты взрыва конденсированных взрывчатых веществ, или газы горения пиротехнических составов.

Рассмотренные автоматические системы взрывозащиты конструктивно достаточно сложны в исполнении и требуют высокой степени квалификации обслуживающего персонала. Наличие электронных систем обнаружения, эффективных огнетушащих веществ делают эти системы достаточно дорогостоящими.

Более простая конструкция автоматического устройства обнаружения и подавления пламени в трубах, которую можно использовать в условиях утилизации шахтного метана, предлагается [41]. Способ тушения стабилизированного на огнепреградителе пламени заключается в использовании для этого продуктов горения части транспортируемой МВС, изолированной от основного потока. Комплект устройства состоит (рисунок 2.8) из сетчатого огнепреградителя ОПС и пламяподавителя ПГА, представляющего собой образованную наружной и внутренней трубой изолированную кольцевую камеру, соединенную кольцевой щелью с полостью внутренней трубы.

Погашение пламени 8, распространяющегося по направлению движения потока метановоздушной смеси, происходит в каналах огнепреграждающего элемента 2. Пламя 5, движущееся по трубопроводу 1 навстречу потоку, стабилизируется в позиции 3 на огнепреградителе, при этом поджигая газовую смесь (пламя 6) в кольцевой камере 4. Продукты сгорания 7 через кольцевую щель поступают в полость трубопровода и тушат стабилизированное огнепреградителем пламя 3. Технологический цикл процесса тушения не прекращается. Через некоторое время (не более 2 мин) продукты сгорания замещаются транспортируемой газовой смесью и устройство готово для повторного срабатыва-

ния. Устройство автоматическое автономное, не требует подвода энергии, замены огнетушащего вещества и вмешательства человека.

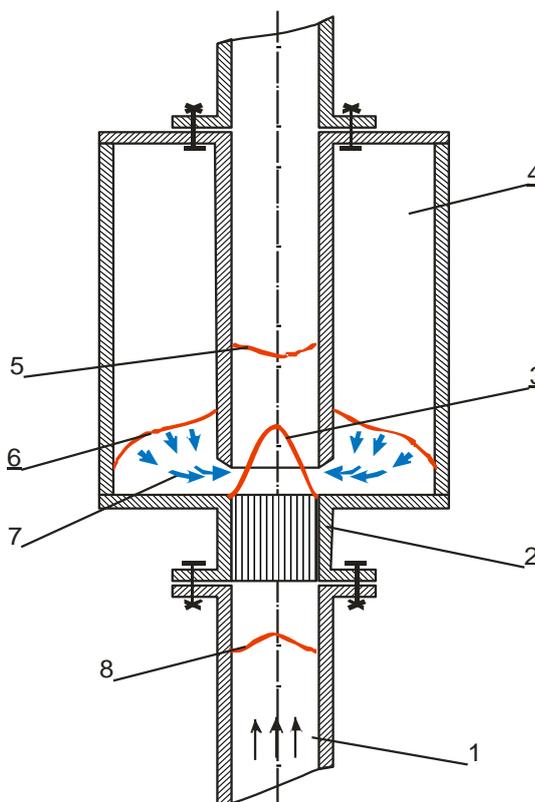


Рисунок 2.8 – Схема комплекта автоматического устройства подавления пламени

Однако и этот комплект защиты имеет существенный недостаток - большие поперечные размеры. Вместе с тем есть техническое решение, позволяющее устранить этот недостаток.

Следует отметить, что любой способ энергетического использования метановоздушных смесей, как без подготовки, так и со специальной подготовкой их, без систем взрывозащиты не реализуется. Требования в части безопасности разрабатываются согласно нормативной базе (в каждой конкретной стране) по специально разработанным проектам.

Система взрывозащиты должна быть надежной. Требования высокой надежности определены условием гидравлической связи посредством трубопроводов объектов утилизации и горных выработок.

Технологии утилизации шахтного метана теплогенераторными установками, двигателями теплоэлектростанций, а также некоторые системы подготовки к использованию предусматривают сжатие МВС до 20 МПа. Изначально эти технологии разрабатывались на потребление горючих газов без окислителя (природный, попутный нефтяной и др.), поэтому изменение давлений топлива в регламенте обеспечения взрывозащиты не учитывалось.

Известно [42, 43, 44], что с изменением исходного состояния расширяется диапазон пределов взрывчатости газоздушных горючих смесей. Следует отметить, что с ростом давлений может изменяться и критический диаметр горения метановоздушных смесей.

Для разработки требований безопасности при утилизации шахтного метана разработаны принципиальные схемы экспериментальных стендов, методика и программа проведения исследований.

На созданных стендах необходимо провести экспериментальные исследования по:

- определению пределов взрывчатости при давлении, отличающемся от атмосферного;
- изучению процессов горения в трубопроводах и камерах разного сечения;
- оценке критического диаметра горения МВС при давлениях больше атмосферного.

## **ВЫВОДЫ**

1. Проведенный анализ исследований утилизации шахтного метана рассмотренными способами показал, что в процессе добычи, транспортировки, подготовки и утилизации шахтного метана существует опасность образования взрывчатых метановоздушных смесей в системах утилизации. Количество МВС, подаваемое к установкам утилизации, регулируется в зависимости от их количества и режима работы и обеспечивается выпуском газа через сбросные

трубопроводы «свечи». Концентрация метана на выходе из «свечи» может колебаться в интервале от нуля до значений, установленных в проекте в процессе освобождения газотранспортной системы от воздуха перед пуском, длительным простоем или ремонтом.

Причиной проникновения пламени в газопроводы в установках утилизации шахтного газа может быть:

- неправильная установка датчика горения метана;
- неплотность запорных устройств и ошибка персонала в фиксации их положения;
- неисправность устройств измерения характеристик МВС или неправильная оценка их показаний;
- проникновения пламени в газотранспортную систему при неисправной или отключенной автоматике либо разрушении конструктивной целостности горелки;
- неправильное действие обслуживающего персонала.

Действующие нормы содержания метана при транспортировании и использовании МВС технологиями с повышением давления исходной смеси не всегда обеспечивают взрывобезопасность процесса утилизации.

2. Рассмотрены конструкции и параметры огнепреграждающих элементов промышленных огнепреградителей. Показаны их достоинства и недостатки. Сеточные защитные элементы могут служить основой для совершенствования огнепреградителя в составе устройства тушения пламени в трубопроводах систем утилизации газа дегазации.

3. Осуществлен анализ технических характеристик отечественных и зарубежных автоматических систем обнаружения и тушения пламени. Выполнена классификация этих систем по пусковым узлам, побудителям движения и подающим агентам. Выбраны направления их совершенствования.

4. Рассмотренные автоматические системы взрывозащиты конструктивно достаточно сложны в изготовлении и требуют высокой степени квалификации

обслуживающего персонала. Наличие электронных систем обнаружения и эффективных огнегасящих веществ делают эти системы достаточно дорогими.

5. Существующие системы порошкообразного тушения не учитывают в полной мере специфику эксплуатации систем утилизации и могут влиять на дальнейшие процессы эксплуатационные процессы, вывести из строя утилизационное оборудование. Для подавления пламени в трубопроводах систем утилизации в качестве подавляющего агента целесообразно применять инертные газы и газовые смеси.

6. Способ тушения пламени, стабилизированного на огнепреградителе продуктами сгорания, предварительно изолируемой части транспортируемой смеси является перспективным для дальнейшей проработки, т.к. позволяет автоматически обнаруживать и тушить проникающее в газопровод пламя. Устройство автономно, достаточно простое, состоит из огнепреградителя сетчатого (ОПС) и пламяподавителя (ПГА).

7. Конструктивной особенностью комплекта взрывозащиты ОПС-ПГА является соотношение диаметров внутренней и наружной трубы кольцевой камеры ПГА, равной 1:3, что увеличивает его поперечные габаритные размеры и не всегда позволяет поместить данное устройство в компоновку серийно-выпускаемых и действующих объектов утилизации.

8. Аналитические и экспериментальные исследования следует проводить в следующих направлениях:

- изучение процессов горения на выходе из трубопровода и в камерах кольцеобразного сечения
- определение пределов горения и оценка критического диаметра МВС при давлениях больше атмосферного;

На основании результатов экспериментальных исследований предполагается обосновать параметры устройства тушения пламени, разработать техническое задание, изготовить экспериментальные и опытные образцы устройств тушения пламени и обосновать требования безопасности для разработки отраслевого стандарта.

### РАЗДЕЛ 3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ТУШЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ

### 3.1. Влияние толщины стенки трубопровода на процессы горения

Каптируемый ВНС газ дегазации подается потребителю под давлением, создаваемым вакуум-насосами, которое не должно превышать 0,25 атм. Увеличение давления после вакуум-насосов более 0,25 атм. создает существенное снижение производительности и эффективности работы дегазационной системы. Увеличение давления на входе в утилизационную систему рекомендуется устанавливать системы с помощью подготовки (дополнительные вакуум-насосы или компрессоры), развивающие необходимое давление и расход. Количество газа, потребляемое агрегатами, регулируется в зависимости от их количества и режима работы сбросом излишков через сбросные «свечи». Освобождение газотранспортной системы утилизации от воздуха перед пуском (длительный простой, ремонт, консервация и т.д.) обеспечивается также выпуском газа в атмосферу через сбросные «свечи». Скорость выброса через «свечу» может быть очень малой (при сбросе излишков МВС), поэтому вероятность проскока пламени навстречу потоку весьма велика.

Концентрация метана на выходе из «свечи» может колебаться от нуля до значений, установленных проектом.

Считается [45], что пламя на срезе трубопровода сохраняется в стационарном положении потому, что вблизи среза трубы вследствие гидродинамических и тепловых причин возникает поджигающее кольцо, удерживающее пламя. Скорость истечения газа в пристеночном слое значительно меньше скорости движения смеси по сечению трубы. При выходе пламени из трубы толщина пристеночного слоя зависит от скорости потока и диаметра трубопровода. На рисунке 3.1 представлена зависимость скорости горения и скорости потока как функции расстояния от стенки горелки.

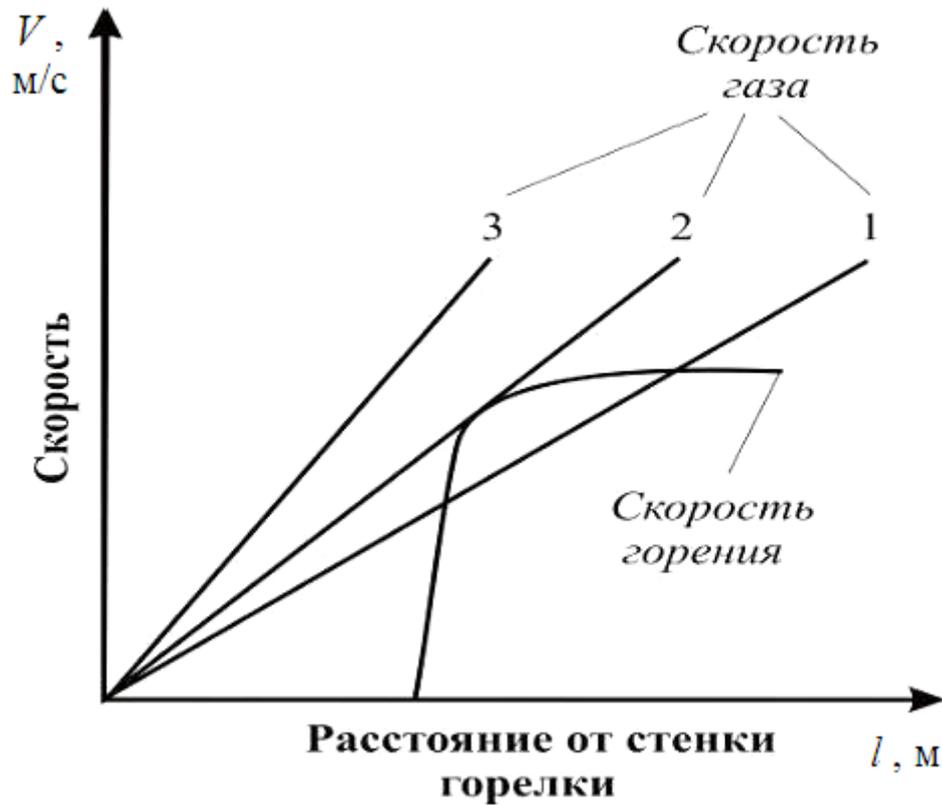


Рисунок 3.1 – Зависимость скорости горения и скорости потока как функции расстояния от стенки горелки к оси трубы

1 – проскок; 2 – устойчивость; 3 – отрыв пламени горения

Прямая 1 (скорость газа) пересекает кривую скорости горения так, что она в любом диапазоне расстояний до границ потока превышает скорость газа, поэтому пламя движется навстречу потоку и проникает в трубопровод (проскок пламени). Прямая 2 касается кривой скорости горения в точке верхнего предельного значения расстояния от стенки, поэтому пламя стабилизируется на срезе трубопровода. Прямая 3 не имеет точек соприкосновения с кривой горения, то есть скорость потока всегда больше скорости горения. В данном случае происходит срыв пламени.

При ламинарном течении газа в трубе распределение скоростей по сечению является параболическим, оно определяется законом Пуазейля [45]:

$$\omega(r) = \omega_0 \left(1 - r^2 / R_0^2\right), \quad (3.1)$$

где  $\omega(r)$ - скорость потока на расстоянии  $r$  от оси трубы;

$R_0$ - радиус трубы;

$\omega_0 = \omega(r = 0)$ - максимальная скорость течения.

Среднюю скорость потока  $\bar{\omega}$ , равную расходу газа на единицу сечения трубы, вычисляем усреднением:

$$\bar{\omega} = \int_0^{R_0} 2\pi r \omega(r) dr / \pi R_0^2 = \omega_0 / 2, \quad (3.2)$$

т.е.  $\bar{\omega}$  вдвое меньше  $\omega_0$ . При этом следует иметь в виду, что после выхода газа из горелки распределение скоростей в потоке несколько изменится. В случае распределения скоростей газа по закону Пуазейля при равных  $\bar{\omega}$ , конусы пламени для всех горелок геометрически подобны, их отношения  $h/R_0$  равны.

Существование бунзеновского пламени в широком диапазоне скоростей потока сжигаемого газа обусловлено стабильностью основания конуса, фиксацией пламени у кольца среза горелки. Такая стабилизация обусловлена особенностями горения в этой зоне.

В работе [46, 47] проведены исследования отрыва пламени от среза (выхода) конца трубы (рисунок 3.2) для труб диаметром 100 мм, 150 мм и 200 мм. Результаты исследований показывают, что отрыв пламени от труб происходит при скоростях менее 2 м/с для МВС с концентрацией метана вблизи нижнего предела горючести, для смесей с концентрацией метана 7,0 составляли 2-4 м/с, для стехиометрии – при скоростях 4-8 м/с, а с дальнейшим повышением концентрации – скорость отрыва пламени возрастает.

Исследовалась также зависимость скорости проскока пламени от концентрации горючего в смеси. Результаты экспериментов показали (рисунок 3.3), что максимальные скорости проскока пламени в трубопроводы диаметром 100 мм, 150 мм и 200 мм соответственно равны 4,5; 5,5 и 6,5 м/с.

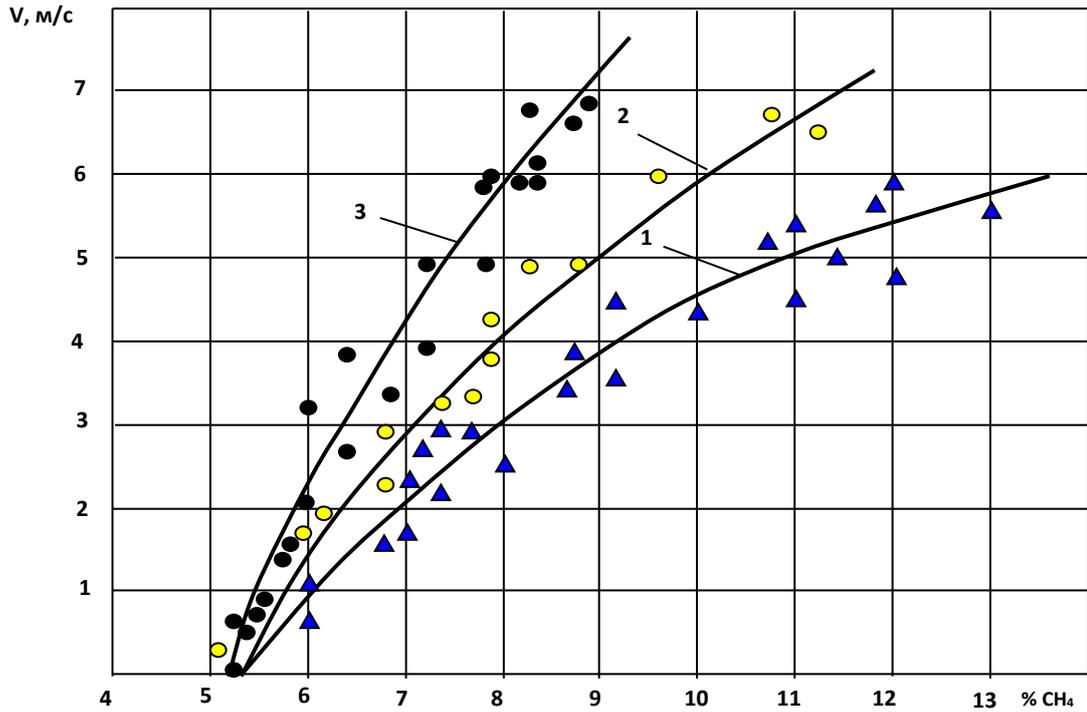


Рисунок 3.2 – Скорость отрыва пламени от среза трубы в зависимости от содержания метана в смеси

1 - для трубы диаметром 100 мм; 2 - 150 мм; 3 - 200 мм

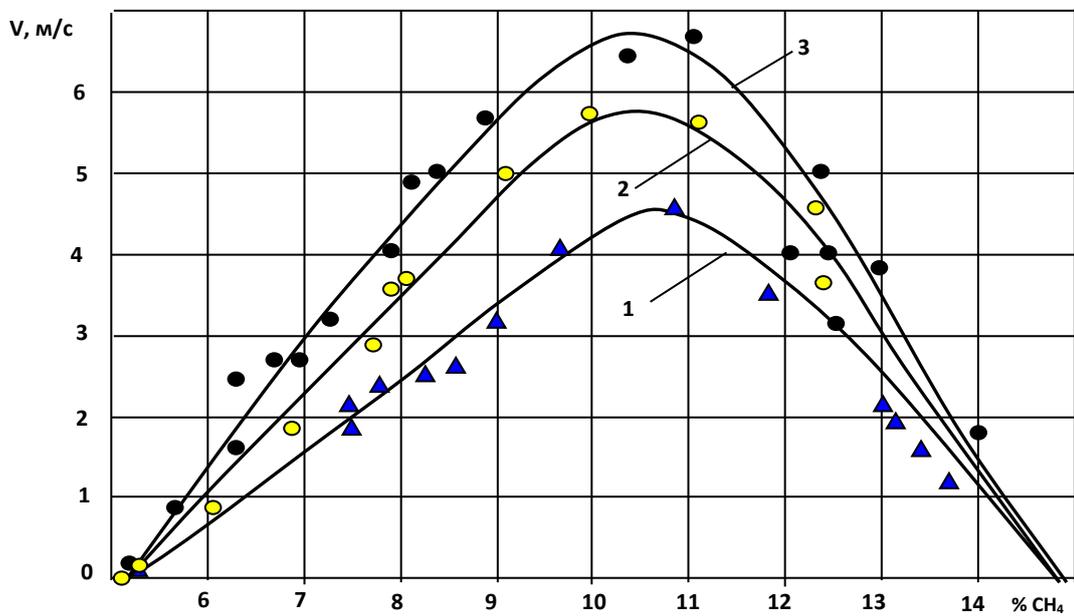


Рисунок 3.3 – Зависимость скорости проскока пламени от концентрации метана в смеси

1 - для трубы диаметром 100 мм; 2 - 150 мм; 3 - 200 мм

Из данных рисунка 3.3 следует, что с увеличением диаметра трубопровода возрастает скорость проскока пламени. Такая же зависимость была получена и другими авторами, результаты которой представлены на рисунке 3.4.

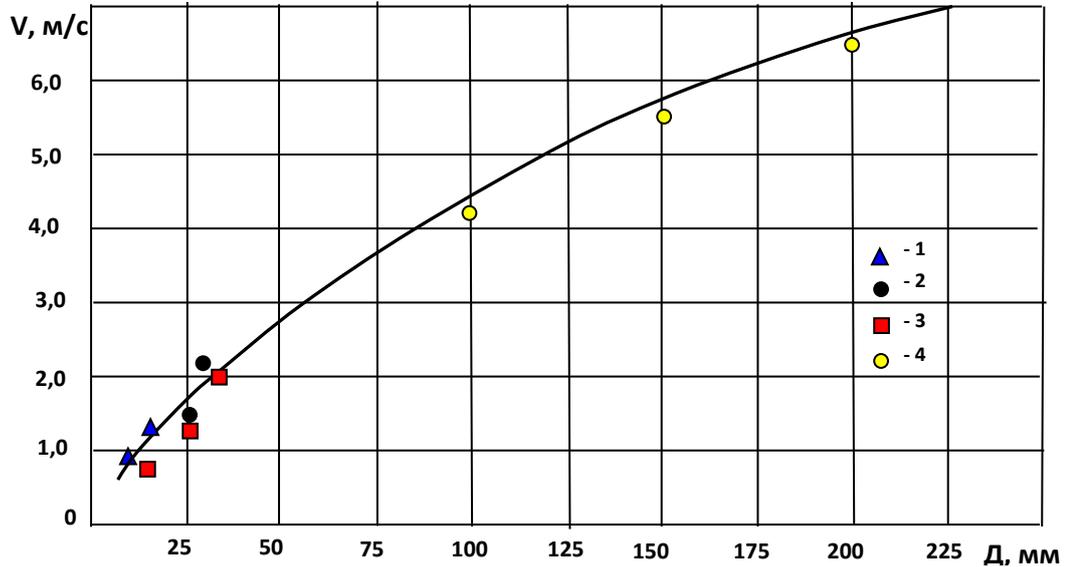


Рисунок 3.4 – Зависимость максимальной скорости проскока пламени от диаметра трубы

1 - данные Льюиса, Г. Эльбе; 2 - В.А. Спейшера; 3 - А.С. Иссерлина; 4 – Ю.В. Кудинова

Льюисом Б. и Эльбе Г. разработана теория критического градиента граничной скорости, позволяющая понять явление проскока пламени и определить пределы устойчивости горения:

$$\left(\frac{dw}{dr}\right)_{r \rightarrow R} = \left(\frac{du}{dr}\right)_{r \rightarrow R}, \quad (3.3)$$

где  $r$  - текущий радиус;

$R$  - радиус горелки;

$u$  - скорость пламени.

В работах [47, 48, 86] для инженерных расчетов получены на основе уравнения (3.1) следующие зависимости предела проскока и отрыва пламени при сжигании природного газа открытым факелом на выходе из трубы:

$$\omega_{np} = C \cdot U_n^2 \frac{d}{a}, \quad (3.4)$$

$$\omega_{отр} = C \cdot U_n^{1,5} \left( \frac{d}{a} \right)^{0,5}, \quad (3.5)$$

где  $\omega_{np}$ ,  $\omega_{отр}$  - соответственно скорости проскока и отрыва;

$a$  - коэффициент температуропроводности;

$U_n$  - нормальная скорость горения;

$C$  - определяемый экспериментально коэффициент;

$C_u$  -  $4,5 \cdot 10^{-3}$  – для инжекционных горелок;

$C_n$  -  $2,8 \cdot 10^{-3}$  – для горелок с принудительным дутьем;

$d$  - диаметр трубы.

В исследованном [47] интервале диаметров горелок (от 35 до 91 мм) скорость проскока пламени в трубопровод изменялась от 0,65 до 1,65 м/с для горелок с принудительным дутьем воздуха и от 1,02 до 2,65 м/с – для инжекционных горелок.

Из представленных данных можно сделать вывод о том, что пределы устойчивости горения зависят от скорости горения и диаметра трубы.

На практике для расширения диапазона устойчивости горения любых газов широкое распространение получило применение искусственных стабилизаторов пламени горения. Для стабилизации пламени применяются огнеупорные цилиндрические туннели, устанавливаемые на срезе трубопровода (горелки). Туннель значительно расширяет сечение среза, что позволяет увеличить теплоотвод от стенок трубопровода.

При устойчивом горении МВС происходит нагревание конца трубы, что в свою очередь подогревает поток несгоревшего газа. Замеры температуры торцов трубы, при скоростях потока МВС равных 7 м/с, показывают, что нагревание происходит быстро и в течение 15 мин температура может возрасти до 300°C и более (рисунок 3.5).

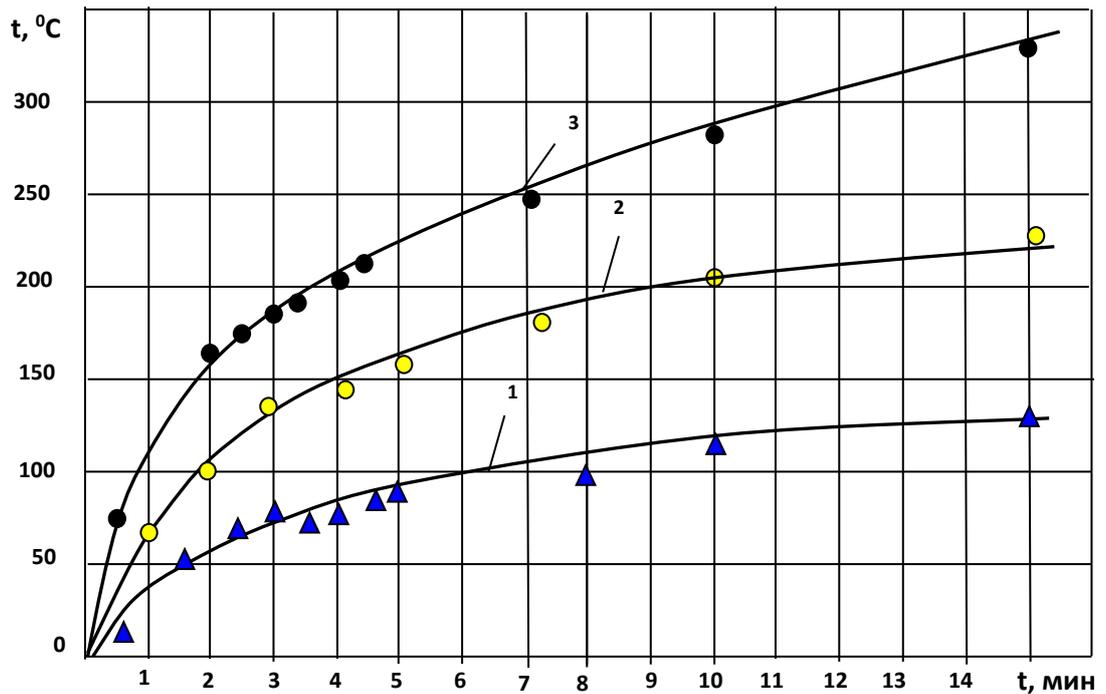


Рисунок 3.5 – Зависимость температуры торца трубы от времени горения выходящего метана

1 - для трубы диаметром 100 мм; 2 - 150 мм; 3 - 200 мм

Известно, что при повышении температуры потока газовой смеси скорость проскока пламени увеличивается. Так, при исследовании устойчивости пламени городского газа, подогретого до 135°C был получен проскок на горелках диаметром 18 мм при скорости потока ГВС равной 4 м/с.

В работах по изучению процессов горения на срезе трубопровода в основном учитывались концентрационные характеристики горючей смеси и диаметры газопроводов, а влияние конструкции «свечи» не учитывалось.

В этой связи представляет интерес необходимость проведения исследований по определению влияния толщины стенки трубопровода на устойчивость горения газоздушных смесей на выходе из трубы, регулировались условия для формирования вторичного поджигающего кольца.

### **3.2. Совершенствование устройств тушения стабилизированного пламени**

Важное значение для применения новых средств взрывозащиты систем утилизации имеет механизм локализации и тушения пламени в начальной стадии его проникновения транспортируемой МВС потребителю.

При создании и использовании таких средств на передний план выходит необходимость теоретического и экспериментального обоснования параметров устройства.

Конструктивным недостатком разработанного ранее комплекта взрывозащиты ОПС-ПГА является значительное превышение диаметров наружной над диаметрами внутренней трубы и кольцевой камеры ПГА, что не всегда позволяет поместить данное устройство в компоновку серийно-выпускаемых и существующих объектов утилизации.

Увеличение количества огнетушащих газов, генерируемых устройством тушения пламени, при уменьшении его поперечных размеров, возможно за счет увеличения поверхности горения или скорости распространения пламени в кольцевой камере устройства. Рассмотрим оба варианта увеличения расхода продуктов сгорания.

В предлагаемом устройстве [49] увеличить поверхность горения возможно изменением конструкции устройства поджигания газовой смеси посередине её длины.

Принципиальная схема устройства представлена на рисунке 3.6.

Устройство состоит из аккумулирующей (см. рисунок 3.6) камеры 1, выполненной из двух оболочек внешней 2 и внутренней 3, а также выходного фланца 4 и входного 5. Фланцы 4 и 5 соединены с торцами оболочки 2 и оболочкой 3. Камера 1 посередине её длины соединена с кольцевой щелью 6 с полостью внутренней оболочки 3. У кольцевой щели 6 со стороны входного фланца 5 размещен огнепреграждающий элемент 8. Устройство устанавливается на трубопроводе 7.

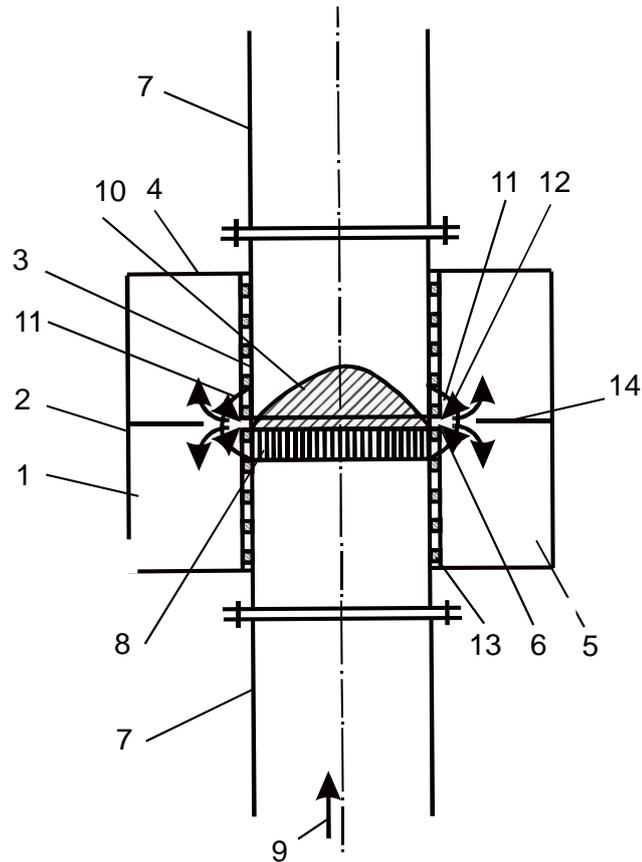


Рисунок 3.6 – Принципиальная схема устройства

1 – аккумулярующая камера; 2 – наружный трубопровод; 3 – внутренний трубопровод; 4 – входной фланец; 5 – выходной фланец; 6 – кольцевая щель; 7 – внутренний трубопровод; 8 - огнепреградитель; 9 – направление движения МВС; 10 – стабилизированное пламя; 11 – зона горения в камере; 12 – инертные дымовые газы; 13 – спиральная навивка; 14 – кольцевая перегородка

В нормальном режиме поток горячей газовой смеси 9 проходит через огнегасящий элемент 8, затем по внутренней оболочке устройства 3 и далее по трубопроводу 7. При этом между камерой 1 устройства и потоком горючей газовой смеси происходит газообмен, приводящий к установлению в них одинакового состава горючей газовой смеси.

При возникновении пламени, перемещающегося в направлении движения горючей газовой смеси 9 оно проходит через каналы огнегасящего элемента 8 и гаснет вследствие интенсивного теплоотвода из зоны горения.

Если же пламя возникает с другой стороны огнепреградителя, то, перемещаясь навстречу потоку газовой смеси, оно достигнет огнепреграждающего элемента 8 и будет им стабилизировано в позиции 10. Однако при этом фронт пламени разделится и часть его 12 будет перемещаться через щель 6 по горячей газовой смеси в аккумулирующей камере 1 в обе стороны. При этом поверхность горения и скорость образования дымовых газов увеличатся в два раза по сравнению с известным решением.

Образующиеся при горении в аккумулирующей камере 1 инертные дымовые газы 12 будут остывать по мере удаления от зоны горения 11 и, выходя из камеры 1 через щель 6, будут попадать в зону горения потока газовой смеси, в результате чего пламя 10 будет потушено.

Пламя 11, перемещаясь по камере 1, подойдет к фланцам 4 и 5 и из-за отсутствия горючей смеси также потухает.

Дымовые продукты, оставшиеся в камере 1, сравнительно быстро остынут, а входящий в их состав (для горючих смесей, содержащих водород и кислород) водяной пар конденсируется. При этом давление в камере 1 резко упадет, что будет способствовать её заполнению новой порцией горючей газовой смеси. При повторном появлении пламени предлагаемое устройство опять его потушит.

Увеличить скорость распространения пламени в камере сгорания предлагается искусственной ее турбулизацией. Распространение пламени в условиях практического состояния покоя МВС представляет непрерывный процесс с некоторым ускорением реакции в условиях параллельного дополнительного переноса тепла продуктов сгорания в зону пламени. В турбулентном пламени реакция развивается в таких же условиях по температуре и составу МВС, как и в ламинарном режиме. Однако, в турбулентном пламени фронт горения искривляется и значительно увеличивается. Механизм турбулентного распространения пламени зависит от масштаба поверхности фронта пламени, в котором происходит турбулентное горение, т.е.:

$$U_m = U_n \frac{F_m}{F_n}, \quad (3.6)$$

где  $U_m$  и  $U_n$  - турбулентная и нормальная скорость горения, м/с;

$F_m$  и  $F_n$  - поверхность фронта турбулентного и ламинарного пламени, м<sup>2</sup>.

Установка спиральных навивок на стенки трубопроводов внутри камеры сгорания позволяет создать условия искусственной степени турбулентности распространения пламени.

Учитывая, что в камере сгорания будут распространяться как ламинарное, так и турбулентное пламя, необходимы экспериментальные исследования процесса распространения фронта пламени.

Согласно методике расчета соотношения параметров наружной и внутренней трубы устройства, принятой в работе [46], транспортируемая МВС до возникновения реакции имеет определенное:

- давление,  $P_0$ , Па;
- температуру,  $T_0$ , К;
- расход,  $Q_0$ , м<sup>3</sup>/мин.

Эти величины связаны между собой уравнением Менделеева-Клапейрона (принимая газ за идеальный газ):

$$P_0 \cdot Q_0 = \frac{M}{\mu} \cdot R \cdot T_0, \quad (3.7)$$

где  $M$  - масса газовой смеси;

$R$  - газовая постоянная 8,31 Дж/моль-град.;

$\mu$  - молекулярный вес смеси, кг/м<sup>3</sup>.

В процессе горения состояние газов меняется [46]:

$$P_1 \cdot Q_1 = \frac{M}{\mu} \cdot R \cdot T_1, \quad (3.8)$$

где  $P_1, Q_1, T_1$  - давление, объем и температура газов в зоне реакции.

При истечении продуктов горения во внутреннюю полость устройства состояние газов опять изменяется:

$$\frac{P_2 \cdot Q_2}{T_2} = \frac{M}{\mu} \cdot R, \quad (3.9)$$

где  $P_2, Q_2, T_2$  - давление, объем и температура продуктов горения в кольцевой камере на стадии подавления пламени.

Уравнение Менделеева-Клапейрона позволяет оценить состояние газов на интересующем нас этапе, минуя промежуточные стадии (в нашем случае стадию горения газов в камере), поэтому можно сопоставить состояние газов до горения и в момент тушения пламени.

Значения  $M$ ,  $\mu$  и  $R$  при переходе из одного состояния в другие не меняются, поэтому из уравнений 3.7 и 3.9 (при постоянном давлении) имеем:

$$\frac{P_0 \cdot Q_0}{T_0} = \frac{M}{\mu} \cdot R, \quad (3.10)$$

$$\frac{P_2 \cdot Q_2}{T_2} = \frac{M}{\mu} \cdot R, \quad (3.11)$$

$$\frac{P_0 \cdot Q_0}{T_0} = \frac{P_2 \cdot Q_2}{T_2}. \quad (3.12)$$

Откуда принимая, что горение газовой смеси идет при постоянном давлении, имеем:

$$\frac{Q_0}{T_0} = \frac{Q_2}{T_2} \text{ и } Q_2 = \frac{Q_0 \cdot T_2}{T_0}. \quad (3.13)$$

Расход инертных газов в камере определяется по формуле:

$$Q_2 = S_{nl} \cdot u_n, \quad (3.14)$$

где  $S_{nl}$  - поверхность пламени, м<sup>2</sup>;

$u_n$  - нормальная скорость горения, м/с.

Количество образующихся продуктов горения можно определить:

$$Q_2 = S_{кк} \cdot u_{n \text{ нл}}, \quad (3.15)$$

где  $S_{кк}$  - сечение камеры горения,

$u_{n \text{ нл}}$  - скорость перемещения пламени по камере.

Требуемое количество продуктов горения, получаемых в камере горения и истекающих в зону тушения, определяется (как указывалось ранее) расходом транспортируемой по трубопроводу МВС и их флегматизирующей способностью. По данным [49,50,73,74] метан не горит при любых соотношениях в смеси с воздухом, содержащим 32% продуктов горения (азот, углекислый газ, водяной пар). В негорючей смеси (метан - воздух - продукты горения) – доля последних, таким образом, составляет около 30% (при стехиометрическом соотношении горючего и окислителя), т.е.

$$Q_2 = 0,30 \cdot Q_{\Pi} \text{ или } Q_2 = 0,30 \cdot S_{\text{ТР}} \cdot V_{\Pi}. \quad (3.16)$$

Подставляем значение  $Q_0$  из уравнения 3.12 в уравнение 3.13:

$$Q_2 = \frac{S_{\text{КК}} \cdot V_{n \text{ нл}} \cdot T_2}{T_0}. \quad (3.17)$$

Приравниваем правые части уравнений 3.16 и 3.17:

$$\frac{S_{\text{КК}} \cdot V_{n \text{ нл}} \cdot T_2}{T_0} = 0,30 \cdot S_{\text{мп}} \cdot V_n, \quad (3.18)$$

откуда: 
$$S_{\text{КК}} = 0,3 \frac{S_{\text{мп}} \cdot V_n T_0}{V_{n \text{ нл}} \cdot T_2}. \quad (3.19)$$

При наличии двух камер, одновременно подающих инертные газы в зону горения, сечение каждой должно быть:

$$S_{\text{КК1}} = S_{\text{КК2}} = 0,15 \frac{S_{\text{мп}} \cdot V_n T_0}{V_{n \text{ нл}} \cdot T_2}. \quad (3.20)$$

Для цилиндрической формы камеры выражение 3.14 можно представить

в виде: 
$$\frac{\pi \cdot D^2}{4} - \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0,15 \frac{\pi \cdot d_{\text{мп}}^2}{4} \cdot V_n \cdot T_0}{V_{n \text{ нл}} \cdot T_2}, \quad (3.21)$$

откуда диаметр каждой камеры равен:

$$D = \sqrt{d^2 + 0,15 \frac{d_{\text{мп}}^2 \cdot V_n \cdot T_0}{V_{n \text{ нл}} \cdot T_2}}, \quad (3.22)$$

где  $D$  - больший диаметр кольцевой камеры;

$d$  - меньший диаметр кольцевой камеры;

$d_{mp}$  - внутренний диаметр трубопровода;

$V_n$  - скорость потока;

$V_{n\text{пл}}$  - скорость распространения пламени.

Анализируя зависимости (3.17) и (3.20) и имеющиеся данные об исследуемых процессах, следует отметить, что ряд факторов, влияющих в конечном итоге на эффективность тушения продуктами горения, нуждаются в экспериментальном определении или уточнении (температура продуктов горения в зоне тушения, скорость перемещения пламени в камере кольцеобразного сечения), так как зависят, в той или иной степени, от конструктивных особенностей устройства:

длины кольцевой камеры;

размеров наружной и внутренней труб;

соосности внутренних трубопроводов и зазора между ними;

величины зазора кольцевой перегородки;

параметров огнепреграждающего элемента.

Известно, что если величина критерия Пекле будет больше 65, то огнепреградитель не задержит пламя, если меньше – локализует его. Отношение критической величины критерия Пекле к полученной характеризует коэффициент запаса огнепреградителя [46]:

$$\eta = \frac{P_{екр}}{P_e} = \frac{65}{P_e} \geq 2. \quad (3.23)$$

Исходные и расчетные данные (критерий Пекле и коэффициент запаса), характеризующие гасящую способность сетчатых огнепреграждающих элементов при горении МВС, приведены в таблице 3.1. Расчеты проведены автором для смесей с 10% содержанием метана для медных полутомпаковых сеток (ГОСТ 6613-73) и при нормальных условиях.

Таблица 3.1

## Запас надежности огнепреграждающих элементов

Размер ячеек, мм	Толщина проволок, мм	Концентрация метана, %	Нормальная скорость горения, м/с	Критерий Пекле	Коэффициент запаса надежности
1	2	3	4	5	6
4,1	0,60	9,5	0,36	65	1,00
2,5	0,50	то же	то же	40	1,63
2,0	0,50	-//-	-//-	32	2,03
1,6	0,50	-//-	-//-	26	2,50
1,25	0,40	-//-	-//-	20	3,25
1,0	0,40	9,5	0,36	16	4,06
0,9	0,40	то же	то же	15	4,33
0,8	0,30	-//-	-//-	13	5,0
0,7	0,30	-//-	-//-	11	5,91
0,63	0,30	-//-	-//-	10	6,5

Конструкция огнепреградителя считается удовлетворительной при коэффициенте «запаса надежности» более двух. Данные таблицы 3.1 показывают, что огнегасящие элементы следует изготавливать из сеток с ячейками менее 2 мм.

Расчет аэродинамического сопротивления сетчатого огнепреградителя необходимо выполнять [46]:

$$h_{on} = n \cdot \xi_c \cdot \frac{v^2}{2g} \gamma, \text{ кг/м}^2, \quad (3.24)$$

где  $n$  - количество сеток, шт.;

$v$  - скорость потока газа, м/с;

$g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\gamma$  - удельный вес газа, кг/м<sup>3</sup>;

$\xi_c$  - коэффициент сопротивления сетки.

$$\xi_c = (1 - \bar{f}) + \left( \frac{1 - \bar{f}}{\bar{f}} \right)^2, \quad (3.25)$$

где  $\bar{f}$  - относительное живое сечение сетки.

$$\bar{f} = \frac{l_1 \cdot l_2 + l_1 \cdot n_1 \cdot \delta_1 - l_2' \cdot n_2 \cdot \delta_2 + n_1 \cdot \delta_1 \cdot n_2 \cdot \delta_2}{l_1 \cdot l_2}, \quad (3.26)$$

где  $l_1, l_2$  - размеры сетки, мм;

$n_1, n_2$  - число поперечных и продольных проволок, шт.;

$\delta_1, \delta_2$  - толщина поперечных и продольных проволок, мм.

### 3.3. Влияние роста давления исходной смеси на пределы горения МВС

Реализация концепции расширения использования собственных энергетических ресурсов Донбасса, применение прогрессивных технологий и использование альтернативных видов энергоносителей, в том числе использование шахтного метана, позволит сократить затраты на импорт природного газа и создать дополнительно рабочие места.

Многие технологии утилизации шахтного метана, заимствованные из других отраслей, в которых изначально предусматривалось использование не содержащих кислород горючих газов (природный, попутный, нефтяной и др.), не могут в полной мере отвечать требованиям безопасности в угольной промышленности.

Технологии утилизации шахтного метана тепло-генераторными установками, двигателями теплоэлектростанций, а также некоторые системы подготовки к потреблению предусматривают использование МВС, сжатой до 20 атм. Однако известно, что с увеличением исходного давления расширяется диапазон взрывчатости горючих смесей [51].

Установок по утилизации МВС, использующих высокое давление шахтного газа, не очень много. Их применение на шахтах ГП «Макеевуголь» оказалось не очень эффективным.

Газотурбинная электростанция ЭГ-1000, мощностью 1000 кВт, производства НППО «Турбогаз» использовалась для утилизации кондиционного газа (100%) из поверхностных скважин на участке Бутовский-Глубокий №2 (поле шахты имени В.М.Бажанова). Давление подаваемого шахтного метана на входе в турбину – до 1,2 МПа.

Со скважиной ЭГ-1000 была соединена газопроводом диаметром 219 мм и длиной 350 м. По мере снижения давления и дебита метана из действующей скважины предусматривалось бурение и подключение к трубопроводу новых скважин. Реализация проекта закончилась нехваткой объемов МВС.

Газотурбинная электростанция ПАЭС-2500 мощностью 2,5 МВт изготовлена предприятием «Мотор-Січ» для утилизации метановоздушной смеси подземной дегазации угольных шахт, проходила испытания на шахтах ГП «Макеевуголь». Следует отметить, что проектом не были оговорены требования безопасности при утилизации, хотя при сжигании в турбину подается горючая смесь под давлением 1-2 МПа.

Число работ в области процессов горения при высоких давлениях значительно меньше, чем при давлениях, близких к атмосферному или пониженных давлениях. Результаты весьма противоречивы. На рисунке 3.7 приведены данные различных авторов для верхнего предела горения МВС от ее давления при комнатной температуре. Опыты Берла [52] (поз.1 на рисунке 3.7) показывает, что по мере повышения концентрации метана от 8% и более пределы горения с ростом давления сужаются. Результаты исследований Терраса и Пленца [53] (поз.2 на рисунке 3.7) зафиксировали постоянство верхнего предела с ростом давления до 14 атм. В работах Джонса [54] (поз.3 на рисунке 3.7) при давлении 20 атм. верхний предел горения составляет 30% содержания метана.

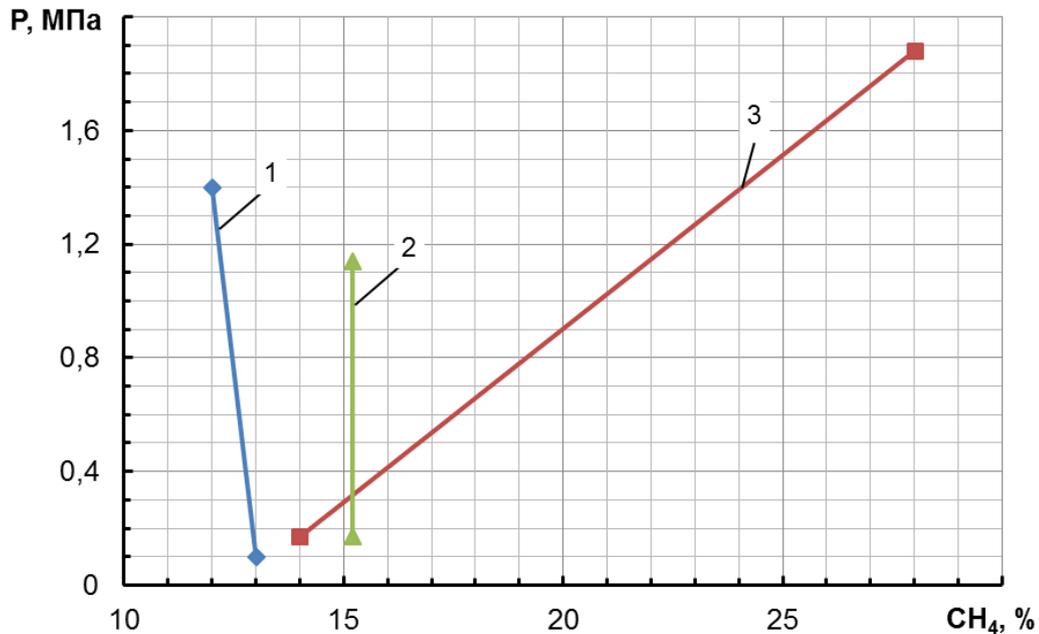


Рисунок 3.7 – Данные разных авторов о верхних пределах горения МВС с ростом давления

1 – Берл; 2 – Терраса и Пленца; 3 – Джонс

Анализ некоторых литературных данных показал, что вопрос о существовании фундаментальных значений пределов горения остается открытым в связи с недостаточностью теоретической проработки вопроса и ограниченностью экспериментальных данных о влиянии давлений смеси на параметры взрыва.

Характерная особенность сгорания в закрытом сосуде заключается в сопровождающем его росте давления. Сгорание, не предусмотренное регламентом, может быть причиной разрушения аппаратуры и производственных помещений. Рост давления при сгорании определяется термодинамическими характеристиками горючей системы и возможностью тепловых потерь от нагретых продуктов реакции. Величина этих потерь в первую очередь зависит от формы взрывного сосуда, которая определяет момент соприкосновения продуктов сгорания со стенками и начало интенсивного охлаждения.

При адиабатическом сгорании в замкнутом сосуде давление возрастает от начального  $p_0$  до  $p_b$  [62]:

$$p_b / p_0 = \eta T_{bv} / T_\theta, \quad (3.27)$$

где  $T_{bv}$  - температура горения при  $u = const$ .

Для сгорания при  $p = const$  будем обозначать величину  $T_b$  через  $T_{bp}$ ; очевидно, что  $T_{bv} > T_{bp}$ , теплоемкости при  $p = const$  или  $u = const$ . Тепловые потери минимальны в случае сгорания в сферическом сосуде при поджигании в его центре, тогда пламя касается стенок одновременно с полным завершением горения.

Сгорание в замкнутом сосуде при центральном поджигании отличается парадоксальной особенностью: несмотря на однородность газа и адиабатический характер процесса, продукты реакции сразу после сгорания нагреты неравномерно. Величина  $T_{bv}$  - только усредненная характеристика; истинная температура максимальна в центре и минимальна на периферии. Такая неравномерность обусловлена неодновременностью сгорания в различных точках реактора.

При сгорании в замкнутом сосуде газ нагревается в две стадии: в результате химической реакции и адиабатического сжатия. При сжатии от давления  $p_1$  до давления  $p_2$  абсолютная температура идеального газа возрастает от  $T_1$  до  $T_2$  эти величины связаны уравнением Пуассона [62]:

$$T_2 / T_1 = (p_2 / p_1)^{(\gamma-1)\gamma}, \quad (3.28)$$

Уравнение Пуассона описывает обратимое сравнительно медленное адиабатическое сжатие, не связанное с локальными изменениями давления, при этом энтропия системы остается неизменной. Проведенные исследования позволяют определить расчетным путем (аналитически) насколько повысится температура МВС при сгорании в закрытом сосуде за счет адиабатического сжатия и химической реакции.

Одно из наибольших затруднений при оценках взрывоопасности смесей горючего с окислителем связано с влиянием давления на пределы взрываемости  $\pi_{кр}(p)$ . Имеющиеся разрозненные данные по этому вопросу мы будем использовать с помощью моделирования. Хотя зависимость  $\pi_{кр}(p)$  и не очень

сильная, соответствующая поправка к значениям пределов взрываемости, известным большей частью лишь для атмосферного давления, оказывается существенной. Это обусловлено большим различием сопоставляемых давлений: экономически целесообразно для интенсификации процесса применять давления, значительно превышающие атмосферное. Зависимость пределов взрываемости от давления, принимая, что  $\alpha_{кр} \sim p^\varepsilon$ , выглядит в виде:

$$d \lg \alpha_{кр} / d \lg p = \varepsilon. \quad (3.29)$$

На конкретных примерах мы не определим величину  $\varepsilon$  и степень ее постоянства для каждого объекта.

Поэтому единым критерием определения границ пределов горения МВС, обеспечивающих безопасность транспортирования и утилизации на практике, являются результаты, полученные экспериментально, что и предопределяет актуальность исследований.

Известно также, что при инициировании взрыва МВС источником поджигания, создающим высокое давление в ударной волне (например, при взрыве заряда взрывчатого вещества), верхний предел горения метана в воздухе увеличивается до 20% [46].

В опытах с распространением пламени вверх (поджигание в нижней части сосуда) стадия расширения пределов горения МВС по мере повышения давления выражена более значительно, особенно для богатых смесей углеводородов. В этих условиях, а также в опытах Берла [52] и Бона [55] с более ослабленными смесями, кроме фактора уменьшения относительных теплотерь, не исключена возможность благоприятствующего действия кинетических факторов. Согласно Бабкину В.С. и Козаченко Л.С. [56] отрицательная зависимость скорости пламени от давления в смеси с содержанием метана 13% слабее в диапазоне 10-70 атм., чем в диапазоне 1-10 атм. По данным Штрауса и Эдса [57] в смесях с содержанием метана 12-14% скорости пламени приблизительно равны при давлениях 21,4 атм. и 90 атм. Неясен вопрос об использовании сосудов малого размера при высоких давлениях, т.е. в условиях быстрого развития

конвекции, увеличения относительных теплотерь и преувеличенной энергии зажигания. При этом возможно поддержание горения в малом объеме и перенос нестационарного пламени конвекций через весь объем.

Расширение пределов горения с увеличением давления имеет своим следствием уменьшение расчетной температуры пламени в предельных составах [58] и снижение минимальной концентрации кислорода, необходимой для поддержания процесса распространения пламени [59, 60, 61]. В этом также проявляется специфическое влияние давления, поскольку при атмосферном давлении температура пламени на пределах горения остается почти постоянной при изменении начальной температуры или рода разбавителя [58]. Интересно, что с увеличением давления, как показывают расчеты, температура пламени на богатом пределе уменьшается более быстро, чем на бедном. Например, температура пламени на богатом пределе смеси природного газа с воздухом при давлении 136 атм. на  $580^{\circ}\text{C}$  ниже, чем на бедном и составляет около  $400^{\circ}\text{C}$  [58]. Столь низкая температура горячего пламени кажется необычной. Наблюдаемые в кислородных смесях этилена [50] и пропилена [61] аномально высокие значения отношения давления взрыва к начальному давлению (7-10 атм.) вблизи богатых пределов и при повышенных давлениях можно объяснить только повышенной температурой.

Изучение околопредельных явлений горения при повышенных давлениях осложняется еще и тем, что наши сведения о кинетике химических реакций в пламени, о структуре фронта, о нестационарных процессах зажигания и формирования пламени, о влиянии размеров реакционного сосуда и пр. остаются пока весьма ограниченными для области высоких давлений.

Проведенный анализ имеющихся экспериментальных и аналитических исследований позволил установить тенденцию пределов горения МВС в закрытом сосуде. Исследования роста давления исходной смеси на пределы горения МВС показали, что определение взрывобезопасного режима подготовки и утилизации шахтного метана при давлениях больше атмосферного сводится к установлению предельных концентрационных пределов воспламенений для ме-

тана, извлекаемого дегазационными системами угольных шахт, и требует дополнительных экспериментальных исследований, которые выполнены автором в данной работе.

### 3.4. Оценка критического диаметра огнепреграждающего элемента с ростом давления

Технологии утилизации шахтного метана тепло-генераторными установками, двигателями теплоэлектростанций, а также некоторыми системами газоподготовки предусматривают использование МВС, сжатой до 20 атм.

Для горючей смеси с определенными исходными температурой и давлением всегда могут быть найдены столь узкие каналы, через которые пламя не сможет проходить. Наибольший размер таких каналов называется критическим. Его величина зависит от горючих свойств смеси, ее состояния и состава. Закономерности гашения пламени метановоздушных смесей были изучены в работах [62, 63].

Закономерности теплового режима пламени определяют граничные условия его устойчивого существования [62]. При неадиабатическом сгорании в подкритическом режиме температура продуктов сгорания ( $T'_b$ ) меньше температуры пламени ( $T_b$ )  $T'_b < T_b$ , а скорость пламени ( $u'_n$ ) меньше нормальной скорости пламени ( $u_n$ )  $u'_n < u_n$ .

Тепловые потери уменьшают нормальную скорость пламени не более чем в  $\sqrt{e}$  раз. При более интенсивной теплоотдаче стационарное горение прекращается. На пределе гашения при  $u'_n = u'_{нкp}$  [62]

$$T'_b = T'_{bкк} = T_b - \theta, \quad (3.30)$$

где  $\theta$  – характеристический интервал температур.

Тепловые потери понижают температуру зоны реакции не более, чем на характеристический интервал, то есть на величину порядка 100°K. Предельный режим распространения пламени соответствует условию:

$$u_n = (1/\rho_0)\sqrt{2e\chi_b\rho_bq_c/c\theta} = (1/c\rho_0)\sqrt{2e\lambda_bq_c/\theta}, \quad (3.31)$$

где  $\rho$  – плотность газа;

$\chi$  – температуропроводность смеси;

$\rho_0$  – плотность продуктов горения;

$q_c$  – тепловой поток;

$c_0$  – теплоемкость газа;

$\theta$  – характеристический интервал температуры.

Общие закономерности для предельных условий стационарного распространения нормального пламени в неадиабатическом режиме определяются уравнением (3.31), которое связывает интенсивность теплоотвода из зоны реакции с критической скоростью пламени [64]. Для очень медленного пламени основные тепловые потери обуславливают существование концентрационных пределов распространения пламени. Для более быстрого пламени, теплоотвод незначителен. Однако прекратить горение может кондуктивный теплоотвод, достаточно возрастающий при соответствующем уменьшении диаметра канала, по которому распространяется пламя. При кондуктивном теплоотводе уравнение (3.31) остается в силе, но величина  $q_c$  будет другой.

Для объяснения такой особенности рассмотрено распределение температуры в газе и в стенке канала после сгорания; соответствующие параметры для каждой из этих сред отмечены индексами  $g$  и  $s$ . После сгорания газ нагрет до  $T_b$ , температура стенки  $T_0$ . При этом возникает бесконечно большой тепловой поток, и в обеих средах мгновенно устанавливаются конечные перепады температуры  $\Delta Tg$  и  $\Delta Ts$ . Для приближенной оценки принято распределение температуры линейным. При дальнейшем теплообмене заметно изменяется не  $\Delta T$ , а ширина прогретых зон, поскольку уже при небольшом охлаждении самой горячей точки газа, при котором  $\Delta Tg \leq T_b - T_0 - \theta$  пламя затухает.

Количества тепла, отданного газом и принятого стенкой, равны, а значит, равны и тепловые потоки в обеих фазах. При этом слой газа шириной  $x_g$  охла-

дился до средней температуры  $(T_b + T_0)/2 \approx \Delta T_g/2$ , слой твердого тела  $x_s$  нагрелся в среднем до  $(T_0 + T_s)/\Delta T_s$ . При линейном распределении:

$$\lambda_g \Delta T_g / x_g = \lambda_s \Delta T_s / x_s, \quad (3.32)$$

где  $\lambda_g$  и  $\lambda_s$  - теплопроводность газа и твердого тела;

$x_g$  и  $x_s$  - слой газа и твердого тела

$$c_g p_g x_g \Delta T_g = c_s p_s x_s \Delta T_s, \quad (3.33)$$

откуда:

$$\Delta T_s = \Delta T_g \sqrt{\lambda_g c_g p_g / \lambda_s c_s p_s}. \quad (3.34)$$

Ввиду большой разности плоскостей сгорающего газа и материала пламегасящей стенки, каков бы ни был последний,  $\Delta T_s \leq \Delta T_g$ . Так, для сгорания метановоздушной смеси в стеклянном капилляре при  $T_b = 2000$  К  $\lambda_g = 1,0 \cdot 10^{-3}$ ,  $\lambda_s = 5,9 \cdot 10^{-3}$ , Вт/(см·К);  $c_g p_g = 2,2 \cdot 10^{-4}$ ,  $c_s p_s = 2,2$  Дж/(см<sup>3</sup>·К),  $\Delta T_g = 1700$  К,  $\Delta T_s = 7$  К. Для горения той же смеси в медном капилляре  $\lambda_s = 3,9$  Вт/см·К,  $c_g p_g = 3,4$  Дж/см<sup>3</sup>·К,  $\Delta T_s = 0,25$  К. Теплопроводности твердых материалов здесь различаются в 600 раз,  $\Delta T_s$  в 38 раз, однако различие  $\Delta T_s$  не имеет практического значения, поскольку оба  $\Delta T_s$  очень малы по сравнению с  $\Delta T_g$ .

Практически не нагревая при этом стенки канала, газ, сгорающий в огнепреградителе, охлаждается. Хотя тепло отводится к стенке, существенная часть теплоотдачи происходит не в ней, а в газе. Аналогично этому при тепловом взрыве скорость теплоотвода от саморазогревающейся среды также определяется теплопроводностью газа, а не стенок реактора. Значительное нагревание стенок возможно только при длительном истечении сгоревшего газа.

Независимость пределов гашения от материала стенок подтверждена многими экспериментами. Это имеет большое значение для рационального конструирования огнепреградителей. При выборе материала руководствуются только размерами образующихся каналов, газопроницаемостью, механической прочностью и стоимостью огнепреградителя [65].

В результате обобщения опытных данных рассчитывать величину критического гасящего размера можно исходя из известного правила постоянства критерия Пекле по следующей формуле [46]:

$$Pe_{кр} = \frac{u_n \cdot P \cdot C_o \cdot d_{кр}}{R \cdot T_o \cdot \lambda}, \quad (3.35)$$

$P$  - давление МВС;

$C_o$  - теплоемкость смеси, кДж/м<sup>3</sup>·°К;

$u_n$  - нормальная скорость распространения пламени, м/с;

$d_{кр}$  - критический диаметр канала, м;

$T_o$  - температура смеси, °К;

$R$  - газовая постоянная, кДж/(кмоль·°К).

Из уравнения видно, что пределы гашения определяются в основном следующими факторами:

- нормальной скоростью распространения пламени;
- размерами пламегасящих каналов;
- исходным состоянием горючей смеси (температура, давление и теплоемкость).

Пределы гашения слабо зависят от начальной температуры метановоздушной смеси, уменьшая  $d_{кр}$  на 20-25% с ростом  $T_o$  от 20 до 370°С. Незначительно также влияние теплоемкости МВС  $C_o$  [66].

Влияние давления на нормальную скорость горения  $u_n$  обычно представляют в виде [62]:

$$u_n \sim P^\delta. \quad (3.36)$$

Величину  $\delta$  для метановоздушных смесей в ограниченном диапазоне можно считать постоянной. В работе [61] было установлено, что при номинальной скорости  $u_n < 0,45$  м/с  $\delta$  находится в интервале  $\delta = -(0,10 - 0,45)$ , а при скорости  $u_n > 1,0$  м/с  $\delta > 1$ .

При разбавлении горючей системы компонентами, не участвующими в основной реакции в пламени, температура горения снижается, а тем самым уменьшается и нормальная скорость пламени, т. е. эти компоненты флегматизируют горение.

Флегматизатором во многих технологических процессах оказывается само избыточное горючее. Минимальную необходимую концентрацию избыточного горючего можно оценить по суммарному кислородному балансу с учетом соотношения содержаний всех горючих и окислителей.

Для метановоздушных смесей в нормальных условиях расчетное значение критического диаметра цилиндрических каналов равно 3,6 мм, а экспериментальные значения у разных авторов, в зависимости от условий экспериментов, находятся в пределах от 3,5 до 4,1 мм.

В этой связи представляет интерес проверка влияния роста давления исходящей среды на размер критического диаметра огнепреграждающего элемента.

## **ВЫВОДЫ**

К настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал по изучению процессов горения и тушения пламени в трубопроводах. Проведенный анализ результатов исследований в отечественных и зарубежных научных работах позволил показать:

- что на процесс устойчивого горения на выходе трубопровода влияют не только характеристики состава и скорости горючей смеси, но и конструктивные особенности среза трубопровода, формирующие образование поджигающего кольца;
- возможность тушения стабилизированного огнепреградителем пламени продуктами сгорания из двух изолированных камер в трубопроводах, транспортирующих МВС к утилизирующим агрегатам (газа дегазации), что позволит совершенствовать устройство тушения пламени;

- влияние роста давления исходной смеси на пределы горения МВС и необходимости их корректировки (до 25%) в действующих нормативных документах для утилизирующих установок с повышением давления;
- размер критического диаметра огнепреграждающего элемента для горючей смеси с некоторыми исходными данными может изменяться с ростом давления и требует экспериментальной проверки гасящей способности сетчатого огнепреградителя.

Для разработки параметров устройства тушения пламени, изучения процессов горения и тушения МВС необходимо провести дополнительные экспериментальные исследования применительно к условиям утилизации шахтного метана:

- создать экспериментальные стенды и опытные образцы устройства по изучению процессов горения и тушения МВС;
- разработать методики и провести экспериментальные исследования;
- определить влияние толщины стенки на срезе трубопровода на устойчивость горения МВС;
- определить изменения концентрационных пределов горения и оценить критический диаметр сетчатого огнепреграждающего элемента с ростом давления исходной смеси до 20 атм.;
- исследовать процессы горения в камерах кольцеобразного сечения и определить необходимые объемы продуктов сгорания для тушения стабилизированного пламени.

На основании полученных результатов исследований предполагается определить параметры и разработать техническое задание на создание опытных образцов устройства тушения пламени в газотранспортных системах утилизации шахтного метана. Опытные образцы будут подвергнуты испытаниям на прочность и герметичность по определению аэродинамического сопротивления газовому потоку, локализации и тушения пламени, проникнувшего в газопровод.

## РАЗДЕЛ 4

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ТУШЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ТРУБОПРОВОДАХ

#### 4.1. Определение влияния толщины стенки на срезе «свечи» на процессы горения

В связи с тем, что предложенная конструкция устройства тушения предусматривает гашение стабилизированного на огнепреградителе пламени, необходимо определить влияние конструкции среза трубопровода (торца) на устойчивость горения на выходе из трубопровода. Поверхность стабилизированного на срезе трубопровода представляет ассиметричный полый конус с вершиной, степень закругления которой зависит от скорости потока МВС. Толщина пламени горения смеси около 0,5 мм. У основания конуса пламени имеется «кольцевое пламя» - зона горения газовой смеси в слое, образовавшемся в результате завихрения на срезе трубы. Это кольцо позволяет удерживаться пламени на выходе из трубопровода.

Для изучения процессов горения на выходе (срезе) трубопровода был создан экспериментальный стенд (рисунок 4.1).

Стенд состоит из побудителя расхода воздуха 1, системы трубопроводов 2, регулирующей аппаратуры 3, 4, 6, 13, 14, узла подачи метана 5, камеры смешивания 8, станций замера 7,9,11, исполнительного органа 10 и источника воспламенения 12.

Исполнительный орган 10 представляет собой трубопровод с внутренним диаметром 56 мм. При проведении экспериментов толщина стенки на выходе трубопровода изменялась от 42 мм до 0,001 мм (рисунок 4.2).

Скорость потока измерялась анемометром LUGA (ФРГ), концентрация метана – газоанализатором Dräger (ФРГ) и контрольным отбором проб, разделанных на хроматографе. Расход метана определяли с помощью реометра РДС. Смесь поджигалась стационарно установленной бытовой электрозажигалкой ЭЗ-2.

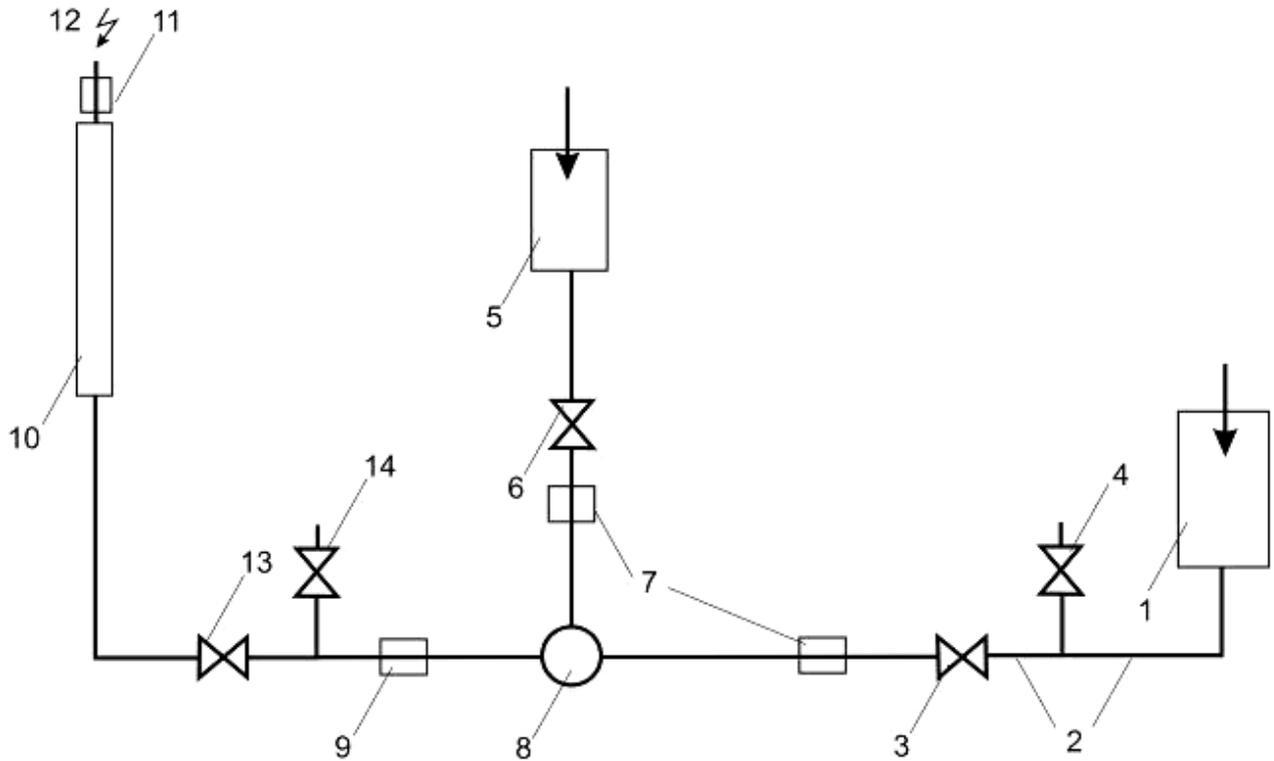


Рисунок 4.1 – Схема экспериментального стенда

1 – побудитель расхода воздуха; 2 – система трубопроводов; 3, 4, 6, 13, 14 - регулирующая аппаратура; 5 – узел подачи метана; 7, 9, 11 – станции замера; 8 - камера смешивания; 10 – исполнительный орган; 12 – источник воспламенения

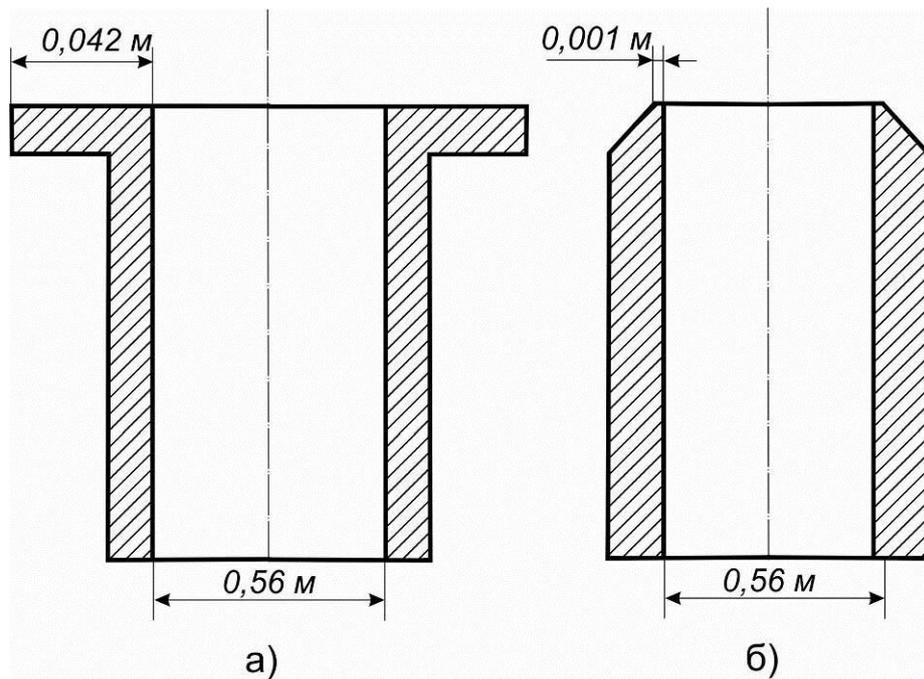


Рисунок 4.2 – Схема исполнительного органа с диаметром стенки на срезе трубопровода: а – 0,042 м, б – 0,001 м

Возможное развитие процесса горения на выходе из трубопровода (устойчивое горение, отрыв пламени, проскок пламени в трубу навстречу потоку смеси) в зависимости от характеристик смеси и размеров толщины стенки фиксировались визуально.

Эксперименты проводились по следующей методической схеме.

Побудителем расхода воздуха 1 в трубопроводе 2 с помощью регулирующей аппаратуры 3, 4 создавался поток воздуха с требуемой скоростью.

Из устройства 5 метан в требуемом количестве (расход регулировался задвижкой 6) подавался в блок смешивания 8.

Избыток подаваемой МВС в установку утилизации обычно сбрасывается в атмосферу, поэтому условия её устойчивого горения на сбросной трубе при проведении исследований влияния толщины стенки торца трубопровода на процессы горения изменялись в пределах:

- концентрации метана от 7,1 до 14%;
- скорости потока от 1,0 до 4,0 м/с;
- толщины стенки трубопровода от 42 мм до 1 мм.

Количество опытов при одинаковых условиях принималось равным 3-5, для характерных точек – 10.

На рисунке 4.3 представлена зависимость влияния скорости проскока и отрыва пламени от концентрации метана в смеси с толщиной стенки торца 42 мм. Так при концентрации метана 7,5%, 10,8% и 12,0% скорость проскока пламени составила 1,7 м/с, 2,8 м/с и 2,5 м/с, а скорость отрыва пламени 2,1 м/с, 3,6 м/с и 2,8 м/с соответственно.

Уменьшение толщины стенки на срезе трубы на выходе до 1 мм (рисунок 4.4) привело к уменьшению скорости проскока на 21% при концентрации метана 7,5%, на 27% при концентрации метана 10,8% и на 19% при концентрации метана 12%, а скорость срыва пламени уменьшилась при концентрации метана 7,5% с 2,1 м/с до 1,6 м/с (31%), в смеси с содержанием метана 10,8% с 3,6 м/с до 2,6 м/с (44%) и при концентрации метана 12% – 21%.

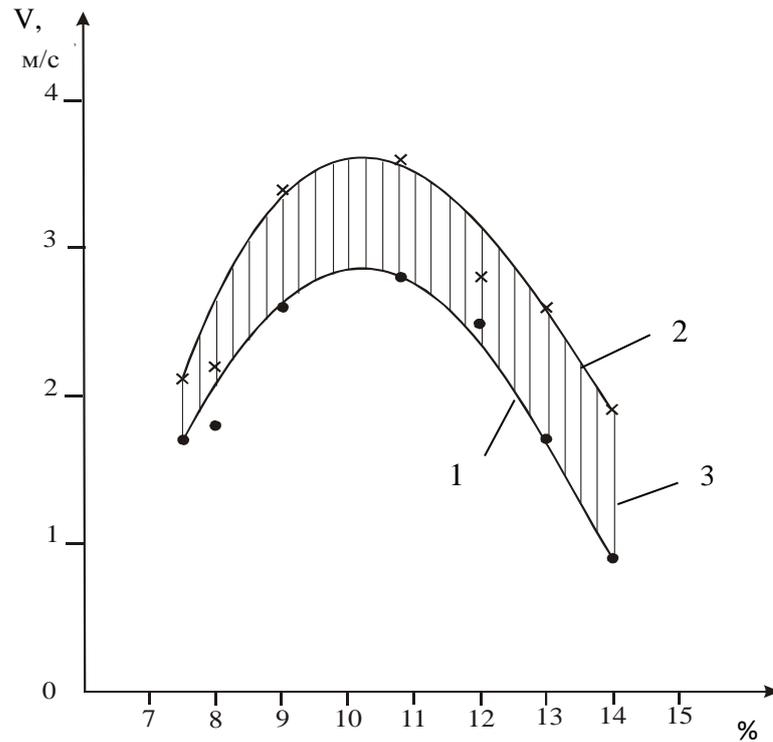


Рисунок 4.3 – Зависимость скоростей проскока  $V_{np}$  и отрыва пламени  $V_{om}$  от концентрации метана в смеси с толщиной стенки торца трубы 42 мм

1 – скорость проскока; 2 – скорость отрыва; 3 – зона устойчивого горения

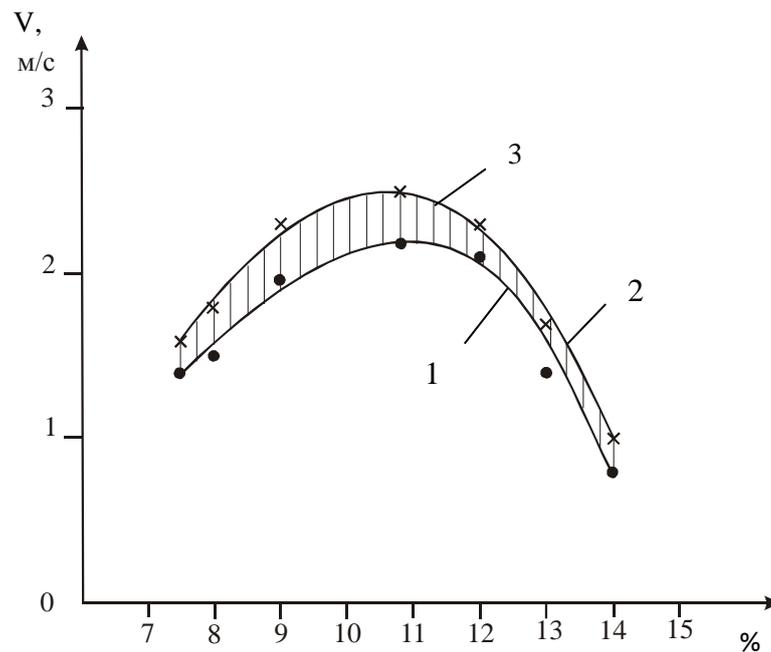


Рисунок 4.4 – Зависимость скорости проскока  $V_{np}$  и отрыва пламени  $V_{om}$  от концентрации метана в смеси с толщиной стенки торца трубы 1 мм

1 – скорость проскока пламени; 2 – скорость отрыва пламени;  
3 – зона устойчивого горения

Видно, что минимальные скорости проскока и отрыва пламени наблюдаются вблизи пределов горючести, а их максимум сдвинут к 10,5% концентрации метана. Уменьшение толщины стенки среза трубопровода поджигающего кольца позволило уменьшить или полностью исключить образование вторичного конуса пламени, образующего на поверхности торца трубопровода, тем самым горение МВС происходит под влиянием только основного поджигающего кольца, располагающегося в пристенном потоке МВС внутри трубопровода.

#### **4.2. Экспериментальные исследования процессов горения и тушения пламени в трубопроводах**

Эффективность взрывозащиты систем газопроводов, транспортирующих взрывчатые газы, зависит от способа обнаружения и тушения пламени, проникнувшего в трубопровод.

В связи с требованиями, предъявляемыми к автономным автоматическим устройствам обнаружения и тушения пламени в начальной стадии аварии, исполнительный орган (устройство тушения) должен обладать:

- простой конструкцией, содержащей минимальное количество механических звеньев;
- компактностью исполнения, позволяющей без особых затруднений размещать устройство в системах газоподготовки и утилизации шахтного метана;
- мгновенно осуществлять тушение проникнувшего пламени без нарушения основного технологического цикла;
- не зависит от наличия и качества огнетушащих средств электрической энергии и присутствия человека.

Реализация этих требований возможна при условии стабилизации распространяющегося пламени на огнепреградителе и тушении его продуктами сгорания части смеси, изолированной от основного потока.

В соответствии со схемой, приведенной на рисунке 4.1, был разработан экспериментальный образец устройства тушения пламени, стабилизированного на огнепреградителе (рисунок 4.5).

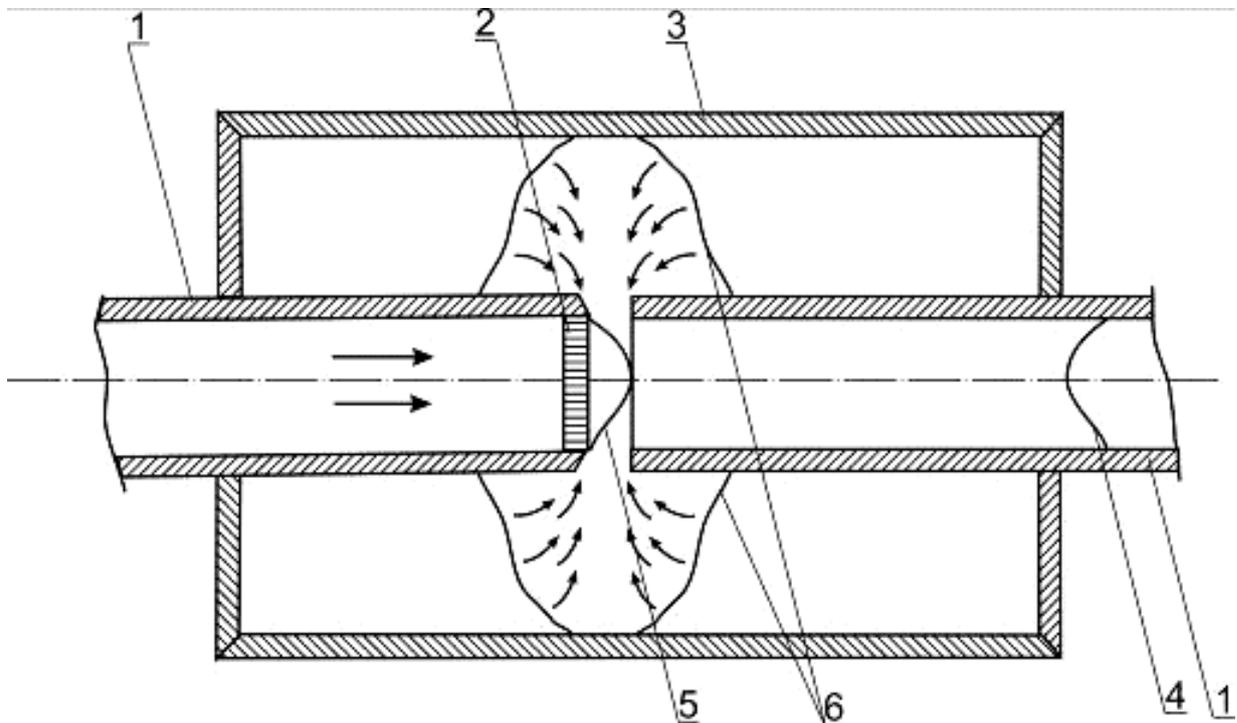


Рисунок 4.5 – Схема устройства тушения стабилизированного огнепреградителем пламени

1 – внутренний трубопровод; 2 – огнепреградитель; 3 – наружная труба; 4 – фронт пламени; 5 – фронт стабилизированного пламени; 6 – фронт пламени в камерах

Экспериментальный образец создавался таким образом, чтобы иметь возможность:

- оценить огнетушащую возможность устройства, увеличивая поверхность и скорость горения в аккумулирующей камере;
- определить скорости горения газовой смеси в кольцевых камерах устройства тушения для определения объемов продуктов сгорания, образующихся в единицу времени в зависимости от характеристик и конструктивных особенностей;

- изменять и определить оптимальные конструктивные параметры устройства, обеспечивающие взрывозащиту трубопроводов систем утилизации;
- проводить фотофиксацию процессов горения, локализации и тушения пламени в трубах и камерах кольцеобразного сечения в зависимости от физико-химических свойств горючей смеси.

Моделирование рабочего пространства кольцевой камеры устройства осуществлялась с помощью наружной трубы диаметром 150 мм и внутреннего трубопровода, диаметр которого изменялся в диапазоне от 50 до 112 мм и передвижными кольцевыми втулками. Применяемые стеклянные трубопроводы (наружный и внутренний) дали возможность с помощью кино съемки проследить происходящие в устройстве процессы. Кольцевые втулки выполнены из плотного резинового материала, что позволило путем их перемещения изменять длину камеры, обеспечивая необходимую герметизацию изолированного объема.

Для изучения скорости горения смеси в кольцевой камере устройства для количественной оценки объема продуктов горения, образующихся в единицу времени в зависимости от характеристик горючей смеси и конструктивных особенностей устройства, был изготовлен экспериментальный стенд (рисунок 4.6).

Стенд состоит из побудителя расхода воздуха 1, системы трубопроводов 2 регистрирующей аппаратуры 3, 4, 6, 13, 14, узла подачи метана 5, камеры смешения 8, замерных станций 9, 7, 11, камеры горения 10, источника воспламенения 12 и фоторегистрирующей аппаратуры 15.

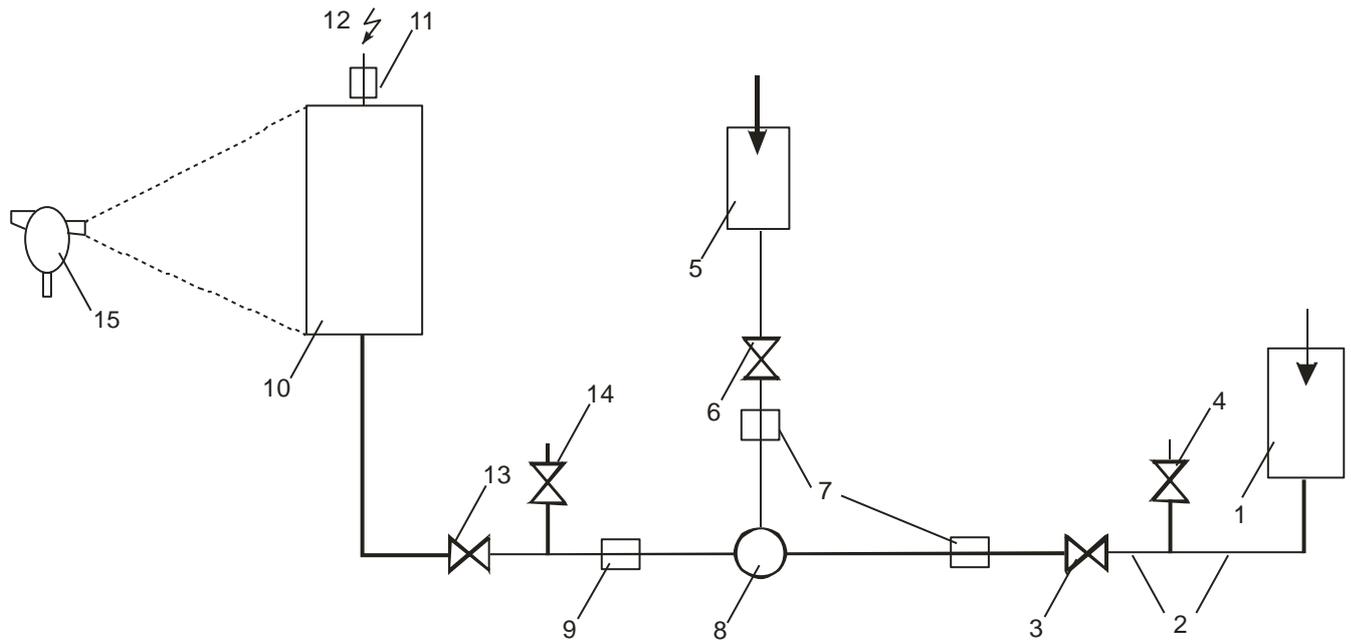


Рисунок 4.6 – Схема экспериментального стенда

1 – побудитель расхода воздуха; 2 – система трубопроводов; 3, 4, 6, 13, 14 - регулирующая аппаратура; 5 –узел подачи метана; 7,9,11 – замерная станция; 8 - камера смешивания; 10 – камера горения (стекло); 12 – источник воспламенения; 15 – фоторегистрирующая аппаратура

Диаметр трубопровода стенда был принят равным 50 мм. Огнепреграждающий элемент огнепреградителя был выполнен из плоской полутомпаковой сетки с размером ячейки 1,25 мм. Для турбулизации потока и ускорения горения в кольцевой камере на внешней поверхности внутреннего трубопровода устройства размещались металлические спиралеобразные ленты.

Скорость потока измеряли анемометром ЛюГа (Германия), концентрацию метана – лабораторным интерферометром Ли-4 м, переносным газоанализатором Dräger (Германия) и контролировался отбором проб, для разделки на хроматографе. Расход метана определяли с помощью лабораторного реометра РДС. Смесь поджигалась дистанционно электрозажигалкой ЭЗ-2.

Киносъемка фиксировалась цифровой кинокамерой.

Эксперименты проводились следующим образом. Побудителем расхода 1 в трубопроводе 2 с помощью регулирующей аппаратуры 3 и 4 создавался поток воздуха со скоростью, меньшей требуемой на 10-15%. Затем из устройства 5 метан в необходимом количестве (расход регулировался задвижкой 6) подавался в блока смешивания 8.

Расходы и концентрация компонентов и подготовленной МВС контролировались в замерных станциях 7, 9 и 11. Излишки смеси сбрасывались с помощью регулирующей арматуры 13 и 14.

При движении потока МВС по трубопроводу в кольцевых камерах устройства (за счет массообмена) создавалась такая же концентрация, как и в потоке. После контрольного замера содержания горючего в смеси производилось воспламенение смеси электрозажигалкой 12 и фиксировался процесс горения кинокамерой 15.

При проведении киносъемок процесса горения в трубах величина воздействующих факторов принималась:

скорость потока от 0,34 до 0,62 м/с;

концентрация метана от 7,1 до 12,2%;

шероховатость стенок – до 15 мм;

диаметр внутреннего трубопровода от 50 до 112 мм.

Результаты экспериментов горения и тушения МВС в кольцеобразных камерах устройства (см. рисунок 4.5) представлены в таблице 4.1.

Результаты экспериментов показали, что устройство с внутренним диаметром трубопровода 50 мм и длиной кольцевой камеры в диапазоне 500-1200 мм стабильно тушит МВС. С увеличением диаметра внутреннего трубопровода до 85 мм было получено 20% отказов. Нестабильное тушение пламени было зафиксировано для смесей (9,5%) и смесь с концентрацией метана 12,1% .

Таблица 4.1

## Эффективность подавления пламени

Концентрация метана, %	Скорость потока, м/с	Параметры устройства			Количество отказов
		диаметр внутренней трубы, мм	длина камеры, мм	зазор, мм	количество опытов
1	2	3	4	5	6
7,2	0,34	50	500	10	0/10
7,2	0,34	50	700	10	0/10
7,3	0,34	50	1200	10-20	0/10
7,3	0,34	85	500	10	0/10
9,6	0,35	50	500	10	0/10
9,6	0,35	50	700	10	0/10
9,6	0,35	85	1200	10-20	2/10
12,1	0,35	50	50	10	0/10
12,1	0,35	50	700	10	0/10
12,1	0,35	85	1200	10	2/10

Необходимо отметить, что устройство тушения пламени с одной камерой тушения с выходом продуктов сгорания по стенке, ограничивающей длину камеры, стабильно тушит пламя с теми же параметрами, что и испытываемый образец, поэтому было принято решение об установке кольцевой перегородки по середине аккумулирующей камеры [49] для увеличения теплоотвода от продуктов горения.

Схема устройства тушения пламени представлена на рисунке 4.7.

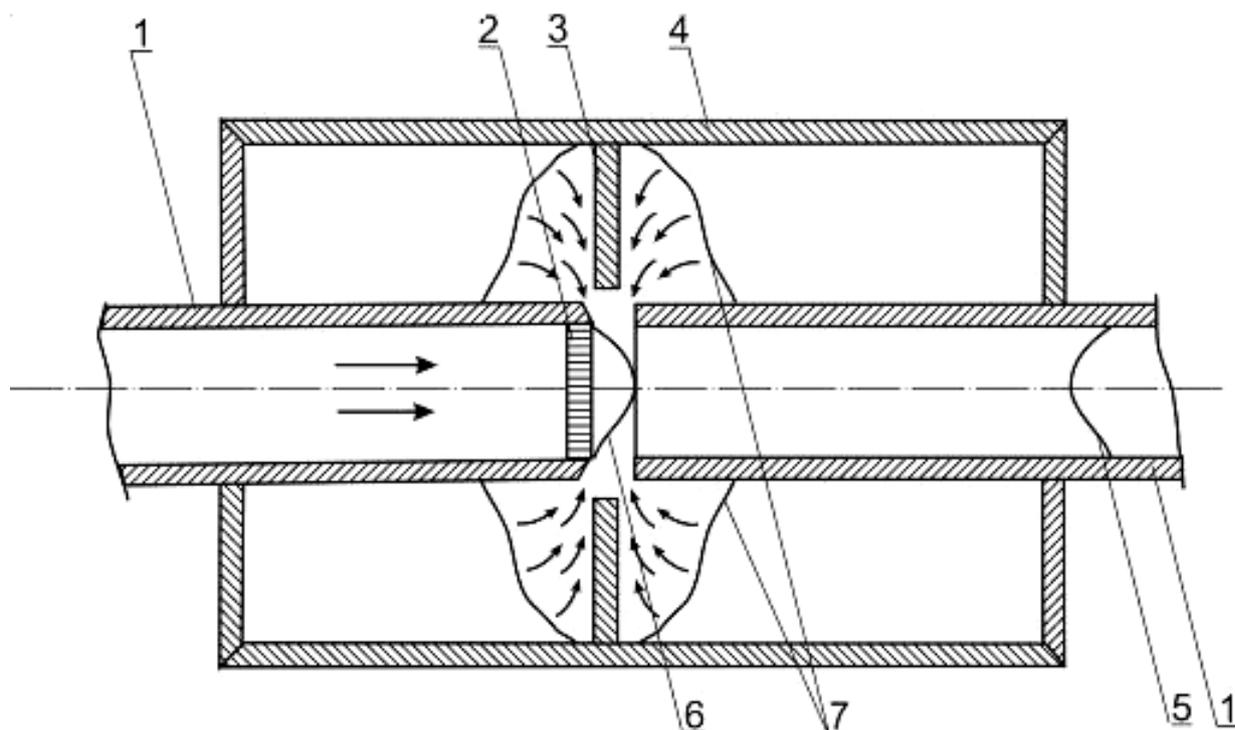


Рисунок 4.7 – Схема устройства тушения стабилизированного огнепреградителем пламени

1 – внутренний трубопровод; 2 – огнепреградитель; 3 – разделяющая перегородка; 4 – наружная труба; 5 – фронт пламени; 6 – фронт стабилизированного пламени; 7 – фронт пламени в камерах

В таблице 4.2 приведены данные максимальных скоростей распространения пламени навстречу потоку МВС в гладких трубопроводах диаметром 50 мм и 85 мм (внутренние трубопроводы устройства).

Учитывая, что пламя в кольцевой камере (см. рисунок 4.5) распространяется в обе стороны, поток инертных продуктов сгорания будет формироваться кольцевой перегородкой и подаваться в зону горения стабилизированного пламени одновременно, то для дальнейших расчетов принимаем среднюю скорость для обеих камер.

Таблица 4.2

## Скорость перемещения пламени в стеклянной трубе

Диаметр трубы, мм	Длина тру- бы, м	Скорость потока МВС, м/с	Концен- трация метана, %	Источник воспламене- ния	Скорость пламени от- носительно трубы, м/с	Скорость пламени от- носительно МВС, м/с
1	2	3	4	5	6	7
50	1200	0,34	7,1	эл. искра на выходе из трубы	0,29	0,63
-//-	-//-	0,34	7,1		0,31	0,65
50	1200	0,34	9,6	то же	0,46	0,80
-//-	-//-	-//-	9,6	-//-	0,44	0,78
-//-	-//-	-//-	9,6	-//-	0,50	0,84
50	1200	0,34	12,2	то же	0,33	0,67
-//-	-//-	0,34	12,2	-//-	0,34	0,68
-//-	-//-	0,34	12,2	-//-	0,34	0,68
85	1200	0,34	7,1	то же	0,37	0,71
-//-	-//-	-//-	7,1	-//-	0,38	0,72
-//-	-//-	-//-	7,1	-//-	0,37	0,71
85	1200	0,34	9,6	-//-	0,61	0,95
-//-	-//-	-//-	9,6	-//-	0,62	0,96
-//-	-//-	-//-	9,6	-//-	0,60	0,94
85	1200	0,34	12,2	-//-	0,41	0,75
-//-	-//-	-//-	12,2	-//-	0,42	0,76
-//-	-//-	-//-	12,2	-//-	0,41	0,75

Полученные после обработки киносъемки данные (рисунки 4.8-4.13) показали, что скорость распространения пламени в кольцевой камере с гладкими стенками возрастает с увеличением внутреннего диаметра трубопровода с 50 до 85 мм для стехиометрической смеси с 1,8 м/с до 2,05 м/с, для 12,1% смеси - с 1,15 м/с до 1,25 м/с. Скорость пламени горения МВС возрастает по мере передвижения его от входа в камеру и максимальные ее значения зафиксированы на последних кадрах съемки, вблизи торцевой стенки кольцевой камеры.

Установка спиральной навивки на поверхность внутреннего трубопровода позволила увеличить скорость горения в кольцевой камере. Значительное увеличение было зафиксировано при навивке с высотой и шагом равными 15 мм. Максимальное значение скорости для трубопровода диаметром 50 мм составило 4,0 м/с, а для трубопровода диаметром 85 мм – 4,4 м/с.

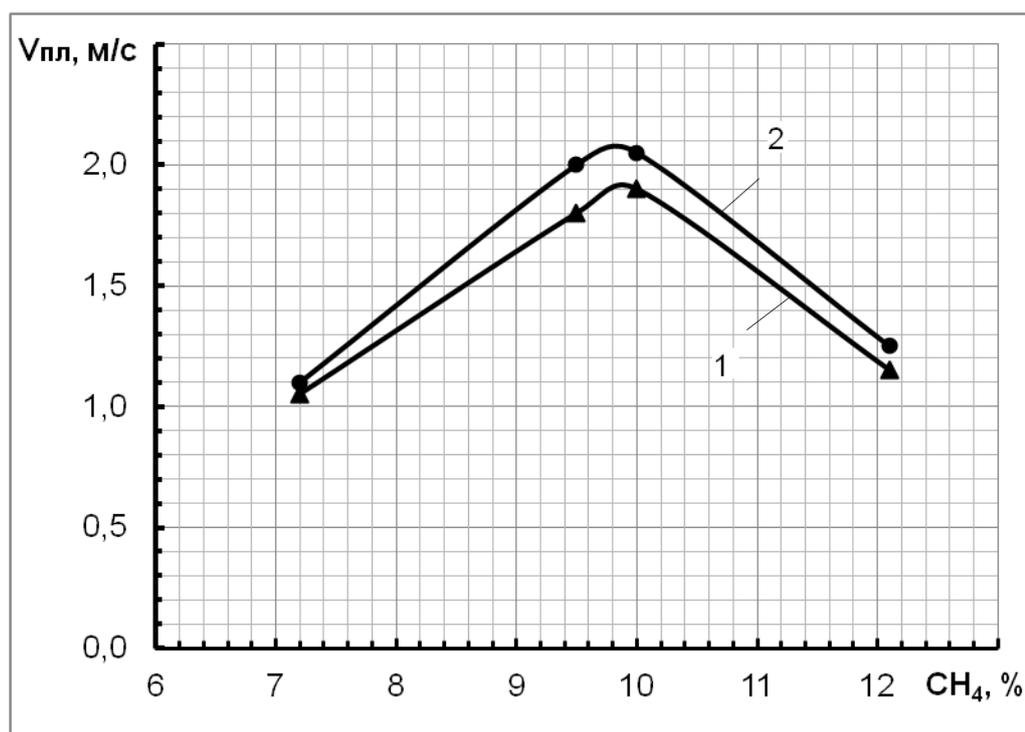


Рисунок 4.8 - .Скорость пламени в кольцевой камере

1 – диаметр внутреннего трубопровода 50 мм;

2 – диаметр внутреннего трубопровода 85 мм

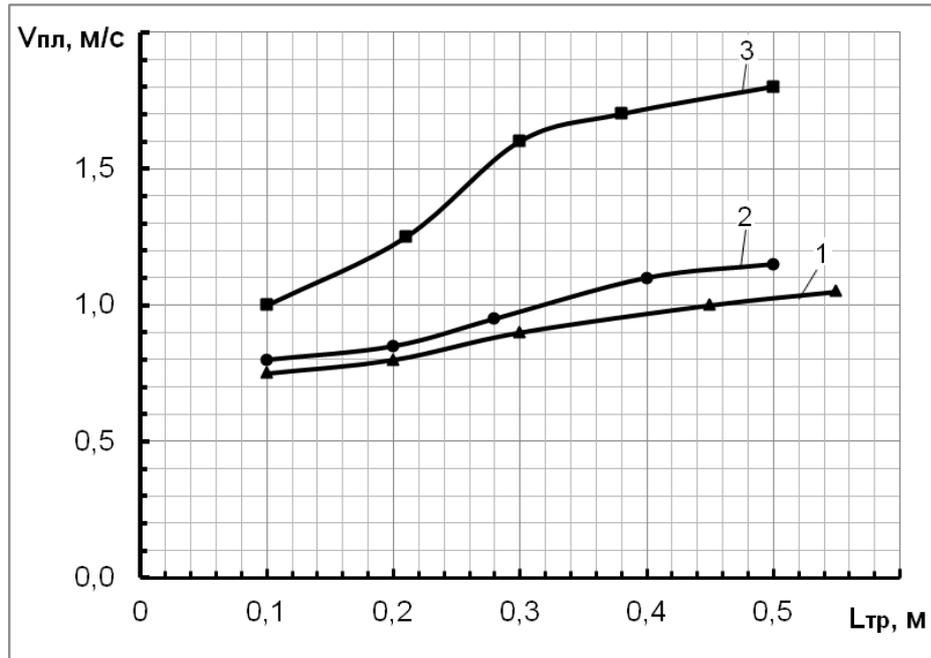


Рисунок 4.9 – Скорость распространения пламени в кольцевой камере с внутренним трубопроводом диаметром 50 мм

1 – содержание метана - 7,2%; 2 – содержание метана - 12,1%;  
3 – содержание метана - 9,6%.

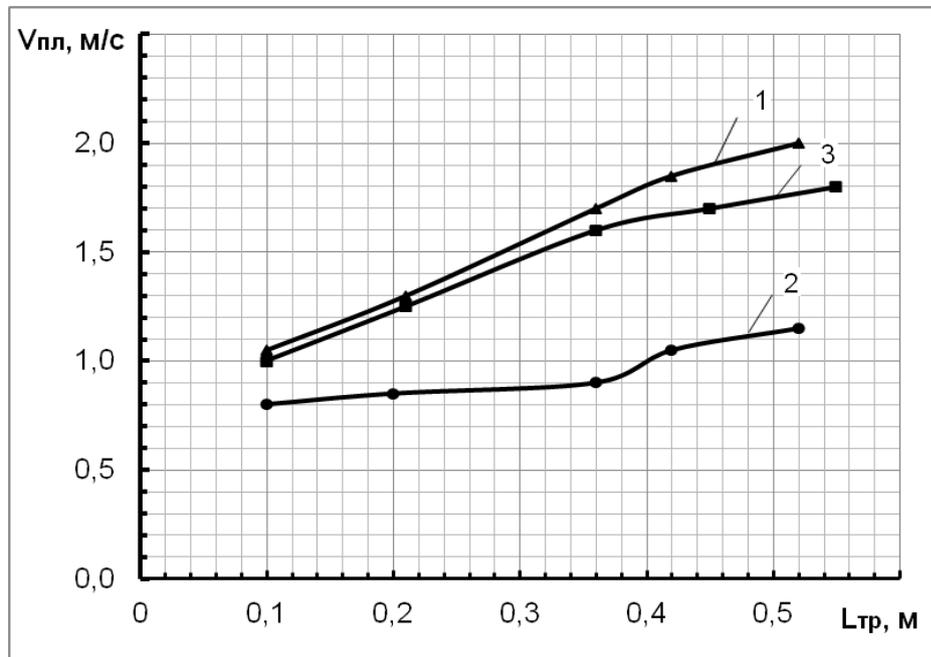


Рисунок 4.10 – Скорость распространения пламени в кольцевой камере с внутренним диаметром трубопровода 85 мм

1 – с концентрацией 7,2%; 2 – с концентрацией 12,1%;  
3 – с концентрацией 9,6%

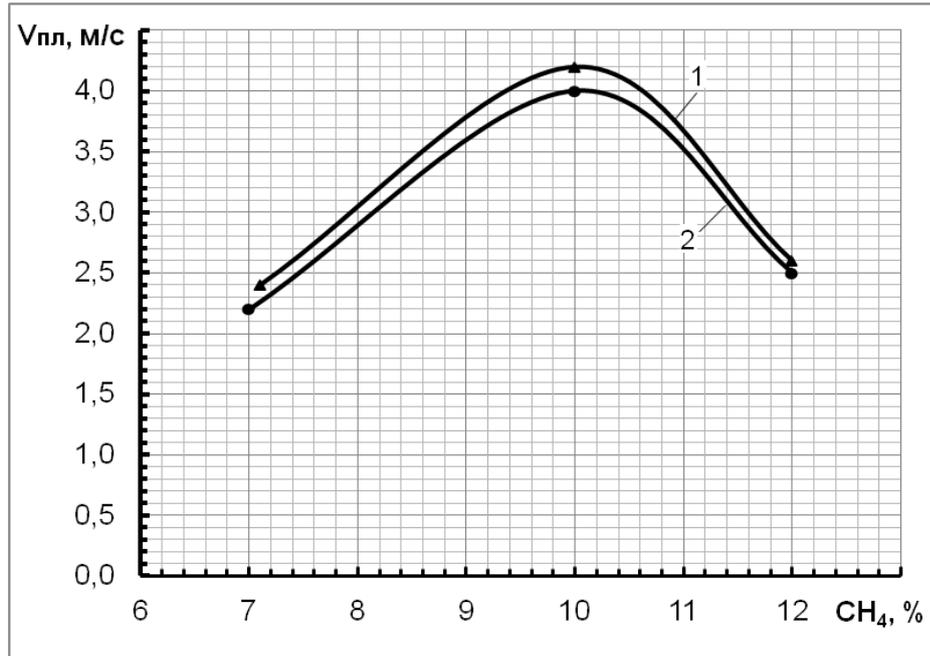


Рисунок 4.11 – Скорость пламени в кольцевой камере с навивкой на внутренней трубе

1 – диаметр внутреннего трубопровода 50 мм; 2 – диаметр внутреннего трубопровода 85 мм

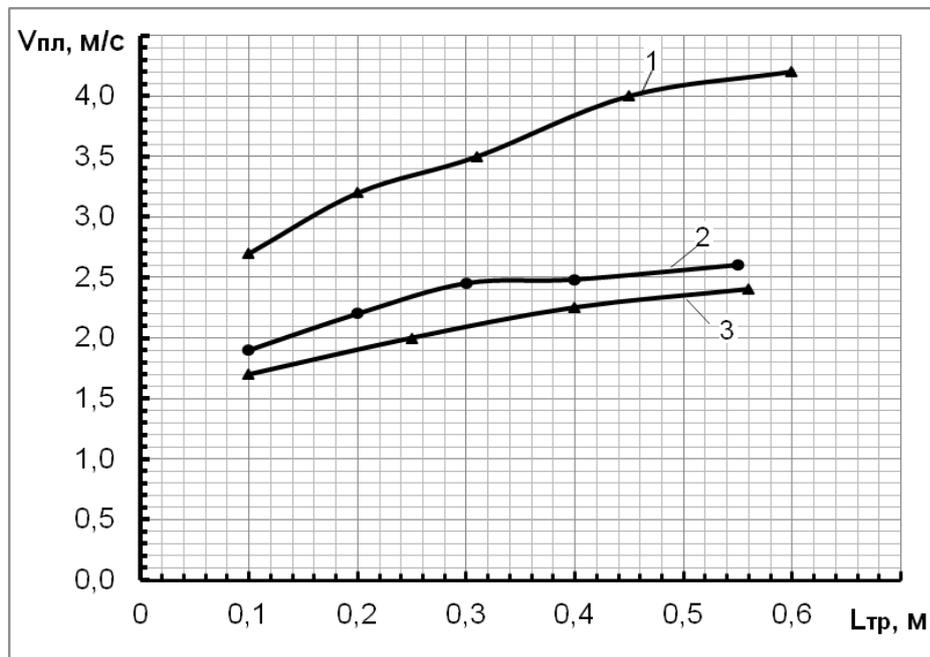


Рисунок 4.12 – Скорость распространения пламени в кольцевой камере с внутренним диаметром трубопровода 85 мм со спиральной навивкой

1 – концентрация метана 9,6%; 2 – концентрация метана 12,1%;  
3 – концентрация метана 9,6%

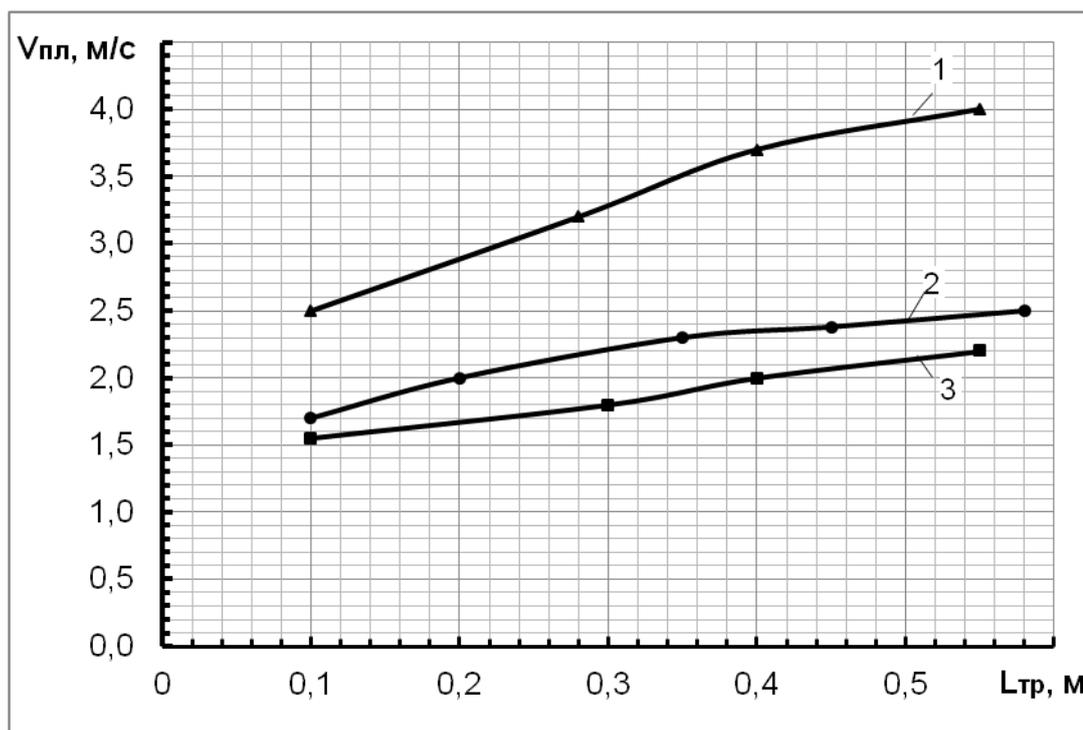


Рисунок 4.13 – Скорость распространения пламени в кольцевой камере с внутренним диаметром трубопровода 50 мм со спиральной навивкой

- 1 – концентрация метана 9,5%; 2 – концентрация метана 12,1%;  
3 – концентрация метана 7,6%

С целью оценки оптимальных конструктивных размеров устройства, влияющих на эффективность подавления горения метана, определялись:

- объем камеры путем изменения диаметра внутреннего трубопровода и длины камеры;
- размеры кольцевой перегородки, формирующей потоки горения из изолирующих камер в зону горения;
- соосность внутренних трубопроводов и величина зазора между ними;
- расположение осевой линии устройства относительно горизонтальной оси.

Влияние этих конструктивных параметров изучалось на стендах и экспериментальных моделях устройства, представленных на (см. рисунок 4.6), по соответствующим методикам проведения экспериментов.

При этом в каждой серии опытов изменялся один из параметров устройства при неизменных значениях других.

При проведении экспериментов значения контролируемых параметров изменялись в пределах:

диаметры внутренних трубопроводов от 50 до 112 мм;

суммарный объем камеры от 10 до 30 дм<sup>3</sup>;

размер щели, создаваемой кольцевой перегородкой, от 0 до 120 мм.

В ходе проведения экспериментов диаметр наружного трубопровода составлял 150 мм и не изменялся в процессе исследований. Диаметр огнепреградителя, состоящий из одной сетки с размером ячейки 0,63 мм, соответствовал диаметрам внутренних трубопроводов.

Результаты экспериментов приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3

Влияние параметров устройства подавления пламени на его эффективность

Концентрация метана, %	Скорость потока, м/с	Параметры устройства			Количество отказов
		диаметр внутренней трубы, мм	длина камеры, мм	зазор, мм	Количество опытов
1	2	3	4	5	6
7,1	0,34	50	1200	0	0/10
7,1	0,34	50	1200	80	0/10
7,1	0,34	50	1200	20	0/10
7,1	0,34	50	600	20	0/10
7,1	0,34	50	300	20	0/10
9,5	0,34	50	300	20	0/10
12,2	0,34	50	300	20	0/10
12,2	0,34	50	200	20	0/10

Окончание таблицы 4.3

1	2	3	4	5	6
7,0	0,42	85	300	20	0/10
9,6	0,42	85	300	20	0/10
12,1	0,42	85	300	20	0/10
12,1	0,42	85	250	20	0/10
7,1	0,62	102	300	20	0/10
9,5	0,62	102	300	20	1/10
12,1	0,62	102	300	20	0/10
9,5	0,62	112	300	20	8/10
7,1	0,62	112	300	20	6/10

Длина камеры устройства принималась равной сумме длин камер относительно кольцевой перегородки.

Исследования по влиянию расположения внутренних трубопроводов относительно оси устройства тушения пламени производились с целью недопущения заполнения водой кольцевой камеры при отсутствии систем водоотделения и осушки МВС, подаваемой на утилизацию. В ходе проведения экспериментов изменялось расположение трубопроводов устройства (нагнетательного (рисунок 4.14) и отводящего (рисунок 4.15)).

Результаты экспериментов показали, что изменение расположения нагнетательного и отводящего газопроводов (см. рисунок. 4.14) относительно оси устройства успешно тушат пламя при соотношении внутреннего и наружного диаметров устройства, равном 1:4, изменение соотношения в сторону уменьшения приводило к снижению эффективности тушения.

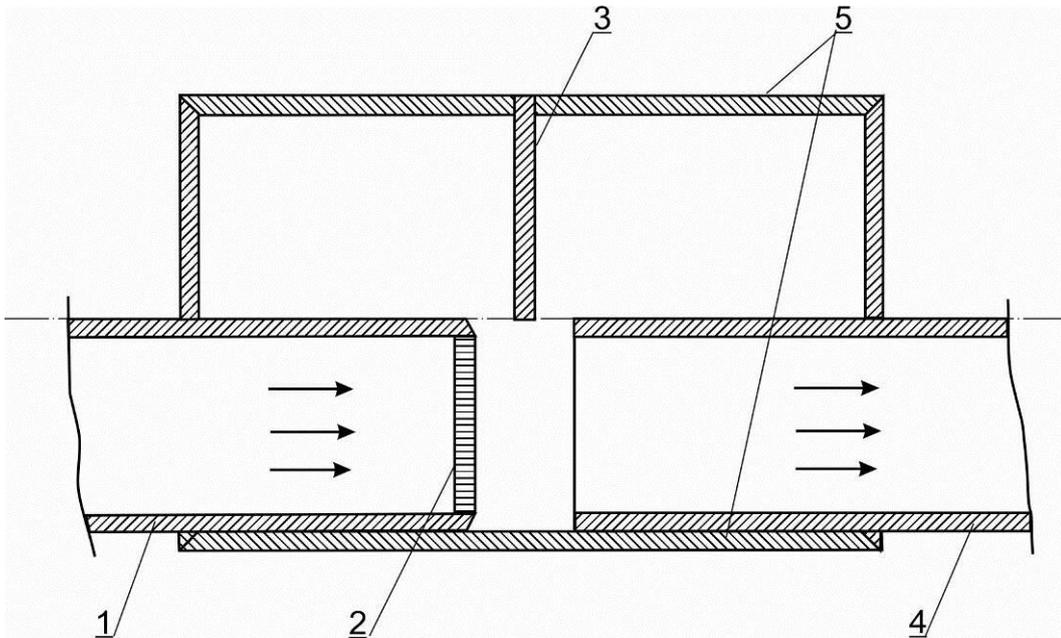


Рисунок 4.14 – Схема устройства тушения пламени с изменением расположения нагнетательного и отводящего газопроводов относительно оси

1 – внутренний нагнетательный трубопровод; 2 – огнепреградитель;  
 3 – кольцевая перегородка; 4 – внутренний отводящий трубопровод;  
 5 – наружный трубопровод

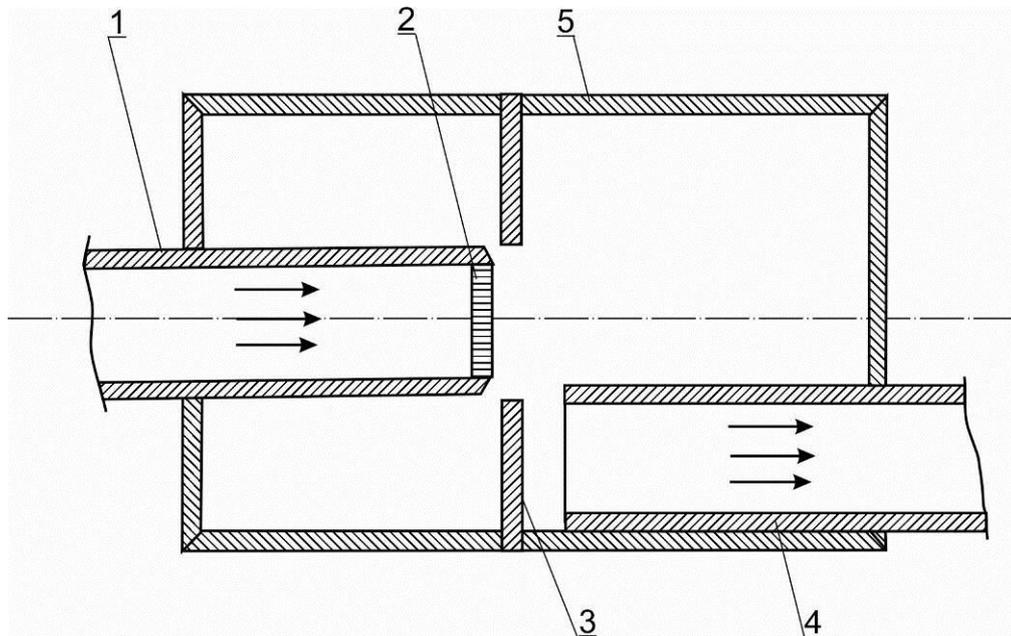


Рисунок 4.15 – Схема устройства тушения пламени с изменением расположения отводящего газопровода относительно оси

Изменения расположения только отводящего газопровода (см. рисунок 4.15) относительно оси устройства не повлияло на эффективность тушения пламени при соотношении диаметров 1:1,75.

Результаты экспериментов показали, что устройство с внутренним диаметром трубопровода 50 и 85 мм с суммарной длиной кольцевой камеры 300 мм стабильно тушат пламя во всем диапазоне концентраций. При уменьшении длины камеры до 200 мм с внутренним диаметром 102 мм были получены по одному отказу как при концентрации 9,6%, так и при концентрации 12,1%. Во всех положительных результатах величина зазора внутренней щели составляла 20 мм. Увеличение диаметра внутреннего трубопровода до 112 мм привело к 80% отказов при содержании метана в смеси 9,5% и 60% с концентрацией горючего 7,1%. Это свидетельствует о том, что при таком соотношении диаметров наружного и внутреннего трубопроводов камеры образуется недостаточное количество инертных газов.

Для надежного тушения пламени необходимо увеличить количество инертных продуктов сгорания, образующихся в единицу времени, путем увеличения соотношения диаметра наружной и внутренней трубы кольцевой камеры.

Расчетное значение отношений наружного и внутреннего диаметров кольцевой камеры [67], рекомендуемое к разработке опытных образцов, определяется из формулы (3.22), умноженной на  $K_3$ :

$$D = K \sqrt{d^2 + 0,15 \frac{d_{mp}^2 \cdot V_n \cdot T_o}{V_{n.нл} \cdot T_2}}, \quad (4.1)$$

где  $K$  - коэффициент запаса.

Практический опыт работы с горючими газовыми смесями показывает, что при установлении норм безопасности ведения работ обычно значение  $K$  составляет не менее 1,5.

Замеры температуры продуктов горения МВС в кольцевой камере выполнялись в работе [46]. Результаты замеров температуры приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4

## Температура продуктов горения у выхода из кольцевой щели

Концентрация метана, %	Время, с	Максимальная температура, °С	Минимальная температура, °С	Средняя температура, °С
1	2	3	4	5
7,3	1,10	1100	820	960
7,5	0,86	1200	850	1025
7,1	1,00	1100	840	970
9,5	0,40	1340	1020	1180
9,4	0,44	1280	950	1115
9,6	0,40	1300	1040	1190
12,0	1,10	1080	800	940
12,1	1,00	1280	860	1070
12,2	1,05	1240	840	1040

Измерения показывают, что температура продуктов горения на выходе их из кольцевого канала находится в пределах от 800°С до 1300°С в зависимости от содержания горючего вещества в МВС. Расширяясь в полости внутренней трубы устройства, продукты горения резко охлаждаются, и их температура у стенки кольцевой перегородки составляла 250-300°С.

Значения расчетных и экспериментально определенных диаметров трубопроводов устройства тушения пламени приведены в таблице 4.5.

Для унификации изготовления устройства тушения пламени допускается выполнять внутреннюю оболочку устройства из трубы защищаемого газопровода, а наружную оболочку выполнять с требуемым либо ближайшим большим диаметром трубы серийного производства.

Таблица 4.5

Расчетные и экспериментально определенные величины наружного и внутреннего диаметров параметрического ряда устройств тушения пламени

Диаметр труб, м	Критическая скорость потока, м/с	Скорость распространения пламени в камере, м/с	Начальная температура, °К	Температура продуктов горения газа на выходе, °К	Внутренний диаметр камеры, м	Расчетный наружный диаметр камеры, м	Экспериментально установленный диаметр (наружный), м
0,05	5,4	0,76	293	800	0,056	0,102	0,1
0,1	4,8	0,63	293	700	0,11	0,199	0,209
0,15	5,3	0,73	293	720	0,162	0,294	0,285
0,2	6,5	0,77	293	610	0,214	0,389	0,4
0,25	7,1	0,82	293	510	0,261	0,457	0,483
0,275	8,2	0,78	293	470	0,288	0,524	0,51
0,3	8,5	0,79	293	450	0,325	0,59	0,61

Погрешность результатов расчета с экспериментальными исследованиями не превысила 10%.

Длина кольцевой камеры должны составлять не менее 1,5 диаметра (каждая относительно кольцевой камеры) наружной оболочки устройства, так как после входа пламени горения МВС в кольцевую камеру её резкое ускорение происходит на расстоянии одного диаметра наружного трубопровода, после чего скорость пламени практически выстраивается.

Экспериментально автором установлено, что размер щели, создаваемой кольцевой перегородкой равный 20 мм позволяет успешно тушить пламя и быстро производить газообмен внутри аккумулирующей камеры.

Результаты работы изложены в работах [68, 69, 70].

### 4.3. Определение верхнего и нижнего пределов горения с повышенным давлением больше атмосферного

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- создание экспериментального стенда;
- разработка методики проведения экспериментов;
- выполнение исследований процессов горения МВС и определение нижнего и верхнего пределов горения при различных значениях давления.

Газ для проведения экспериментов был взят на автомобильной газозаправочной станции (АГНКС) ш/у «Донбасс», которая компримирует газ поверхностной дегазации на поле шахты «Глубокая». Состав смеси газов: водород ( $H_2$ ) – 0,003%, метан ( $CH_4$ ) – 96,0%, этан ( $C_2H_6$ ) – 0,250%, пропан ( $C_3H_8$ ) – 0,006%, бутан ( $C_4H_{10}$ ) – 0,007%.

Согласно известному правилу Ле Шателье по определению пределов горения и взаимного влияния компонентов сложных горючих смесей нижний предел горения данной смеси при нормальных условиях составил 5,29%, а верхний – 14,99% [62].

Для определения пределов горения при давлениях, кратных атмосферному, целесообразно готовить исследуемую смесь в специальном блоке подготовки. Поскольку коэффициент диффузии обратно пропорционален общему давлению, кондуктивное перемешивание окажется достаточно продолжительным. Блок подготовки был выполнен из баллона высокого давления, оснащенного устройством перемешивания компонентов смеси. Смесь подготавливалась при постоянном перемешивании, при этом давление повышалось несколько выше, чем намечалось в исследованиях.

Подготовленная смесь впускалась во взрывной сосуд и доводилась до заданного значения давления. После поджигания и фиксирования результата эксперимента взрывной сосуд продувался и заполнялся новой порцией смеси с давлением большим или меньшим (в зависимости от результата в предыдущем опыте).

Схема экспериментального стенда представлена на рисунке 4.16.

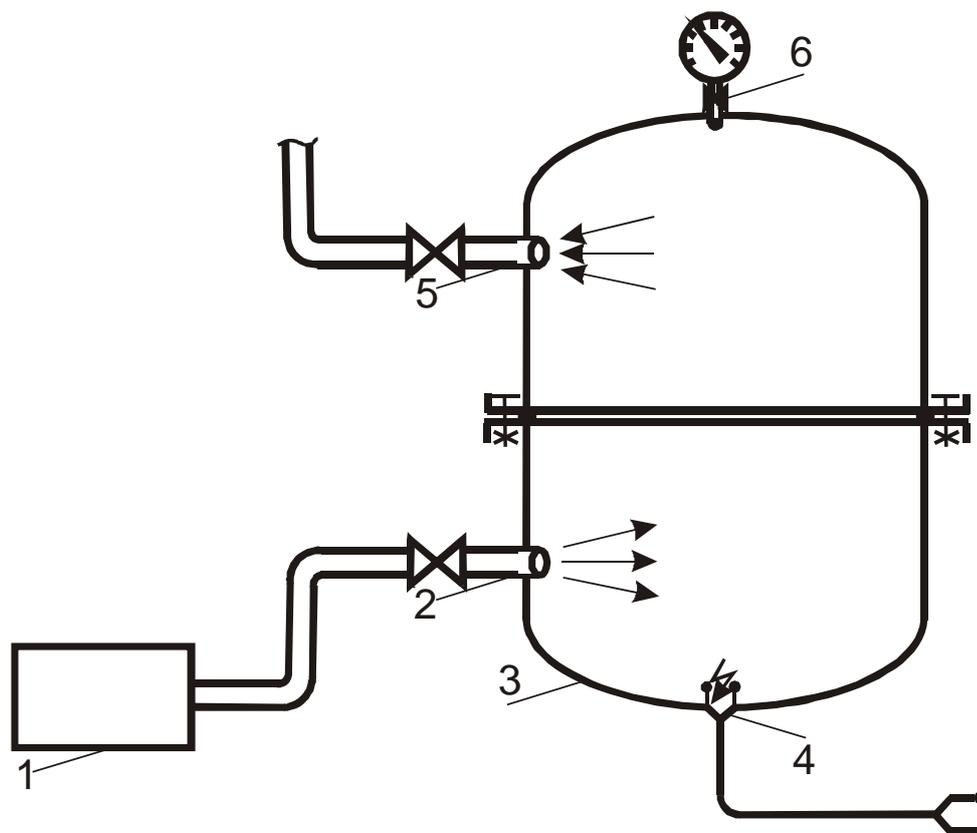


Рисунок 4.16 - Схема экспериментального стенда

1 – блок подготовки взрывчатой смеси; 2 – устройство подачи с запорной аппаратурой; 3 – взрывной сосуд; 4 – источник поджигания; 5 – выпускное устройство; 6 – блок контроля давления газа в сосуде

Взрывной сосуд 3 закрытого типа выполнен из толстостенной стали, способной выдержать высокое давление, возникающее при взрыве МВС. Диаметр сосуда должен быть большим, чтобы охлаждение горячей смеси стенкой было незначительным, а длина – чтобы рассеять избыточную энергию источника зажигания.

Горное бюро США стандартизировало размеры труб в экспериментальных установках. Диаметр должен быть не менее 50 мм, а длина не менее 1200 мм, поэтому для проведения экспериментов был создан взрывной сосуд

диаметром 150 мм и высотой 300 мм. Компоненты смеси (шахтный газ с воздухом) перед подачей во взрывной сосуд перемешивались до гомогенного состояния в блоке подготовки 1. Поджигание подготовленной смеси осуществлялось с помощью точечного разряда конденсатора 4. Считается, что такой источник поджигания обеспечивает мгновенный импульс с постоянной энергией, являющийся наиболее удобным и распространенным в исследованиях процессов горения и детонации [63]. Сгорание МВС фиксировалось по всплескам давлений в сосуде.

Верхний и нижний пределы воспламенения устанавливались с помощью последовательного изменения давления при одной концентрации до установления критической величины. Исследования проводились в интервале изменений давлений от 1 до 20 атм. Изменения атмосферного давления не учитывались, так как их влияние на результат эксперимента несущественно.

На рисунке 4.17 представлена зависимость предельных взрывчатых (минимальной и максимальной) концентраций метана при различной величине его давления. Ветви 1 и 2 описывают зависимость для обоих пределов. Как видно из рисунка 4.17 (ветвь 1), нижний предел практически не изменился. Верхний предел с увеличением давления до 20 атм. возрос до 19,7%.

Результаты экспериментов показали, что с ростом давления транспортируемой к утилизации МВС до 2,0 МПа, верхний предел горения увеличился до 19,7%, а нижний остался постоянным и равным 5,1%.

С целью недопущения образования взрывчатых смесей в системах утилизации в работе установлено формульное соотношение, позволяющее определять минимально допустимые концентрации метана СГ подаваемой смеси в зависимости от давления в сети.

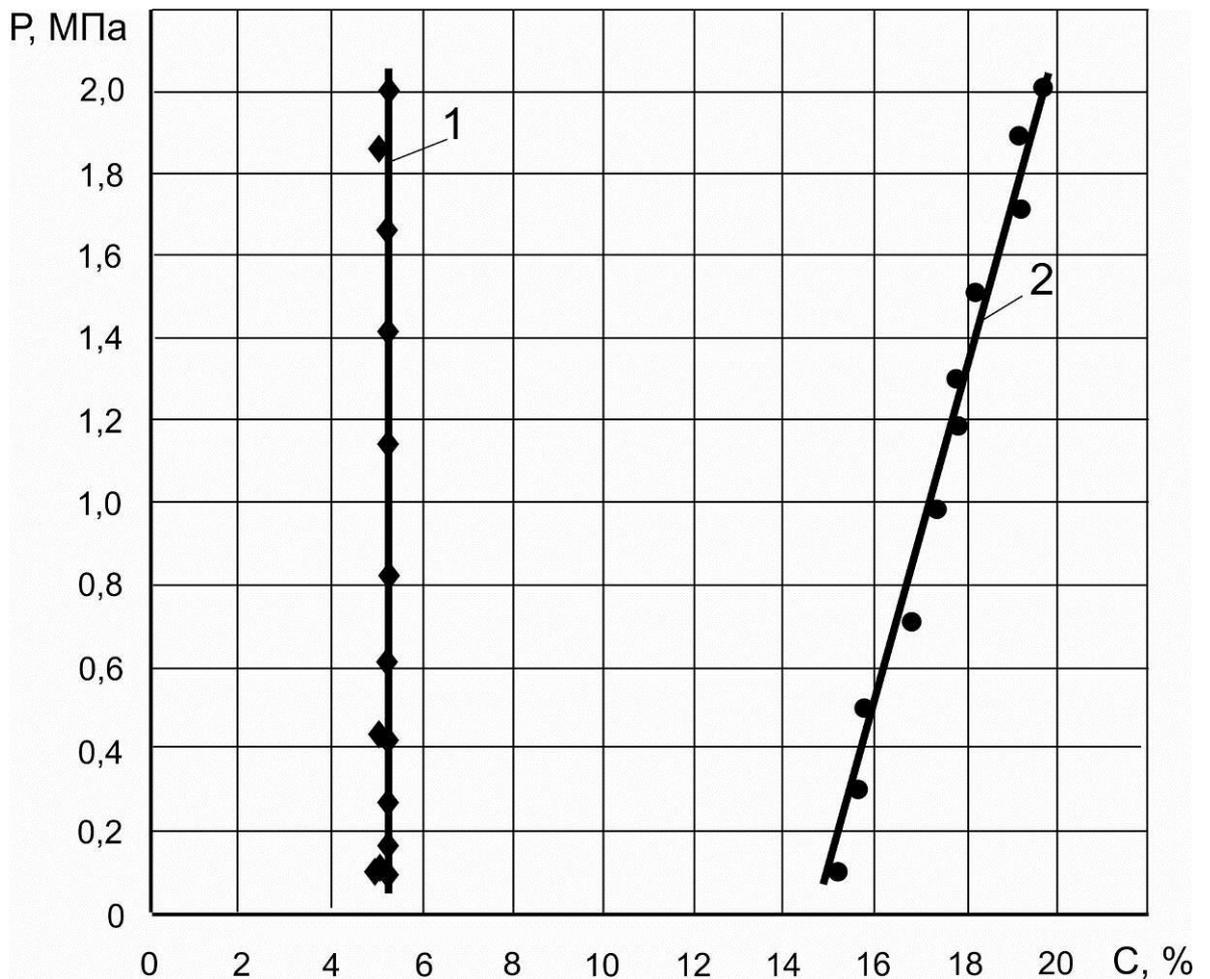


Рисунок 4.17 - Зависимость верхней и нижней границ воспламенения метана при различном давлении

1 – нижний предел горения; 2 – верхний предел горения

При определении границ безопасности автором была показана необходимость учитывать коэффициент взрывобезопасности  $k_B = 1,5$ , рекомендуемый в производствах со взрывоопасными газами:

$$C_B = k_B \left( 23,9 \cdot 10^{-2} P + A \right),$$

где  $P$  – давление МВС в системах подготовки к утилизации, атм.;

$A$  – верхний предел горения метана при нормальных условиях,  $A=15\%$ ;

$k_B$  – коэффициент взрывобезопасности ( $k_B = 1,5$ ).

Результаты работы изложены в работе [71].

#### 4.4. Определение критического диаметра огнепреграждающего элемента с ростом давления

Для определения критического размера канала гашения МВС при давлении больше атмосферного на экспериментальном стенде (рисунок 4.18) были проведены исследования тушения пламени сетчатым огнепреграждающим элементом.

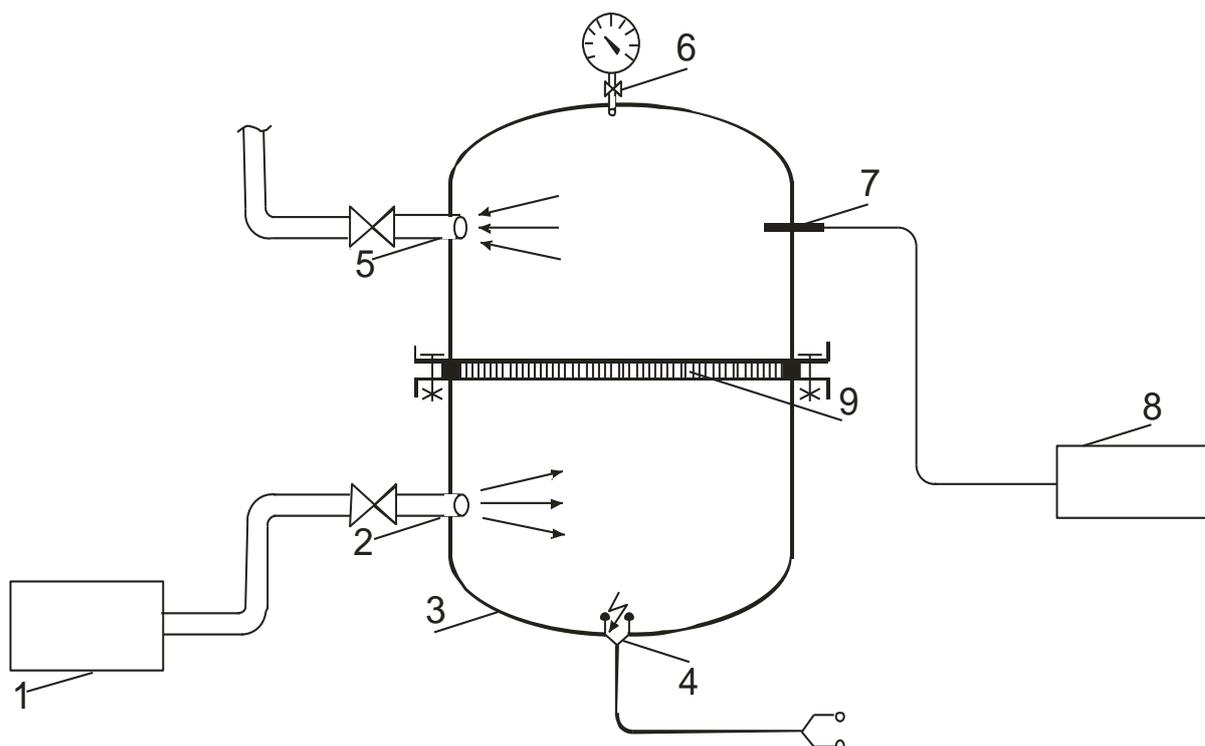


Рисунок 4.18 – Принципиальная схема стенда

1 - блок подготовки и подачи взрывчатой смеси; 2 - устройство подачи; 3 - взрывной сосуд; 4 - источник поджигания; 5 - выпускное устройство; 6 - блок контроля давления во взрывном сосуде; 7 - устройство контроля пламени; 8 - регистрирующая аппаратура; 9 - огнепреграждающий элемент, разделяющий сосуд 3 на две камеры

Стенд состоит из блока подготовки 1, взрывного сосуда 3, устройства подачи 2 и выдачи 5 МВС, блока контроля давления 6, устройства контроля пламени 7, подключенного к регистрирующей аппаратуре, и сетчатого огнепреграждающего элемента 9. Блок подготовки и взрывной сосуд представляют собой толстостенные (12 мм) стальные сосуды, способные выдержать давление,

развивающее в процессе горения. Диаметр блока подготовки составляет 120 мм, а длина 800 мм, диаметр взрывного сосуда 90 мм, а высота 500 мм. Концентрация метана определялась газоанализатором фирмы Dräger (Германия) MSI-2500. Поджигание газовой смеси осуществлялось автомобильной свечей либо электрозажигалкой 4 типа ЭЗ-2. Вмонтированные термопары 7 контролировали температуру аппаратурой 8 во взрывном сосуде.

Эксперименты по определению огнегасящей эффективности огнепреграждающих элементов проводили по следующей методике. Закачивали воздух и метан в блок подготовки, добиваясь необходимой концентрации при давлении более 20 атм. и начали заполнять взрывной сосуд 3. Когда концентрация метана из входного и выпускного устройства 5 становилась одинаковой, вентиль выпускного устройства перекрывали. При достижении во взрывном сосуде заданного давления закрывали устройство подачи. После поджога по вмонтированным термопарам регистрировали процесс горения и наличие проскока пламени через огнепреграждающий элемент.

При проведении экспериментов изменяли параметры следующих показателей:

- концентрацию метана от 7 до 20%;
- давление во взрывном сосуде от 1 до 20 атм.;
- размер ячейки огнепреграждающего элемента от 0,63 до 4,42 мм.

При отсутствии проскока пламени количество опытов было принято равным 30. В случае проскока пламени через огнепреграждающий элемент устройство разбирали, проводили визуальное обследование сетки. При отсутствии очевидных дефектов проскок пламени считался состоявшимся.

По результатам выполненных экспериментов установлено (таблица 4.6) [75], что сетчатые огнепреграждающие элементы с размером ячеек от 0,63 до 4,1 мм надежно тушат пламя во всем диапазоне изменений концентрации и давления. Сетка с ячейкой 4,42 мм успешно локализовала только бедную (7,3%) МВС, а при концентрациях 9,4 и 12,3 были получены проскоки пламени. Результаты экспериментов опубликованы [72].

Таблица 4.6

**Эффективность подавления пламени огнепреграждающими  
сетчатыми элементами**

Размер ячеек, мм	Давление во взрывном сосуде, атм.	Концентрация метана, %	Количество опытов	Количество проскоков
1	2	3	4	5
0,63	1,0 - 19,2	7,0 – 15,7	до 30	0
0,41	1,0 - 20,5	7,2 – 17,4	до 30	0
0,91	1,2 - 20,1	7,4 – 16,2	до 30	0
1,25	1,0 - 20,1	7,4 – 17,3	до 30	0
1,60	1,0 - 20,0	7,4 – 16,7	до 30	0
2,00	1,0 - 20,2	7,2 – 17,4	до 30	0
2,60	1,0 - 20,1	7,2 – 17,0	до 30	0
3,20	1,1 – 20,1	7,2 – 16,9	до 30	0
4,10	1,0 – 20,0	7,3 – 9,6	до 30	0
4,20	1,0 – 20,0	7,3 – 9,6	до 30	0
4,42	1,0-20,2	7,3;9,4;12,3	18; 6; 6	0; 2; 3

*Примечание.* При размере ячеек 4,42 мм были получены 5 проскоков из 30 опытов при концентрации 9,4% и 12,3%.

#### **4.5. Испытания устройства тушения пламени**

Все опытные образцы новых конструкций устройств тушения пламени, входящих в состав газотранспортных систем, подвергались испытаниям на:

- прочность и герметичность при давлениях, превышающих рабочее;
- аэродинамическое сопротивление газовому потоку;
- локализацию и тушение пламени, проникнувшего в газотранспортную систему.

Основу методики на прочность и герметичность (пневматические испытания) составляет принцип устранения неплотностей в конструкции устройства тушения и определения влияния рабочего давления внутри газотранспортной системы на прочность элементов конструкции устройства тушения. Для проведения пневматических испытаний устройства тушения пламени был создан испытательный стенд (рисунок 4.19).

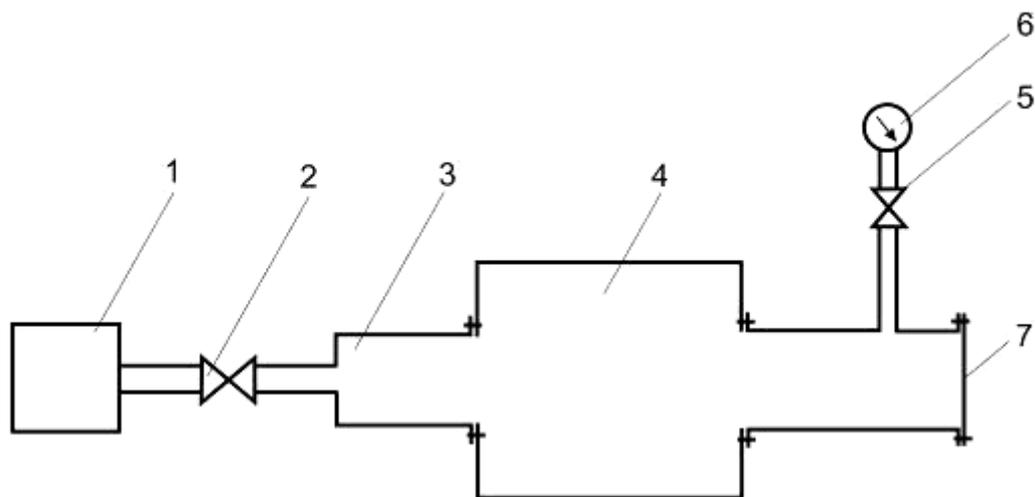


Рисунок 4.19 – Стенд проведения пневматических испытаний устройства тушения пламени

1 – компрессорная станция; 2 - линейная задвижка; 3 – трубопровод; 4 – устройство тушения пламени; 5 – кран; 6 – манометр; 7 – глухая заглушка

Испытания проводились по следующей методике. Компрессорной станцией 1 согласно графику изменений давлений (рисунок 4.20) проводился подъем давления внутри стенда до 1 атм., что составляет 0,3 рабочего давления. Затем закрывалась задвижка 2 и проводился осмотр стенда путем омыливания всех сварных и резьбовых соединений. В случае выявления утечек давление внутри стенда сбрасывалось до атмосферного, устранялись утечки, и в стенде опять повышалось давление до 1 атм. Если повторный осмотр не выявил утечек, компрессорной станцией давление внутри стенда повышалось до 4,5 атм. и проводились наблюдения за состоянием давления в течение 12 часов. После

окончания испытаний на прочность давление внутри стенда снижалось до 3 атм. (рабочего давления) и испытания на герметичность продолжались еще 6 часов.

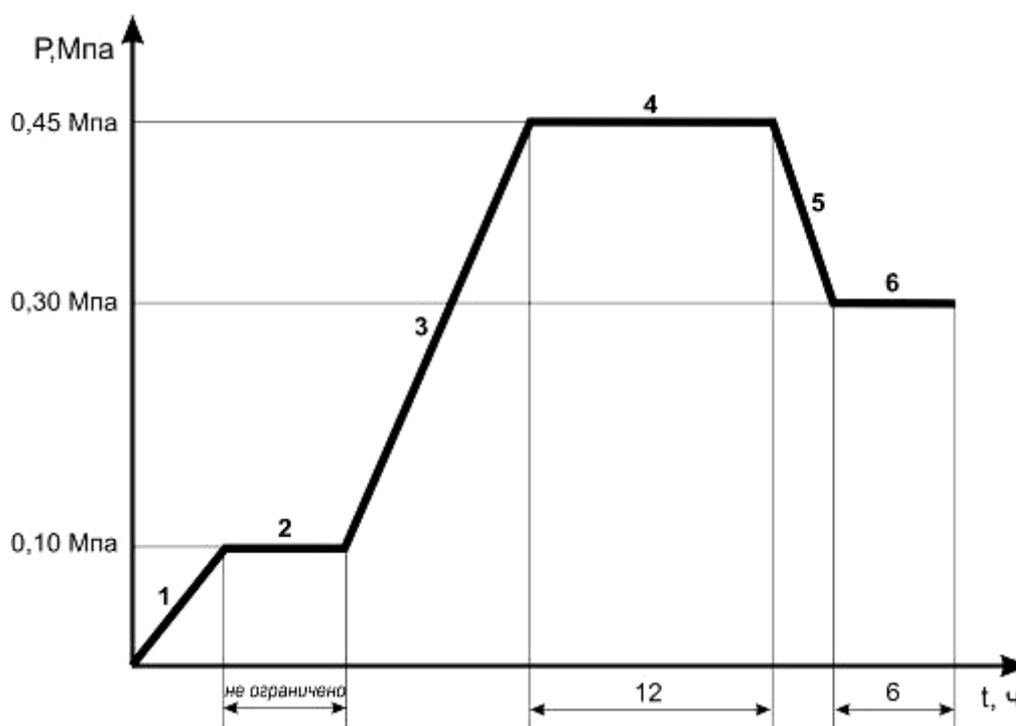


Рисунок 4.20 – График проведения пневматических испытаний

Результаты испытания устройства тушения пламени показали, что конструкция с повышением давления до 4,5 атм. не претерпела механических повреждений, а падение давления в течение 12 часов составило 0,3% от испытываемого давления. При снижении давления до 3 атм. (рабочее давление) снижение давления внутри стенда не обнаружено.

#### 4.6 .Определение аэродинамического сопротивления газовому потоку

При движении МВС по газотранспортной системе и устройству тушения пламени происходит потеря напора вследствие трения газа о поверхность сетчатых огнепреграждающих элементов, а также из-за сужения и расширения га-

зового потока, проходящего через переменные сечения, образованные ячейками сеток.

Учитывая, что устройство тушения пламени будет использоваться на магистральных и сбросных газопроводах систем утилизации, рациональным является диаметр внутренней трубы устройства, равный диаметру трубопровода, позволяющий размещать устройство в спроектированных ранее габаритных размерах объектов утилизации [73, 74].

Количественные расчеты не могут полностью заменить экспериментальное определение некоторых гидравлических характеристик. Поэтому наряду с количественными расчетами следует экспериментально определять проницаемость огнепреградителя с помощью сравнительно простой методики, приведенной ниже.

Для экспериментальных испытаний аэродинамического сопротивления были выбраны сетки с размерами ячеек: 0,63, 0,91, 1,25, 1,6 и 2,0 мм.

Аэродинамические характеристики огнепреграждающих элементов определялись на трубопроводе диаметром 150 мм, количество сеток огнепреградителя изменяли от 1 до 4, расстояние между сетками составляло 4 мм. Исследования проводились следующим способом. Огнепреградитель устанавливали на конце трубопровода, создавали поток воздуха и определяли перепад давлений на огнепреградителе. Разрежение в трубопроводе и перепад давлений на измерительной диафрагме определялись U-образным манометром. Результаты замеров для огнегасящих элементов представлены на рисунке 4.21.

Данные приведенных характеристик огнепреграждающих элементов показывают, что потери напора не превышают допустимых на практике пределов, а по результатам анализа [75] они ниже в 20-25 раз насадочных огнепреградителей, применяющихся для взрывозащиты доменного и коксового газов.

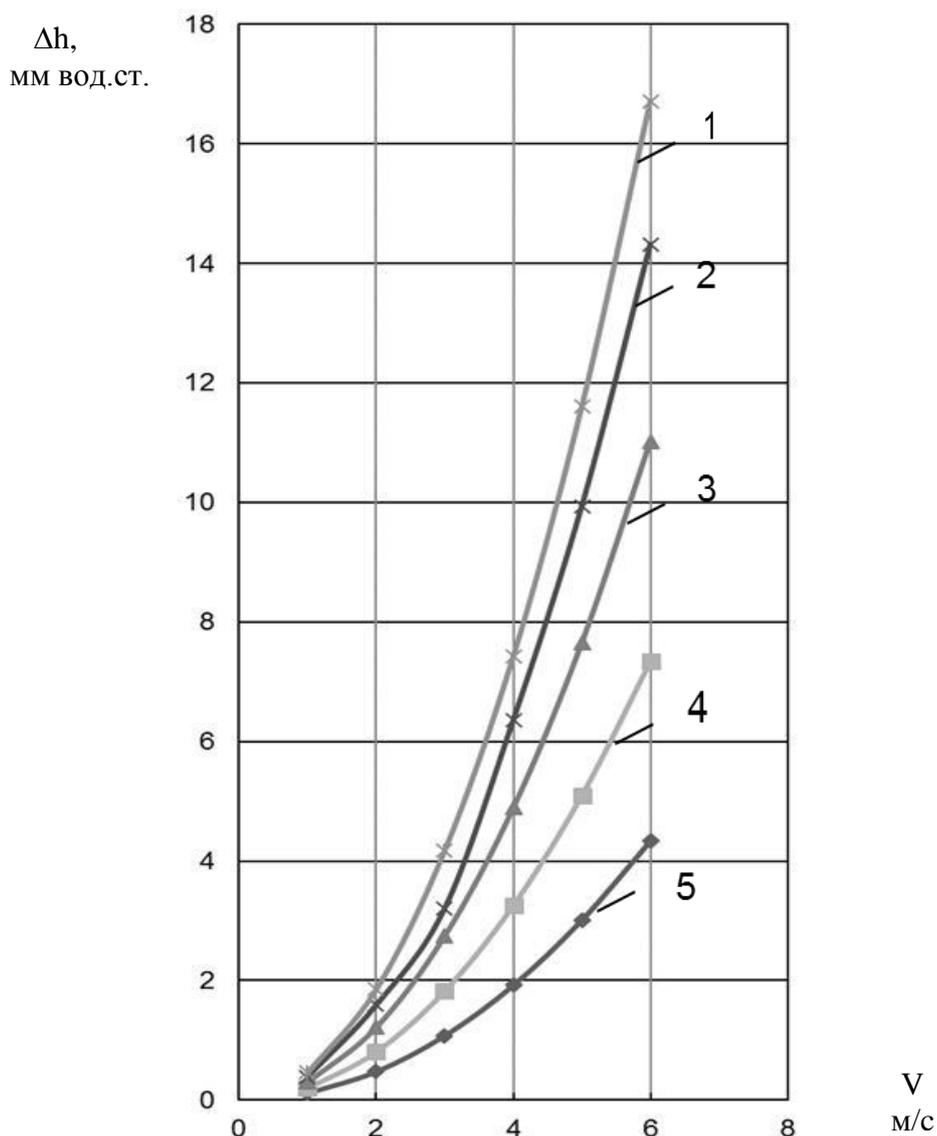


Рисунок 4.21 - Результаты замеров для огнегасящих элементов с размерами ячеек: 1 – 0,63 мм; 2 – 0,91 мм; 3 – 1,25 мм; 4 – 1,6 мм; 5 - 2 мм

#### 4.7. Испытания устройства тушения пламени МВС на выполнение основной функции

Испытания устройства тушения пламени по надежности выполнения основной функции (локализация и подавление пламени) проводились на полигонном стенде МакНИИ. Схема проведения испытаний представлена на рисунке 4.22.

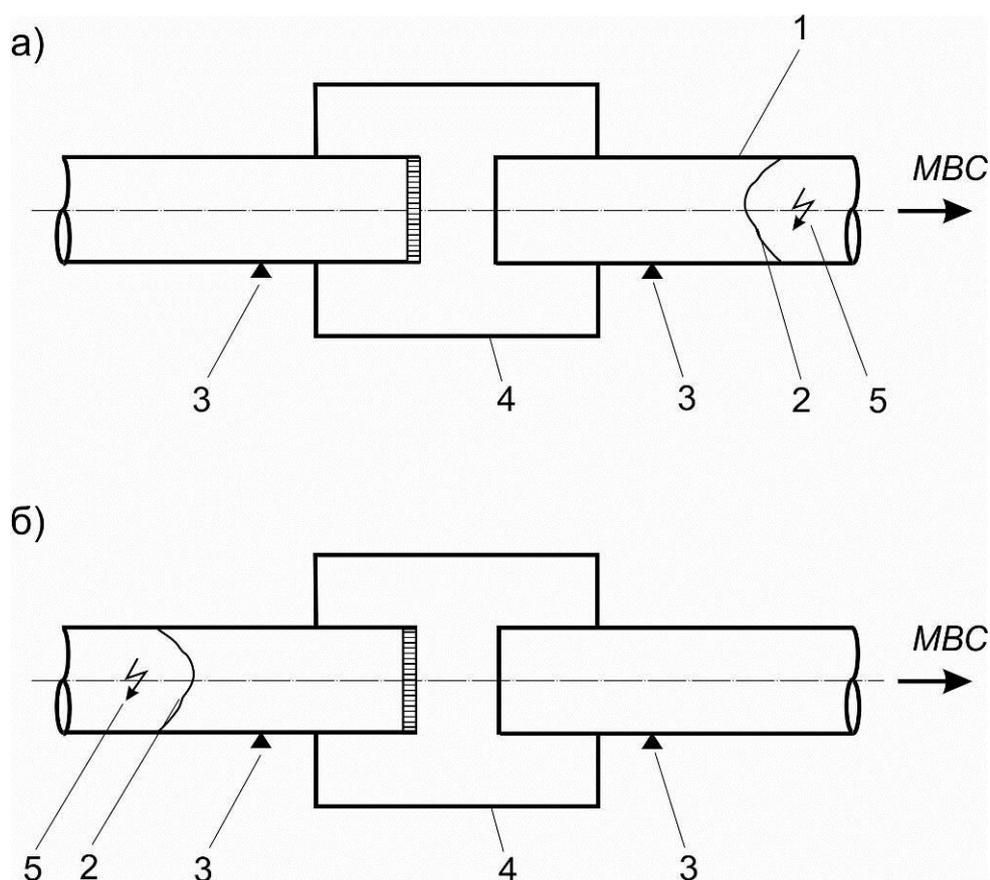


Рисунок 4.22 - Схема проведения испытаний на подавление пламени МВС

1 – защищаемый трубопровод; 2 – фронт пламени; 3 – датчик пламени; 4 – устройство тушения пламени; 5 – источник поджигания

а) источник пламени находится впереди ОПС-ПГА во встречном движении МВС;

б) источник пламени находится позади ОПС-ПГА в попутном движении МВС

Проникновение пламени в газопровод системы утилизации относительно устройства тушения пламени может произойти как во встречном, так и в попутном направлении движения потока. Поэтому испытания проводились в два этапа. На первом из них испытывали устройство тушения пламени на эффективность подавления пламени, движущегося по потоку МВС. На втором этапе -

оценивалась эффективность устройства при движении пламени навстречу потоку.

Испытания проводились следующим образом. В трубопроводе создавался воздушный поток и в него подавался природный газ до образования взрывчатых смесей. Воспламенение осуществлялось электрической искрой. Содержание метана определялось интерферометром ЛИ-4М и газоанализатором фирмы Dräger MST-2500. Для контроля производился отбор проб для последующего анализа на хроматографе. Эффективность (тушение или проскок) фиксировали датчики пламени. Количество испытаний для каждого направления движения пламени принималось равным 10.

Результаты проведенных исследований показали надежность устройства тушения пламени, распространяющегося как в направлении, так и навстречу потоку транспортируемой МВС (таблицы 4.7 и 4.8).

Таблица 4.7

#### Эффективность тушения пламени, движущегося по потоку МВС

№ п/п	Диаметр трубопровода, мм	Концентрация метана, %	Скорость потока МВС, м/с	Количество опытов
				количество тушений
1	300	7,1	3	10/10
2	-//-	7,4	5	10/10
3	-//-	9,7	3	10/10
4	-//-	9,8	5	10/10
5	-//-	12,2	5	10/10
6	210	7,2	3-5	10/10
7	-//-	9,6	5	10/10
8	-//-	12,4	3-5	20/20

## Эффективность тушения пламени, движущегося навстречу потоку МВС

№ п/п	Диаметр трубопровода, мм	Концентрация метана, %	Скорость потока МВС, м/с	Количество опытов
				количество тушений
1	300	7,5	5	10/10
2	-//-	9,6	5	10/10
3	-//-	12,2	5	10/10
4	210	7,3	5	10/10
5	-//-	9,6	3-5	20/20
6	-//-	12,4	3-5	20/20

Устройство стабильно тушит пламя, проникнувшее в газопроводы во всем диапазоне взрывчатых концентраций, и может быть использовано для взрывозащиты газотранспортных систем утилизации шахтного метана.

### ВЫВОДЫ

Выполненные исследования на экспериментальных стендах процессов горения и тушения пламени в трубопроводах показали, что:

- с ростом давления исходной МВС до 20 атм. верхний предел горения увеличивается до 19,7%, а нижний, практически, не изменяется. С целью предотвращения образования взрывчатых смесей для потребителей определена зависимость предельно допустимых минимальных концентраций метана с ростом давления до 20 атм.;

- толщина стенки на срезе трубопровода влияет на устойчивость горения МВС на выходе из трубы, уменьшение толщины стенки на срезе до 0,001 м позволяет снизить на 27% скорость проскока пламени и на 44% скорость отрыва пламени для максимально взрывчатой смеси, что значительно сужает область устойчивого горения МВС;
- сетчатые огнепреграждающие элементы с размером ячеек от 0,63 до 4,1 мм надежно тушат пламя во всем диапазоне изменений концентрации метана (7-12%) и давлений (0-20 атм.).
- конструкция устройства, состоящая из двух изолированных камер, гарантированно тушит пламя, стабилизированное на огнепреградителе, а необходимый для тушения объем продуктов сгорания и основные параметры устройства обеспечиваются соотношением внешнего и внутреннего диаметров, равным 1,5.

Результаты экспериментов показали, что устройство с внутренним диаметром трубопровода 50, 85 и 102 мм с суммарной длиной кольцевой камеры 300 мм стабильно тушат пламя во всем диапазоне концентраций. При уменьшении длины камеры до 200 были получены по одному отказу как при концентрации 9,6%, так и при концентрации 12,1%. Во всех положительных результатах величина зазора внутренней щели составляла 20 мм. Увеличение диаметра внутреннего трубопровода до 102 мм привело к 80% отказов при содержании метана в смеси 9,5% и 60% с концентрацией горючего 7,1%. Это свидетельствует о том, что при таком соотношении диаметров наружного и внутреннего трубопроводов камеры образуется недостаточное количество инертных газов.

## РАЗДЕЛ 5

### ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ШАХТНОГО МЕТАНА. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

С утилизацией газа дегазационных систем шахт возникает ряд задач, связанных с безопасностью эксплуатации газотранспортной и утилизирующей системами. В этой связи необходимо отметить, что положения, изложенные в НПАОП 0.00-1.20-98 «Правила безопасности систем газоснабжения Украины» не распространяются на объекты газопотребления и транспортировки шахтного газа, так как эта газовая смесь может содержать кислород и непостоянную концентрацию метана.

В работе [76], выполненной МакНИИ по заказу Минуглепрома Украины, были выполнены аналитические и экспериментальные исследования, позволившие разработать требования безопасности к проектированию, строительству, транспортированию и эксплуатации систем утилизации, которые используют метан дегазационных систем в установках прямого сжигания (котельные, сушильные и обогрев стволов), газо-поршневых двигателях, турбинах электро-теплоагрегатов, автомобильных газонаполнительных станциях и системах подготовки некондиционных МВС и разработан СОУ-П 10.1.00174088.015-2008 «Транспортування і використання метану, що каптується дегазаційними системами шахт. Вимоги безпеки».

Строительство и эксплуатация систем утилизации должно выполняться по проектам, которые согласовываются и утверждаются согласно [77]. Проектирование, строительство и пусконаладочные работы должны выполнять организации, которые имеют разрешение и лицензии на данный вид деятельности [78]. Объемы МВС, пригодных к утилизации должны быть указаны в проектах дегазации шахты с учетом программы развития и графика отработки выемочных участков. До начала строительства системы утилизации в угрожаемых по выделению шахтных газов на земную поверхность зонах должны быть проведены мероприятия, которые защищают от их проникновения согласно [79].

Оборудование, которое используется для газоподготовки и утилизации шахтного метана, должно подбираться с учетом физико-химических свойств и взрывобезопасных характеристик каптируемого метана. Оборудование, материалы и арматура, приобретенные за рубежом, должны отвечать требованиям государственных стандартов, которые действуют на территории ДНР и имеют сертификат соответствия.

Согласно методике [80] определения категории взрыво- и пожароопасных помещений необходимо расчетным методом (с учетом объемов помещения и свойств взрывчатых веществ) устанавливать категорию здания.

Помещения стационарных и передвижных систем утилизации должны принадлежать к классу 1 взрывобезопасности согласно [80] и категории согласно [81].

Светильники, электрооборудование, измерительные приборы, кабельные линии, заземление должны быть взрывозащищенными с уровнем взрывозащиты РВ согласно требованиям [81]. Помещения систем утилизации должны быть оснащены автоматическим контролем содержания метана в атмосфере помещения, который дает команду на включение звуковой и световой сигнализации при концентрации метана до 1% с автоматическим включением принудительной системы вентиляции, а при повышении концентрации метана более 1% отключают электроэнергию в машинном отделении и помещении контрольно-измерительной аппаратуры.

Установки прямого сжигания МВС должны быть дополнительно обеспечены режимными картами работы установки, в которых должны быть учтены особенности работы дегазационной системы шахты (работы по сливу воды, сокращению либо наращиванию трубопроводов), при которых возможны резкие колебания концентраций метана. Для систем обогрева стволов на начало отопительного сезона необходимо провести лабораторный анализ проб на содержание вредных газов, поступающих от горелок в поступающую струю шахты.

Прокладку газопроводов систем утилизации необходимо производить только по поверхности. На горных отводах угольных шахт прокладка газопро-

водов должна соответствовать [82] и находиться под систематическим наблюдением. Периодичность осмотра не должна превышать одного раза на три месяца.

Заправка баллонов высокого давления шахтным метаном, который каптируется подземной дегазацией, запрещена [82].

Допускается использовать для заправки автомобилей газ, полученный предварительной поверхностной дегазацией с концентрационными параметрами бытового природного газа.

Утилизация некондиционного газа дегазации (менее 25%) допускается только при условии специальной газоподготовки, на выходе из которой МВС будет иметь взрывобезопасные характеристики с обязательным применением средств взрывозащиты [85].

Системы автоматизации должны непрерывно обеспечивать контроль содержания и давления МВС, подаваемой потребителю, и иметь защиты (отключение подачи метана) при появлении предаварийных режимов. Эксплуатация систем утилизации без систем автоматизации запрещена. Магистральные газопроводы, соединяющие потребителя и ВНС, а также сбросные газопроводы «свеча» должны быть оборудованы средствами взрывозащиты. Место установки средств взрывозащиты необходимо предусматривать на стадии проектирования. Работы по утилизации, а также по ремонту и наладке должны выполнять самостоятельные специализированные службы, имеющие разрешение органов Государственного надзора [85].

Наиболее важным для обеспечения надежности технического изделия, обеспечивающего взрывозащиту [83], является этап проектирования, поскольку надежность устройства тушения зависит от конструктивных параметров устройства, выбора мест установки, возможности технического обслуживания в процессе эксплуатации.

Конструкторскую документацию и опытные образцы устройства тушения пламени выполнило ЧАО «ПОИСК,А.С.», находящееся в г.Антрацит.

Определение геометрических размеров устройства было определено по результатам экспериментальных исследований, выполненных в разделе 4.2. Экспериментальный образец устройства при соотношении наружного и внутреннего диаметров устройства равного 1,4 успешно тушит пламя во всем диапазоне взрывчатых концентраций при суммарной длине кольцевой камеры равной двум диаметрам внутреннего трубопровода.

Опытные образцы изготавливались с учетом коэффициента запаса надежности равного 1,5, рекомендуемого [83] для обеспечения безопасности с горючими газовыми смесями.

Анализ характеристик газотранспортных систем шахт Донбасса показал, что нагнетательные трубопроводы ВНС используют трубы с диаметром 200 мм – 5%, 250 мм – 20%, 275 мм – 30% и 300 мм – 45% в шахтах, применяющих дегазацию. Поэтому было принято решение об изготовлении двух типоразмеров устройства с внутренним диаметром 275 и 300 мм, способных обеспечивать взрывозащиту 75% нагнетательных трубопроводов шахт.

Места установки средств взрывозащиты должны выбираться, исходя из возможности локализации и тушения пламени, проникнувшего на входе в газотранспортную систему, тем самым защитить от разрушительного влияния пламени утилизирующие агрегаты, а также исключить распространение пламени в дегазационную систему шахты.

В системах утилизации, потребляющих газ дегазации только с высокой концентрацией (например, компримирование газа дегазации в баллоны высокого давления, где проникновение пламени в сбросные трубопроводы и дальнейшее его распространение невозможно) опасность представляет устойчивое факельное горение на выходе из регулировочных либо сбросных трубопроводов. Тепловое воздействие горящего факела и распространение продуктов сгорания на территории объектов утилизации могут отразиться на здоровье обслуживающего персонала и состоянии агрегатов, входящих в систему утилизации. Продолжительный выброс газа дегазации может производиться на период ремонтных (профилактических) работ и временной консервации системы утилизации.

Для обеспечения пожарной безопасности от воздействия факельного горения необходимо сбросные трубопроводы оборудовать устройством тушения пламени (рисунок 5.1) [84].

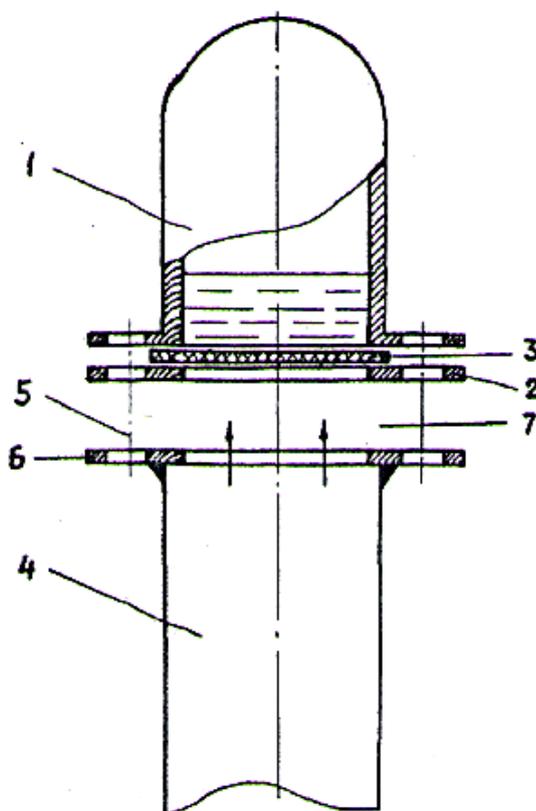


Рисунок 5.1 – Устройство для тушения пламени газовой смеси (УТПГС)

1 – аккумулирующая камера; 2 – кольцевой элемент; 3 – мембрана; 4 – газопровод; 5 – шпильки; 6 – фланец; 7 – газовая смесь

Устройство УТПГС состоит из аккумулирующей камеры 1, кольцевого элемента 2 и огнестойкой (металлической) мембраны, установленной между камерой и кольцевым элементом. Внутренняя полость аккумулирующей камеры заполнена инертным веществом. Устройство устанавливается над срезом сбросного трубопровода 4 с помощью фланца 6 и шпильки 5 на высоту, равную диаметру обслуживаемого трубопровода.

В случае возгорания потока 7 пламя начинает воздействовать на мембрану 3, вследствие чего нагревается инертное вещество, находящееся в аккумулирующей камере. Высокая температура создает рост давления внутри камеры и при достижении критического значения происходит разрушение мембраны 3 и

импульсный выброс инертного вещества тушит стабилизированное пламя. На устройство тушения пламени газовых смесей МакНИИ получен патент на полезную модель №22381.

Наиболее опасными являются сбросные трубопроводы «свечи», трубопроводы подающие газ к горелкам установок прямого сжигания газа и утилизирующие агрегаты, способные в случае нарушения технологического режима нагреваться и создавать искры [85].

Объемы и места установки устройств тушения пламени должны разрабатываться на стадии проектирования и согласовываться в специализированных организациях и органом Государственного надзора.

Техническое обслуживание устройства заключается в наблюдении за изменением аэродинамического сопротивления и проведении профилактических и регламентных работ. Проверка сопротивления устройства движению потока производится еженедельно. В случае обнаружения отключения от нормального режима работы необходимо провести профилактические либо ремонтные (при необходимости) работы. Профилактика заключается в осмотре и очистке огнепреграждающего элемента. Ремонт – в замене огнепреградителя и устранения неплотности в конструкции. Работы необходимо выполнять только после сброса давления в трубопроводах и освобождения их от МВС.

Первые образцы устройства тушения стабилизированного пламени внедрены в количестве 4 штук для обеспечения взрывозащиты газопроводов системы утилизации (котельная) газа дегазации на ПАО «ШАХТОУПРАВЛЕНИЕ «ПОКРОВСКОЕ».

Проектные работы по реконструкции системы газоснабжения котельной выполнялись подрядной организацией ООО «Котлосервис» (г.Донецк). Необходимый объем средств взрывозащиты и места установки устройств тушения были определены МакНИИ на стадии проектирования. Принципиальная схема размещения устройств тушения пламени представлена на рисунке 5.2.

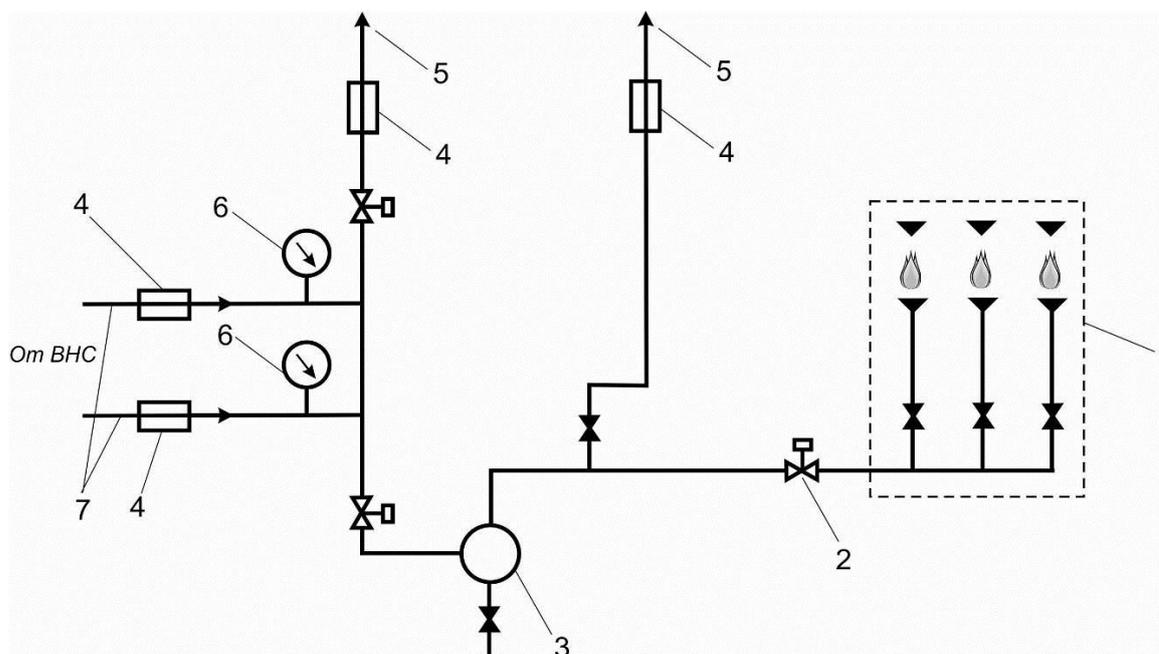


Рисунок 5.2 – Принципиальная схема размещения устройств тушения пламени в котельной ПАО «ШАХТОУПРАВЛЕНИЕ «ПОКРОВСКОЕ»

1 – блок газовых горелок; 2 – клапан электромагнитный; 3 – влагоотделитель; 4 – устройство тушения пламени; 5 – сбросные трубопроводы «свечи»; 6 – приборы контроля давления МВС; 7 – магистральные трубопроводы; ▼ – датчики контроля метана; ► – поворотные задвижки

Учитывая, что наибольшая вероятность проникновения пламени в газопровод может произойти через топочные горелки – постоянный источник поджигания через сбросной трубопровод «свеча», эти трубопроводы были оборудованы устройствами тушения пламени. Дополнительно (согласно требованиям п.7.11 [85]) было рекомендовано установить датчики контроля пламени перед каждой горелкой, подключенной в систему автоматизации, обеспечивающей отключение подачи газа при отрыве или погасании пламени на горелке.

После проведения монтажных работ и приемочных испытаний был проведен инструктаж обслуживающего персонала по обслуживанию и контролю аэродинамических показателей устройства тушения пламени. Устройства УТПГС также были внедрены на ЧАО «ПОИСК, А.С.» для обеспечения взрывозащиты передвижных поверхностных вакуум-насосных станций, подающих газ к системам утилизации.

## ВЫВОДЫ

1. Разработаны требования безопасности на проектирование, строительство и эксплуатацию систем утилизации, которые используют (утилизируют) метан дегазационных систем в установках прямого сжигания (котельные, сушильные и обогрев стволов), газопоршневых двигателях, автомобильных газонаполнительных станциях и системах подготовки и утилизации некондиционных МВС.

2. Для повышения пожарной безопасности от воздействия пламени факельного горения на сбросных «свечах» в системах утилизации, потребляющих МВС с высокой концентрацией, разработано устройство тушения пламени (патент №22381). При возникновении факельного горения это устройство импульсным выбросом инертного вещества тушит возникнувшее пламя.

3. МакНИИ совместно с ЧАО «ПОИСК, А.С.» разработана конструкторская документация и изготовлены образцы устройства тушения пламени в газовых магистралях (патент №68509).

4. Разработан раздел безопасности транспортирования МВС от вакуум-насосной станции до котельной в проекте перевода котла КЕ-10-14 с твердого топлива на сжигание газа дегазационной системы. Определены необходимый объем средств взрывозащиты и места их установки. Четыре комплекта устройства тушения пламени были установлены в газотранспортной системе котельной ПАО «ШАХТОУПРАВЛЕНИЕ «ПОКРОВСКОЕ».

5. На ЧАО «ПОИСК, А.С.» внедрено шесть устройств тушения пламени для обеспечения взрывозащиты поверхностных передвижных вакуум-насосных станций, подающих МВС к системам утилизации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой решена актуальная научно-техническая задача, что позволило провести исследования процессов горения и тушения МВС в газопроводах, усовершенствовать способ и создать параметрический ряд новых средств взрывозащиты систем утилизации шахтного метана.

Основные научные и практические результаты, выводы и рекомендации работы заключаются в следующем:

1. Получил дальнейшее развитие способ тушения стабилизированного пламени транспортируемой в трубопроводе смеси продуктами горения ее части, изолированной в кольцевой камере, путем разделения ее около кольцевой щели радиальной перегородкой на две части, что позволило увеличить в 2 раза поверхность горения и количество образующихся огнегасящих газов и уменьшить диаметр устройств в 1,65 раза при его реализации.

2. Экспериментально установлено, что с ростом давления МВС до 2,0 МПа верхний предел горения шахтного газа увеличивается до 19,7% при неизменной нижней границе.

3. Впервые экспериментальными исследованиями определено, что критический диаметр горения шахтного газа при верхнем пределе концентраций шахтного метана с ростом давления в системах утилизации от 0,05 до 2,0 МПа увеличился с 3,6 до 4,2 мм.

4. Экспериментально определено влияние толщины стенки на торце выхлопного трубопровода «свечи» на устойчивость процессов горения МВС. Результаты этих исследований использованы при разработке конструкции устройства гашения пламени.

5. Разработаны техническое задание и конструкция устройства тушения стабилизированного пламени продуктами сгорания транспортируемой МВС в газовых магистралях, состоящего из двух изолированных камер (патент на полезную модель №6586). Проведены экспериментальные исследования процес-

сов горения в камерах кольцеобразного сечения и установлены оптимальные значения параметров устройства гашения пламени.

6. Разработано устройство тушения пламени газовой смеси на «свече» систем утилизации шахтного метана с высокой концентрацией (патент №22381)

7. Изготовлены образцы устройства гашения пламени в газопроводах систем утилизации, проведены испытания на герметичность, прочность и определены аэродинамические характеристики устройства. Испытания устройства на выполнение основной функции по локализации и гашению пламени, проникнувшего в газотранспортную систему, показали его высокую эффективность. Устройство автономно срабатывает автоматически, не требует подвода энергии и огнегасящих средств, повторно срабатывает без вмешательства человека и средств автоматики и контроля.

7. Образцы устройства тушения пламени в системах утилизации шахтного метана после испытаний приняты в эксплуатацию ПАО «ШАХТОУПРАВЛЕНИЕ «ПОКРОВСКОЕ» для взрывозащиты газопроводов котельной и на МПВАОЗТ «ПОИСК,А.С.» для обеспечения взрывозащиты передвижных поверхностных вакуум-насосных станций, подающих газ к системам утилизации.

8. Результаты исследований использованы при разработке отраслевого стандарта СОУ-П 10.1.00174088.015-2008 «Транспортирование и применение метана, каптированного дегазационными системами. Требования безопасности» и регламентирующего требования на проектирование стандарта.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Карп И.Н. Ресурсная база энергетики Украины / И.Н.Карп, А.К.Шидловский // 1. Уголь. Природный газ /Экотехнологии и ресурсосбережения. -1997. -№1.
2. Дегазация угольных шахт. Требования к способам и схемы дегазации. СОУ 10.1.00174088.001-2004. - Киев, -2004.
3. Кравцов А.И. Геологические условия газоносности угольных, рудных и нерудных месторождений полезных ископаемых / А.И.Кравцов. - М.: Недра, -1968.
4. Зотов Т.А. Газодинамические методы исследования газовых скважин / Т.А.Зотов, С.М.Твердовский. -М.: Недра, -1970.
5. Кузьмин Д.В. О метановыделении из выработанных пространств отработанных этажей и горизонтов / Д.В.Кузьмин, Н.А.Силаев // Сборник научных трудов «Борьба с газом, пылью и выбросами в угольных шахтах», выпуск 8, -Макеевка-Донбасс, -1972.
6. Винтер К. Газовыделение из закрытых шахт и погашенных выработок / К.Винтер // Глюкауф -№200, -1976, -С.33-36.
7. Морган Б.Г. Развитие способов дренажа метана в Южно-Уэльском районе / Б.Г.Морган / /Mining Engineer -№167, -1974, -С.81-95.
8. Дешефр Ж. Добыча метана из закрытых шахт / Ж.Дешефр, Ж.Дракон //Индустрии минерал де техник №3, -1982.
9. Камэрон Д. Изучение рыночного потенциала Великобритании //СВМРевью, -1999.
10. Вложение в проект //Велд.коэл. -2002. -№11.
11. Телеграфные новости //Велд.коэл. -2002.
12. Айкер Х. Газовыделение из стволов закрытых шахт. //Glukauf-Forschungshefte №42, -1981, -С.205-212.
13. Приобретение метана из угольных пластов. //Велд.коэл. -№3, -2002, -С.11.
14. Закон, поддерживающий чистую энергетику. //Велд.коэл. -№5, -2002, -С.11.

15. Кудинов Ю.В. Анализ использования шахтного газа / Ю.В.Кудинов, В.А.Безбородов, С.С.Матвеев //Сборник научных трудов МакНИИ «Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах». -Макеевка-Донбасс. -2007. -С.12-19.
16. Брюханов А.М. Анализ способов утилизации шахтного метана /А.М.Брюханов, Ю.В.Кудинов, В.А.Безбородов //Сборник научных трудов МакНИИ «Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах». -Макеевка-Донбасс. -2007. -С.7-12.
17. Техническое предложение на поставку газотурбинного утилизационного комплекса. -Запорожье, -2006.
18. Техническая характеристика газотурбинной электростанции ЭГ1000-Т400. ОАО «Мотор Сич», -2002.
19. Булат А.Ф. Научно-технические основы создания шахтных когенерационных энергетических комплексов / А.Ф.Булат, А.Ф.Черемис.
20. Дегазация и утилизация. Экспресс-информация PGM.
21. Шаулов Ю.Х. Распространение пламени через пористые среды / Ю.Х.Шаулов. -Изд. АН Аз.ССР, -1954. -83 с.
22. Барткнехт В. Огнепреградители для поверхностных трубопроводов дегазационных установок / В.Барткнехт // Schlagel und Eisen. -1961. -№5. -С.323-331.
23. Отчет о результатах поездки делегаций Минуглепрома СССР в ФРГ / Морев А.М. и др. - Макеевка-Донбасс, -1974. -73 с.
24. Развитие автоматических средств защиты от распространения пламени взрыва метана и угольной пыли: Отчет о НИР СЭВ, Тема 124/70, НИУИ. - Острава-Радванице, ЧССР, -1973. -25 с.
25. Шолль Е.В. Подавление взрывов в подземных выработках автоматическими заслонами БВС/ Е.В.Шолль, В.Виман // Глюкауф № 10, -1980, -С.38-46.
26. Рамсей Х.Т. Проектирование и разработка системы заслона с принудительным срабатыванием / Х.Т.Рамсей, Р.С.Хинсли, Д.Уотерхаус.: Пер. с англ. - МакНИИ, -1981. - № 3680.

27. Мешман Л.М. Автоматическая система подавления взрывов «Анпирбар»/ Л.М. Мешман, А.И. Веселов, И.И. Файкин, В.И. Водяник, Л.А. Плетнева, М.М. Компанеец // Безопасность труда в промышленности. - 1977. - №3, - С.18-21.
28. Севриков В.В. Автоматическая быстродействующая система локального пожаротушения / Севриков В.В. // Экспресс-информация. - .: ЦНИЭИуголь, -1977, -12 с.
29. Александров В.Е. Безопасность взрывных работ в угольных шахтах / В.Е.Александров, Н.Р.Шевцов, Б.И.Вайнштейн - М.: Недра, -1986, -150 с.
30. Петрухин П.М. К вопросу о выборе мест установки автоматических средств гашения взрывов метана и угольной пыли / П.М.Петрухин, М.И.Нецепляев, И.Л.Бабиченко // Безопасность ВР в угольных шахтах. -Макеевка: МакНИИ. - 1977, -С.54-56.
31. Нецепляев М.И. Результаты штольных испытаний опытного образца автоматической системы взрывозащиты СЛВА-1 / М.И.Нецепляев, Е.П.Плоскоголовый, Ю.С.Ковтун, А.И.Любимова // Способы и технические средства обеспечения безопасных и здоровых условий труда на угольных шахтах. - Макеевка: МакНИИ. - 1989, - С.89-95.
32. Водяник В.И. Эксплуатация автоматических систем подавления взрывов в оборудовании / В.И.Водяник, Н.П.Кожушков // Безопасность труда в промышленности. - 1980. - № 3, -45 с.
33. Мешман Л.М. Взрывоподавляющие устройства / Л.М.Мешман, В.С.Груненок. -М.: ВНИИПО, -1980, - 54 с.
34. Мирбах Н. Автоматические заслоны системы экспериментальной шахты «Тремония» / Н.Мирбах, Ю.Михелис, Д.Мидельман // Глюкауф. -1980. - № 16, -С.23-24.
35. Винтер И. Эксперименты со сланцевыми и водяными заслонами и с автоматическими заслонами для защиты проходческих забоев / И.Винтер, М.Жильтер // Докл. на 15 МКИБР в горной промышленности. - Карловы Вары. -1973, -184 с.

36. Гофарт П.Р. Новая система автоматических противозрывных заслонов / П.Р.Гофарт // Докл. на 15 МКИБР в горной промышленности. - Карловы Вары. -1973, -184 с.
37. Цыбульский В. Исследование автоматических противозрывных заслонов / В.Цыбульский // Докл. на 15 МКИБР в горной промышленности. - Карловы Вары. -1973, -184 с.
38. Рекламный проспект фирмы «Тоталь», ФРГ, -1975.
39. Воловчик П. Экспресс-информация «Угольная промышленность», ВИНТИ. - № 15. -1971, -6 с.
40. Абдурахимов И.М. Автоматические системы подавления взрывов / И.М.Абдурахимов // Журнал ВХО им. Д.И. Менделеева. -1974. -№ 5, -458 с.
41. Кудинов Ю.В. Безопасность утилизации метана угольных шахт под давлением / Ю.В.Кудинов., В.А.Безбородов, Е.А.Яковенко, С.С.Матвеев, Р.Н.Тимофеев // Сборник научных трудов МакНИИ «Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах». -Макеевка-Донбасс. -2010. -С.81-89.
42. Брандт Б.Б. и др. //Химическая промышленность, -№4, -1965, -279 с.
43. Монахов В.Т. Методы исследований пожарной опасности веществ / В.Т.Монахов. -М.: Химия, -1972.
44. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / Драйздейл Д. -М.: Стройиздат, -1990. -424 с.
45. Печук И.М. О содержании гомологов метана в атмосфере шахтных выработок / И.И.Печук // Борьба с газом и пылью в угольных шахтах. - Макеевка: МакНИИ. -1967. -№ 3. -С.52-64.
46. Кудинов Ю.В. Совершенствование взрывозащиты шахтных дегазационных систем / Ю.В.Кудинов. -Макеевка. -2006.
47. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива / А.С.Иссерлин. - М.: Недра, -1980. -271 с.
48. Ионин Л.А. Газоснабжение / Ионин Л.А. - М.: Стройиздат, -1989. -439 с.

49. Льюис Б. Горение, пламя и взрывы в газах / Б.Льюис, Г.Эльбе. -М.: Мир, -1968. - 592 с.
50. Баратов А.Н. – В сб.: Охрана химических предприятий от пожаров и взрывов. М., НИИТЭхим, 1961, А.Н.Баратов, Н.В.Соловьев. ЖВХ, -1960, т.34, -1661 с.
51. Когарко С.М. Физика горения и взрыва / С.М.Когарко, О.Б.Рябиков, -1970, т.6, -С.406.
52. Berl E. Verner G., Ztschr. angew. Chem., 40, 245 (1927).
53. Terres E., Plenz P., Journ/ Gasbel, 57, 995 (1914).
54. Jones G.W., Kennedy R.E., Spolan J., US Bur. Mines Rept, Invest., 4557 (1949).
55. Цуканова О.А. Всесоюзное совещание по теории горения // О.А. Цуканова и др. –М: Химия, - 1978. – 162 с.
56. Бабкин В.С., Козаченко Л.С., ФГВ, 2, 77 (1966).
57. Strauss W.A., Edse R., Seventh Sympostum (International) on Combustion, p.377. Butterworthe: London (1959).
58. Zabetakis M.G., Lambiris S., Scott G.S., Seventh Symposium(International) jn Combudtion, p. Butterworths: London (1959).
59. Cooper C.M., Wiezevich P.J., Ind. Eng. Chem., 21, 1210, (1929).
60. Craven A.D., Foster M.G., Combustion and Flame, 10, 95 (1966).
61. Hashfguchi Y., Ogawara T., Ozawa K., Journ. Chem. Soc. (Japan) (Ind. Chem. Sec.), 70, 1053 (1967).
62. Розловский А.И. Основы техники взрывобезопасности при работах с горючими газами / А.И.Розловский. -С.145.
63. Бунев В.А. Физика горения и взрыва / В.А.Бунев. -1973, т.11, -С.135.
64. Стрижевский И.И. Промышленные огнепреградители / И.И.Стрижевский, В.Ф.Заказнов. -М.: Химия, -1966. -151 с.
65. Палмер К.Н. Гашение пламени металлическими сетками. УЦ симпозиум по горению / К.Н.Палмер. -Лондон, -1958. -493 с. (по л.132).
66. Зельдович Я.Б. Теория распространения тихого пламени / Я.Б.Зельдович // Журнал технической физики. -1941, 11. -№ 1. -С.159.

67. Безбородов В.А. Совершенствование средств взрывозащиты газотранспортных систем газоподготовки и утилизации шахтного метана / А.В.Безбородов // Сборник научных трудов МакНИИ «Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах». -Макеевка-Донбасс. -2014.
68. Кудинов Ю.В. Распространение пламени в каналах кольцеобразного сечения /Ю.В.Кудинов, В.А.Маркин, В.Н.Кочерга, В.А.Безбородов //Сборник «Взрывное дело» - Россия, Москва, -2006. -№96/53 -С.219-224.
69. Кудинов Ю.В. Разработка автономного устройства тушения пламени, стабилизированного огнепреградителем, в газопроводе /Ю.В.Кудинов, О.И.Кашуба, В.А.Маркин, В.А.Безбородов //Науковий вісник УкрНДІ ПБ. -2005. -№1 (11). -С.23-27.
70. Безбородов В.А. Горение метановоздушных смесей в каналах кольцеобразного сечения /Ю.В.Кудинов, В.А.Безбородов // Сборник научных трудов МакНИИ «Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах». -Макеевка-Донбасс. -2004. -С.28-33.
71. Кудинов Ю.В. Безопасность утилизации метана угольных шахт под давлением / Ю.В. Кудинов, В.А. Безбородов, Е.А. Яковенко, С.С. Матвеев, Р.Н. Тимофеев // Сборник научных трудов МакНИИ «Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах». Макеевка-Донбасс. 2010. С.81-89.
72. Кудинов Ю.В. Оценка критического размера сеток для метановоздушной смеси при давлении больше атмосферного /Ю.В.Кудинов, В.А.Безбородов // Уголь Украины. -Киев, -2012. -№9. -С.51-52.
73. Безбородов В.А. Устройство гашения пламени в трубопроводах газотранспортных систем угольных шахт/ В.А.Безбородов, Е.А.Яковенко // Инновационные перспективы Донбасса, материалы международной практической конференции/ Донецк. 2015 г. - <http://donntu.org/news/izdan-sbornik-materialov-konferencii-innovacionnye-perspektivy-donbassa>.

74. Безбородов, В.А., Повышение уровня взрывозащиты газотранспортных систем угольных шахт/ В.А.Безбородов// Всероссийская научно-практическая конференция. – Москва. 2017. С. 234-236/
75. Злобинский Д.М. Защитные устройства / Д.М. Злобинский, П.И. Гладких, П.А. Долин // Справочное пособие. М., Metallurg, - 1971. – С415-416.
76. Отчет о НИР «Розробити СОУ «Транспортування і використання метану, що каптується дегазаційними системами шахт. Вимоги безпеки». -МакНІІІ, -2008.
77. ДБН А 2.2-3-2004 Склад, порядок розроблення, погодження та затвердження проектної документації для будівництва.
78. Закон України «Про ліцензування певних видів господарської діяльності».
79. КД 12.01.03.07-2001 Защита зданий от проникновения метана. Инструкция. (Захист будинків від проникнення метану. Інструкція).
80. НАПБ Б.07.005-86 Определение категории помещений и зданий с взрывопожарной и пожарной опасности (Визначення категорії приміщень і будинків з вибухопожежної і пожежної небезпеки).
81. НПАОП 40.1-1.32-01 Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок.
82. НПАОП 0.00-1-20-98 Правила безпеки систем газопостачання України.
83. Пределы воспламенения. Москва, -1972. -С.108.
84. Патент на корисну модель №22381, Україна, Пристрій для гасіння полум'я газової суміші /Кудинов Ю.В., Маркин В.А., Кочерга В.Н., Безбородов В.А., Яковенко Е.А. //Заявка №UA22381: Заявл. 02.11.2007. Опубл. 25.04.2007: Бюл. №5. -2007. -С.4.
85. Кудинов Ю.В. СОУ-П 10.1.00174088.015:2008 «Транспортування і використання метану, що каптується дегазаційними системами шахт. Вимоги безпеки» / Ю.В.Кудинов, В.А.Безбородов, Е.А.Яковенко. -Киев, -2008.
86. Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов / В.В.Померанцев, К.М.Арефьев и др. 27 изд., -Л.: -1986. -312 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица 1

## Техническая характеристика электростанции ЭГ1000

Наименование	Значение
1	2
Мощность, кВт	
- номинальная	1000
- максимальная	1100
Напряжение переменного трехфазного тока, В	400
Частота тока, Гц	50
Номинальный коэффициент, мощность при индуктивной нагрузке	0,8
Коэффициент полезного действия двигателя, % не менее	25
Топливо	осушенный и очищенный природный и попутный нефтяной газы
Давление топлива на входе в электростанцию, кгс/см <sup>2</sup>	12-20
Температура топливного газа °С, не более	80
Расход топлива с низшей удельной теплотой сгорания $H_u=50$ МДж/кг, на номинальной мощности, кг/ч, не более	310
Марки применяемого масла	ЛЗ-240 или Б-3В
Номинальная скорость пуска и нагружения, мин	5
Габаритные размеры, м	14,85×4,49×6,87
Масса, т, не более	30

Продолжение таблицы 1

1	2
Число турбин	2
Назначенный ресурс, ч	90 000
Ресурс до капитального ремонта, ч	30 000
Срок службы, лет	12
Уровень шума на расстоянии 1 м от внешнего контура, дБ«А», не более	80
Содержание оксидов азота в выхлопных газах, мг/м <sup>3</sup> , не более	55
Выбросы и утечки газа, топлива, масла	исключаются

Таблица 2

## Основная характеристика электростанции ПАЭС-2500-Т6300

Наименование	Значение
1	2
Номинальная мощность, кВт	2500
Максимальная мощность привода, кВт	2750
Номинальное напряжение (род тока – переменный, трехфазный, «нейтраль» изолированная), В	6300; 10500
Номинальная частота переменного тока, Гц	50
Номинальный коэффициент мощности (при индуктивной нагрузке)	0,8
Габаритные размеры, мм: а) без шумоглушителей:	
- длина	11395
- ширина	2500
- высота	3700

Продолжение таблицы 2

1	2
б) с комплектом шумоглушителей:	
- длина	18000
- ширина	2500
- высота (без газоотводящей трубы)	3186
- высота (с газоотводящей трубой)	12000
Масса, кг, не более:	
а) без шумоглушителя	28500
б) с шумоглушителем	40000
в) с газоотводящей трубой	42000
Расход шахтного метана с концентрацией более 20% при номинальной нагрузке на клеммах генератора (2500 кВт) в нормальных атмосферных условиях, м <sup>3</sup> /ч, до	6000
Безвозвратные потери масла по двигателю, л/ч	0,8
Теплопроизводительность, МВт	7,3
Расход подогреваемой воды через котел, т/ч	140,2
Температура газов, °С:	
- на входе в котел	434
- на выходе из котла	110
Температура воды, °С:	
- на входе в котел	70
- на выходе из котла	115
Расход дымовых газов через котел, кг/с	20,8
Аэродинамическое сопротивление, Па:	
- поверхности нагрева котла	1150
- котла с шумоглушителем и дымовой трубой	1400
Гидравлическое сопротивление котла, МПа	0,06
Масса котла, м	32,7

Таблица 3

Характеристика газо-поршневых установок, выпускаемых отечественными и зарубежными фирмами

Модель	Электрическая мощность, МВт	Тепловая мощность, МВт	$\eta_{\text{э}}$ , %	$\eta_{\text{т}}$ , %	$\Sigma\eta$ , %	Удельный расход газа, $\text{нм}^3/\text{кВт}\cdot\text{ч}$	Удельный расход масла, $\text{г}/\text{кВт}\cdot\text{ч}$	Минимальная концентрация $\text{СН}_4$ , %	Давление газа, атм.	Ресурс до капитального ремонта, тыс.ч
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Украина (з-д им.Малышева)										
11 ГД 100 М	1,0	1,38	34,3	46	80,3	0,3	1,26	40	0,1-6,0	80
17 ГД 100 А	1,6	2,2	35,0	48	83,0	0,286	1,25	40	0,1-6,0	80
Украина (з-д Первомайскдизельмаш)										
ДВГА 630	0,63	0,7	33,0	36	69,0	0,35	1,45	40	0,1-6,0	60
Россия (Нефтегаз)										
ГПТЭА-630	0,63	0,88	35,0	49,0	84,0	0,35	1,54	20	0,03	40
ГПТЭА-800	0,8	1,12	35,0	49,0	84,0	0,35	1,1	20,	0,03	70
ГПТЭА-1000	1,0	1,4	35,0	49,0	84,0	0,35	1,4	20	0,03	60
ГПТЭА-1500	1,5	2,1	35,0	49,0	84,0	0,35	1,4	20	0,03	60
ГПТЭА-2500	2,5	3,5	35,0	49,0	84,0	0,35	1,4	20	0,03	60
Франция (Wärtsilä France)										
WFGLD480/ 80°C	0,65	0,72	41,0	45,0	86,0	0,26	0,45	40	4,2	60
WFGLD480	0,8	0,88	41,0	45,0	86,0	0,26	0,45	40	4,2	60
WC11024/5	1,0	1,11	41,0	45,0	86,0	0,26	0,5	40	4,2	60
WC11500/5	1,5	1,65	41,5	44,5	85,0	0,265	0,45	40	4,2	60
12V220SG	2,1	2,35	41,0	45,0	86,0	0,27	0,45	40	4,2	60

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
18V220SG	3,2	3,5	41,0	44,2	86,2	0,265	0,5	40	4,2	60
12V28SG	4,55	5,4	41,5	45,5	87,0	0,27	0,5	40	4,2	60
12V34SG	5,5	6,1	42,0	46,0	88,0	0,275	0,5	40	4,2	60
Германия (Vorholt & Hermelts GmbH)										
NM 616K16	0,67 8	0,85 7	37,8	47,7	85,5	0,243	0,31	45	0,02-0,1	60
NM 620K12	1,02 2	1,15 6	40,2	45,4	85,6	0,245	0,32	45	0,02-0,1	60
NM 620K16	1,36 5	1,54 2	40,2	45,6	85,8	0,25	0,32	45	0,02-0,1	60
NM 620F16	1,55 5	1,64 5	41,8	44,2	86,0	0,25	0,33	45	0,02-0,1	60
Германия (Deutz AG)										
TBG620FV20	1,69	2,19	36,8	47,9	84,7	0,28	0,4	30	0,02-0,1	64
TBG632FV12	2,56	3,17	39,5	48,9	87,4	0,27	0,4	30	0,02-0,1	64
TBG632FV16	3,5	3,66	41,1	45,8	86,9	0,26	0,4	30	0,02-0,1	64
TBG620FV16	4,0	4,41	41,1	45,8	86,9	0,26	0,4	35	0,02-0,1	64
США (Waukesha Engine Division)										
КГЕ635	0,63 5	0,95 3	37,8	47,5	85,3	0,29	0,2	40	6,0	72
КГЕ860S	0,86	1,37	37,7	46,4	84,1	0,29	0,3	40	6,0	48
КГЕ1100	1,1	2,0	40,1	47,2	87,3	0,30	0,3	40	6,0	48
КГЕ1550	1,55	2,32	40,2	47,5	87,7	0,27	0,6	40	6,0	72
КГЕ2330	2,33	3,49	40,6	47,3	87,9	0,27	0,6	40	6,0	72
КГЕ3250	3,25	4,88	41,0	47,0	88,0	0,26	0,6	40	6,0	72
Австрия (Jenbacher)										
J 312 GS	0,63	0,75	39,8	47,6	87,4	0,25	0,3	33	0,02-0,1	64
J 316 GS	0,84	1,0	40,0	47,7	87,7	0,25	0,3	33	0,02-0,1	64
J 320 GS	1,06	1,19	40,9	45,9	86,8	0,25	0,3	33	0,02-0,1	64

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
J 612 GS	1,64	1,72	42,4	44,6	87,0	0,25	0,3	33	0,02-0,1	64
J 616 GS	2,19	2,35	41,9	45,0	86,9	0,25	0,3	33	0,02-0,1	64
620 GS-S.LC	2,72	2,89	42,4	44,9	87,3	0,25	0,3	33	0,02-0,1	64
620 GS-S.LC	3,03 5	3,04 7	42,9	43,1	86,0	0,225	0,3	25 (зд)	0,020,1	64



(11) **68509**(19) **UA**(51) МПК (2012.01)  
E21B 35/00

<p>(21) Номер заявки: <b>u 2011 11462</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>28.09.2011</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>26.03.2012</b></p> <p>(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: <b>26.03.2012, Бюл. № 6</b></p>	<p>(72) Винахідники: <b>Кудінов Юрій Васильович, UA,</b> <b>Безбородов Володимир Олексійович, UA,</b> <b>Левчинський Григорій Семенович, UA</b></p> <p>(73) Власники: <b>Кудінов Юрій Васильович,</b> пр. Гурова, 13, кв. 26, м. Донецьк, 83055, UA, <b>Безбородов Володимир Олексійович,</b> вул. Горького, 36, м. Макіївка, 86192, UA, <b>Левчинський Григорій Семенович,</b> вул. Толстого, 10, кв. 1, м. Красний Луч, Луганська обл., 94500, UA</p>
---	---

(54) Назва корисної моделі:

**ПРИСТРІЙ ДЛЯ ГАСІННЯ СТАБІЛІЗОВАНОГО ПОЛУМ'Я В ГАЗОВІЙ МАГІСТРАЛІ**

(57) Формула корисної моделі:

1. Пристрій для гасіння стабілізованого полум'я в газовій магістралі, що містить установлену на ній акумулювальну камеру з вхідними і вихідними патрубками, яка сполучається з магістраллю кільцевою щільною, вогнеперекривач, установлений на кінці магістралі з боку вхідного патрубка, який відрізняється тим, що вогнеперекривальний елемент і кінець магістралі з боку вихідного патрубка, які утворюють кільцеву щілину, розміщено переважно посередині довжини акумулювальної камери.

2. Пристрій за п. 1, який відрізняється тим, що в акумулювальній камері на кінцях магістралі з боку вхідного та вихідного патрубків закріплено спіралеподібні стрічки (смуги).

3. Пристрій за пп. 1 та 2, який відрізняється тим, що спіралеподібні стрічки оброблено речовинами, які прискорюють горіння газової суміші.

4. Пристрій за пп. 1 і 2, який відрізняється тим, що спіралеподібні стрічки виконано з розривами суцільності.

5. Пристрій за п. 1, який відрізняється тим, що внутрішню поверхню акумулювальної камери покрито речовинами, що прискорюють горіння газової суміші.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

ЧАСТНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ПОИСК,А.С.»

(АО «ПОИСК,А.С.»)

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор, к.т.н.  
Г.С. Левчинский  
« 4 » июня 2013 г.



УСТРОЙСТВО ТУШЕНИЯ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ПЛАМЕНИ  
В ГАЗОВЫХ МАГИСТРАЛЯХ

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Начальник отдела  
технического контроля  
АО «ПОИСК,А.С.»

 .....  
« 4 » июня 2013 г.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

УТВЕРЖДАЮ  
 Директор ОДО «Укркотлосервис»  
 Кельменсон В.Е.



## АКТ № 5

на внедрение устройства тушения стабилизированного пламени

г. Донецк

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2013 г.

Комиссия в составе:

- зам. начальника ПТО ОДО «Укркотлосервис» Калашникова В.В.
- начальника проектного отдела ОДО «Укркотлосервис» Жмуряева В.В.
- старшего научного сотрудника МакНИИ Маркина В.А.

составила настоящий акт о том, что в 2012 году на котельной ВПС №2 ПАО ШУ «Покровское» при переходе котла КЕ-10-14 с твердого топлива на сжигание шахтного газа метана были установлены устройства тушения стабилизированного пламени на магистральном (нагнетательном) трубопроводе, подающем газ от вакуум-насосной станции к котельной и на сбросные трубопроводы «свечи».

Устройство тушения стабилизированного пламени (патент на корисну модель №68509) является принципиально новым по принципу действия и конструкции.

Применение устройства тушения пламени позволило осуществлять взрывозащиту трубопроводов системы утилизации (котельная) ВПС №2 ПАО ШУ «Покровское».

Выбор мест установки устройств тушения пламени и необходимый объем средств взрывозащиты осуществлялся с участием старшего научного сотрудника отдела рудничной аэрологии Государственного Макеевского научно-

исследовательского института по безопасности работ в горной промышленности (МакНИИ) Безбородова В.А. и технических специалистов.

Мы, нижеподписавшиеся, удостоверяем, что устройство тушения пламени (патент на корисну модель №68509) применяется в настоящее время для обеспечения взрывозащиты на котельной ВПС №2 ПАО ШУ «Покровское».

Члены комиссии:

Зам. начальника ПТО ОДО «Укркотлосервис»  Калашников В.В.

Нач. проектного отдела ОДО «Укркотлосервис»  Жмуряев В.В.

Старший научный сотрудник МакНИИ  Маркин В.А.





**АКТ**  
 на внедрение устройства тушения стабилизированного пламени  
 в газовых магистралях

4 июня 2013 г.

г.Антрацит

Комиссия в составе:

первого заместителя начальника производственного комплекса Судук О.Я.;  
 инженера-технолога Ошовской Л.В.;  
 главного энергетика Коршун С.Г.

установила, что АО «ПОИСК,А.С.» внедрено устройство тушения стабилизированного пламени в газовых магистралях для обеспечения взрывозащиты поверхностных передвижных вакуум-насосных станций, подающих газ к системам утилизации. Устройство состоит из аккумулирующей камеры с входным и выходным патрубками, кольцевой щели и огнепреградителя. Разработано на основании патента на полезную модель №68509 авторов Кудинова Ю.В. и Безбородова В.А.

Устройство тушения пламени является принципиально новым средством взрывозащиты по конструкции и принципу действия, позволяющее повысить безопасность ведения работ по дегазации и утилизации шахтного метана.

Установка устройства тушения пламени предусматривается на нагнетательной части трубопровода и на сбросном трубопроводе «свече».

Во внедрении принимали участие сотрудники отдела рудничной аэрологии МакНИИ, а также технические работники АО «ПОИСК,А.С.»



МІНІСТЕРСТВО ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

(Мінвуглепром)

НАКАЗ

23 нікові 2218

№ 533

Про затвердження та надання чинності стандарту Міністерства вугільної промисловості СОУ-П 10.1.00174088.015:2008 „Транспортування і використання метану, що каптується дегазаційними системами шахт. Вимоги безпеки”

*Висаринський*  
05.11.08  
*Маркаш В. П.*  
*Борисюк В. А.*  
*Контик В. П.*  
*Мухомор А. П.*  
*Денисенко Н. Р.*  
4.11.08

З метою забезпечення виконання Гірничого закону України, Закону України „Про охорону навколишнього природного середовища”

**НАКАЗУЮ:**

1. Затвердити стандарт Міністерства вугільної промисловості України (Мінвуглепрому): СОУ-П 10.1.00174088.015:2008 „Транспортування і використання метану, що каптується дегазаційними системами шахт. Вимоги безпеки”, (додається).
2. Встановити чинність стандарту з 01.03.2009
3. Державному Макіївському науково-дослідному інституту з безпеки робіт у гірничій промисловості (МакНДІ), (Брюханов О.М):
  - 3.1 Визначити до 01.01.2009 р. потребу, організувати тиражування і розсилку стандарту зашкваленим підприємствам і організаціям на договірних умовах.
4. Контроль за виконанням цього наказу покласти на першого заступника Міністра вугільної промисловості України Францишка О.К.

Міністр

*Францишк*

В. Полтавець

МАКІЙСЬКА КАНЦЕЛЯРІЯ	
Дата	04.11.08
№ 486	№ 15

344  
06.11.08г.