

Федеральное Государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
**«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени Т.Ф. ГОРБАЧЕВА»**

На правах рукописи



**ГАЛСАНОВ НИМА ЛАЙДАПОВИЧ**

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ПОДАВЛЕНИЯ ОЧАГОВ САМОВОЗГОРАНИЯ  
УГЛЯ В ШАХТАХ ИНЕРТИЗИРУЮЩИМИ СОСТАВАМИ С  
ЗАМОРАЖИВАНИЕМ ЧАСТИЦ ЖИДКОСТИ**

05.26.03 - Пожарная и промышленная безопасность (в горной промышленности)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
д. т. н., проф. В. А. Портола

Кемерово 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. АНАЛИЗ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ БОРЬБЫ С САМОВОЗГОРАНИЕМ УГЛЯ В ШАХТАХ .....	9
1.1. Эндогенная пожароопасность угольных шахт Кузбасса .....	9
1.2. Условия развития самовозгорания угля в шахтах .....	19
1.3. Способы подавления процессов самовозгорания угля в шахтах. ....	26
Выводы .....	37
2. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ИНЕРТИЗИРУЮЩИХ СОСТАВОВ. .	38
2.1. Исследование влияния соотношения исходных компонентов на температуру инертизирующих составов .....	38
2.2. Исследование теплофизических параметров инертизирующих составов .....	46
2.3. Сравнительная оценка хладагентного действия пожаротушащих составов .....	51
Выводы .....	60
3. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ УГОЛЬНОГО СКОПЛЕНИЯ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ИНЕРТИЗИРУЮЩИМИ СОСТАВАМИ .....	61
3.1. Исследование теплофизических параметров угольного скопления после обработки инертизирующими парогазовыми смесями .....	61
3.2. Исследование химической активности угля после обработки инертизирующими составами .....	69
3.3. Изменение химической активности прогретого угля после обработки инертизирующими составами .....	75
Выводы .....	77
4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССА САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ .....	78

4.1.	Выбор математической модели для исследования процесса самовозгорания угля. . . . .	80
4.2.	Исследование развития процесса самовозгорания угля после воздействия инертизирующими составами. . . . .	83
4.3.	Тушение очагов самовозгорания угля инертизирующими составами. . .	90
	Выводы . . . . .	99
5.	ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИНЕРТИЗИРУЮЩИХ СОСТАВОВ И СХЕМЫ ИХ ПОДАЧИ . . . . .	102
5.1.	Параметры инертизирующих составов при распространении в выработанном пространстве . . . . .	102
5.2.	Устройства для получения инертизирующих составов . . . . .	113
5.3.	Схемы подачи инертизирующих составов для борьбы с самовозгоранием угля в шахтах . . . . .	120
5.4	Перспективы применения инертизирующих составов для борьбы с самовозгоранием угольной пыли . . . . .	126
	Выводы . . . . .	128
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .	130
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ . . . . .	133

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Добыча полезных ископаемых сопровождается опасностью реализации ряда негативных факторов, угрожающих здоровью и жизни людей. Особенно осложняет горные работы выемка угля, склонного к самовозгоранию. При тушении эндогенных пожаров теряются подготовленный к выемке уголь, горные выработки, угледобывающая техника. Большие затраты необходимы для тушения пожаров, восстановления оборудования и выработок. Развитие эндогенных пожаров сопровождается образованием большого количества токсичных газов, может осложниться образованием взрывоопасной газовой смеси.

Для тушения эндогенных пожаров, возникающих в выработанном пространстве, обычно используют метод изоляции, требующий длительного времени для охлаждения угля. Сократить время ликвидации очагов самовозгорания позволяет подача жидких хладагентов. Однако такие составы малоэффективны из-за небольшой дальности распространения в разрыхленных породах. Поэтому обоснование и разработка новых способов борьбы с самовозгоранием угля в выработанном пространстве шахт является актуальной задачей для угольной промышленности.

Существенно повысить эффективность работ по предупреждению и подавлению очагов самовозгорания позволит снижение температуры подаваемых составов, а также использование компонентов, поглощающих теплоту при фазовых переходах. Такими могут быть составы, состоящие из частиц замерзшей жидкости, получаемых при совместном распылении жидкости или водяного пара с жидким азотом. Образующиеся частицы льда легко транспортируются через скопления горных пород, поглощают тепло на нагрев льда, жидкости, при переходе льда в жидкое состояние.

**Целью работы** является теоретическое и экспериментальное обоснование метода, позволяющего повысить эффективность подавления очагов и предотвращения самовозгорания угля в шахтах на основе использования инертизирующих составов.

**Идея работы** состоит в использовании для снижения эндогенной пожароопасности составов, состоящих из частиц замороженной жидкости и инертного газа, полученных при совместном распылении жидкого азота с водой, растворами антипирогена или водяным паром.

**Задачи исследований:**

- исследовать параметры инертизирующих составов в зависимости от расхода жидкого инертного газа, воды и водяного пара;
- исследовать изменение свойств угольного скопления после обработки инертизирующими составами;
- оценить эффективность воздействия инертизирующих составов на различные стадии процесса самовозгорания угля;
- разработать устройство и параметры подачи инертизирующих составов для подавления процесса самовозгорания.

**Методы исследований:**

- анализ теории и практики применения способов и средств по предупреждению и тушению эндогенных пожаров;
- теоретическое и экспериментальное исследование теплофизических свойств инертизирующих составов в зависимости от соотношения исходных компонентов и их начальных параметров;
- лабораторные эксперименты по оценке химической активности угля по отношению к кислороду воздуха после обработки инертизирующими составами;
- математическое моделирование процесса самовозгорания угля после обработки инертизирующими составами и воздействия различных хладагентов на очаги самовозгорания угля.

**Научные положения**, выносимые на защиту:

1. Изменение соотношений расхода жидкого азота и жидких составов, а также исходной температуры жидкости позволяет регулировать содержание частиц льда в инертизирующем составе, его плотность и удельную теплоемкость.
2. Обработка скопления угля инертизирующими составами, полученными при совместном распылении жидкого азота и воды, снижает химическую актив-

ность угля по отношению к кислороду в 2-8 раз и увеличивает его влажность, что позволяет использовать составы для предупреждения самовозгорания угля.

3. Увеличение температуры получаемого инертизирующего состава сопровождается ростом доли частиц льда в нем и приводит к повышению эффективности охлаждения очагов самонагревания.

**Достоверность научных положений и выводов** подтверждается:

- корректностью методов исследований и обработки экспериментальных данных;
- использованием апробированных методик и контрольных приборов при проведении лабораторных исследований.
- положительными результатами аналитических и лабораторных исследований;
- удовлетворительной сходимостью результатов натурных и аналитических исследований свойств инертизирующего состава;
- полученным патентом на способ предупреждения самовозгорания угля в шахтах.

**Научная новизна** заключается в следующем:

- установлены зависимости изменения теплофизических параметров инертизирующих составов, получаемых при совместном распылении жидкого азота и водных растворов или пара, от соотношения исходных компонентов;
- установлена зависимость снижения химической активности угля по отношению к кислороду после обработки инертизирующими составами;
- найдены зависимости изменения температуры разогретого угольного скопления при движении инертизирующих составов, полученных при перемешивании жидкого азота с водой или водными растворами антипирогенов;
- получены зависимости изменения скорости движения инертизирующих составов в выработанном пространстве от расстояния до точки их подачи.

**Личный вклад автора:**

- в обосновании возможности применения инертизирующих составов на основе азота и замороженных частиц воды и антипирогена для предотвращения и подавления очагов самовозгорания угля в шахтах;

- в обработке и анализе результатов теоретических исследований и лабораторных экспериментов;

- в разработке устройства для получения инертизирующих составов и исследовании параметров получаемых составов;

- в обосновании, испытании и внедрении метода предотвращения и подавления очагов самовозгорания инертизирующими составами.

**Практическая ценность работы** заключается в обосновании рекомендаций по условиям и режимам применения предложенного метода предупреждения и подавления очагов самовозгорания угля и угольной пыли, а также разработке устройства для его реализации, что позволит повысить безопасность горных работ и снизить экономический ущерб от эндогенных пожаров.

#### **Реализация результатов исследования.**

Реализация разработанного метода борьбы с самовозгоранием угля подачей инертизирующих составов с замораживанием частиц жидкости для подавления очага самовозгорания, возникшего на шахте «Талдинская-Западная-1», показала его высокую эффективность

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы, результаты теоретических и экспериментальных исследований обсуждались и получили одобрение на XVIII Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» (Севастополь, 2011г.); XI Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах» (Кемерово, 2011); III Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии и экономика в машиностроении» (Юрга, 2012); XII Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» (Кемерово, 2012); IV Международной научно-практической конференции (Юрга, 2013); Международной конференции «Mining 2014. Taishan Academic Forum – Project on Vine Disaster Preven-

tion and Control. Chinese Coal in the XXI Century: Mining, Green and Safety» (Циндао, Китай); X Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах» (Кемерово, 2015).

Результаты работы внедрены на шахте Талдинская-Западная-1.

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано восемнадцать научных работ, в том числе семь статей в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России, одна монография, получен один патент на изобретение.

**Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, 5 разделов, заключения и содержит 149 страниц текста, 56 рисунков, 13 таблиц и список литературы из 162 наименований.

# 1. АНАЛИЗ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ БОРЬБЫ С САМОВОЗГОРАНИЕМ УГЛЯ В ШАХТАХ

## 1.1. Эндогенная пожароопасность угольных шахт Кузбасса

Проводимая реструктуризация угольной промышленности России способствовала увеличению объема добываемого угля [1-5]. Так, с 2006 по 2014 г добыча угля в России возросла с 310 млн. т до 358,2 млн. т (рис. 1.1). В Кузбассе также наблюдалось увеличение темпов угледобычи в последние годы с 181,1 млн. т в 2009 г до 202,7 млн. т в 2013 г (рис. 1.2). На рис. 1.3 приведены данные добычи угля открытым и подземным способом России. Однако аварийность сдерживает рост темпов угледобычи. Особенно замедляются работы по добыче угля при возникновении очагов самовозгорания.

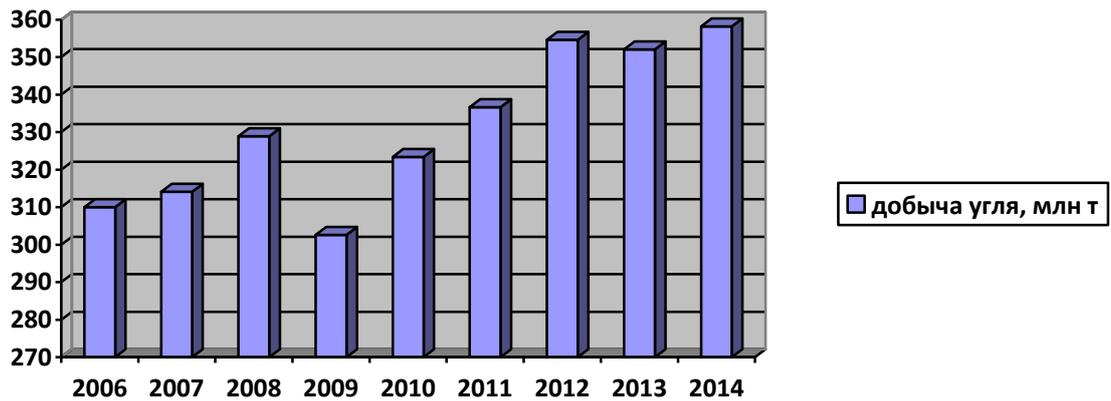


Рис. 1.1. Добыча угля в России

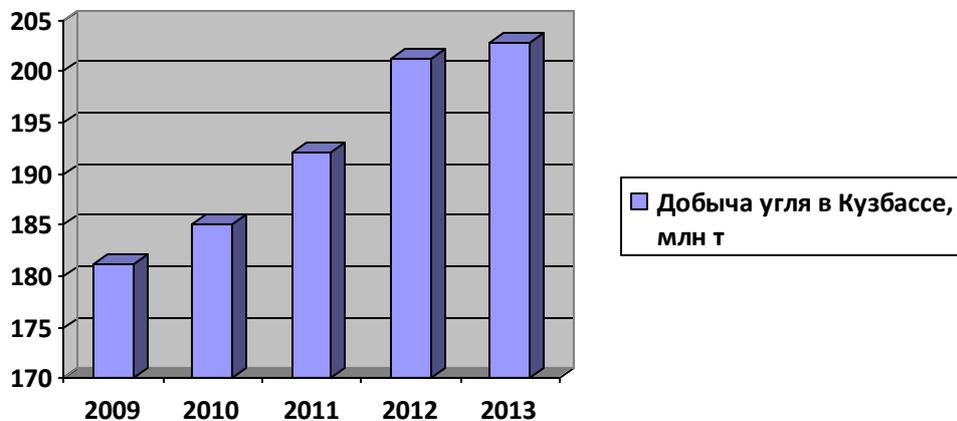


Рис. 1.2. Добыча угля в Кузбассе

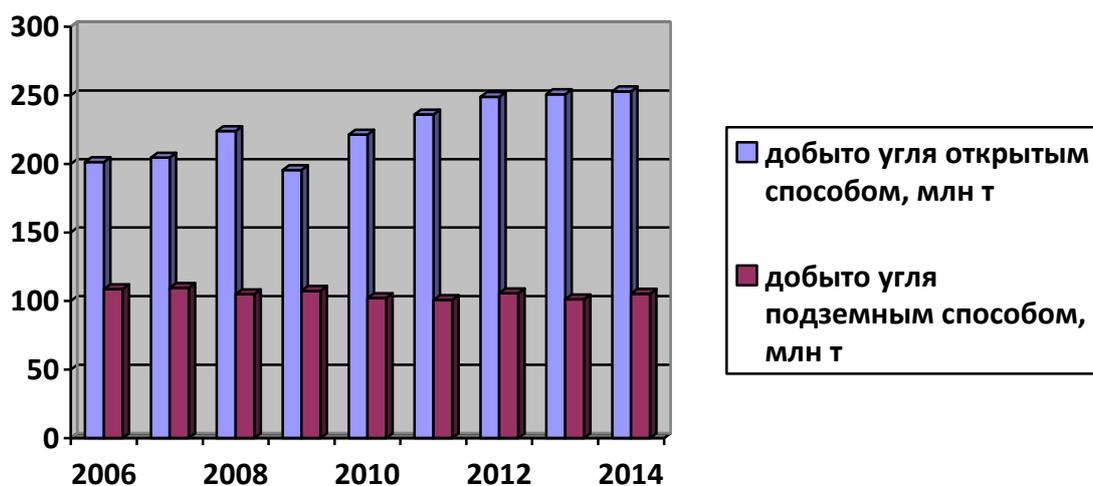


Рисунок 1.3. Добыча угля в России открытым и подземным способом

Учитывая огромную опасность, возникающую в случае развития эндогенного пожара в шахте, изучением процесса самовозгорания угля занимались ученые из различных научно-исследовательских организаций и высших учебных заведений. Наибольший вклад в развитии проблемы самовозгорания внесли работы А.А. Скочинского, И.М. Печука, В.М. Огиевского, Л.Н. Быкова, В.М. Маевской и др. [6-12]. Изучение условий возникновения эндогенных пожаров на шахтах позволило разработать ряд способов борьбы с подземными пожарами, внедренных на угольных предприятиях.

Для изучения процесса развития самовозгорания угля на этом этапе в основном использовались шахтные наблюдения, а также были изготовлены лабораторные стенды для физического моделирования процесса возникновения и развития эндогенного пожара. Проведенные исследования позволили установить зависимость процесса самовозгорания от внешних условий и рекомендовать способы тушения пожаров, возникших в выработанном пространстве угольных шахт. В результате изучения воздействия антипирогенов на уголь предложены методы, снижающие вероятность развития эндогенных пожаров в шахтах.

Позднее большой вклад в исследование процесса самовозгорания угля внесли труды В.С.Веселовского, В.Ф. Орешко, Е.И. Глузберга, В.И. Саранчука,

Х.А. Баева, С.П. Кузьминского и др. [13-27]. Так, под руководством В.С. Веселовского проведено изучение химической активности углей по отношению к кислороду воздуха, найдены зависимости этого параметра от степени метаморфизма углей, их фракционного состава, влажности и других свойств угля. На этом этапе предложено применять метод математического моделирования для исследования процесса самовозгорания угля, что существенно упростило и ускорило обоснование новых методов торможения процесса и снижения температуры угля. Разработан ряд математических моделей, описывающих тепло- и массоперенос в скоплении угля, использование которых способствовало получению закономерностей, описывающих влияние ряда факторов на процесс самовозгорания угля в шахтах.

Анализ статистических данных свидетельствует, что в угольной промышленности страны наибольшее количество эндогенных пожаров возникает на шахтах Кузбасса [27]. Учитывая актуальность проблемы, в регионе на основе институтов ВостНИИ, ВО ВНИИГД, КузНИУИ, КузГТУ возникли собственные школы изучения эндогенной пожароопасности угольных шахт, разработке способов профилактики, обнаружения и тушения подземных пожаров. Самовозгоранием угля в Кузбассе занимались В.Г. Игишев, Л.П. Белавенцев, В.А. Портола, В.А. Бонецкий, О.И. Чернов, Ю.А. Миллер и др. [28-44]. Так, в работах [28, 33-35] обосновано применение пены для предупреждения, локализации и тушения очагов самовозгорания в выработанном пространстве шахт. Данный способ позволяет проводить очистные работы одновременно с профилактикой самовозгорания угля в выработанном пространстве и подавлять процессы самонагрева угля.

Сотрудниками ВостНИИ был разработан способ предупреждения эндогенных пожаров в выработанном пространстве путем распыления жидкого аэрозоля в потоке воздуха, поступающем в отработанную часть пласта [29]. Теоретическому обоснованию способов обнаружения процесса самовозгорания и определению местонахождения очага в выработанном пространстве по газовым аномалиям, образующимся на земной поверхности, посвящены работы [30, 36,

37]. Для обнаружения ранней стадии эндогенного пожара, возникающего в скоплении угля, предложено использовать образующиеся в рудничной атмосфере жидкие аэрозоли [40].

Добыча угля на шахтах Кузбасса сопровождалась возникновением эндогенных пожаров в течение всего периода эксплуатации угольного месторождения. Наиболее пожароопасным является Прокопьевско-Киселевское месторождение, особенностью которого является наличие крутопадающих пластов, уголь которых имеет большую химическую активность. Небольшая скорость подвигания очистных забоев из-за сложных горно-геологических условий, трудность изоляции выработанного пространства обусловили высокую эндогенную пожароопасность угледобывающих предприятий этого месторождения.

Так, за период с 1951 по 1961 г только на шахтах этого района ежегодно возникало от 11 до 43 эндогенных пожаров [27]. В последующие годы были проведены широкие исследования процесса самовозгорания в лабораторных и шахтных условиях, позволивших найти закономерности возникновения и развития процесса самовозгорания угля. Благодаря полученным результатам были разработаны новые способы профилактики эндогенных пожаров, что позволило снизить количество эндогенных пожаров на шахтах месторождения.

Особенно резкое уменьшение количества ежегодно возникающих эндогенных подземных пожаров наблюдалось с началом реструктуризации угольной промышленности России, приведшей к закрытию шахт с наиболее опасными условиями труда. В первую очередь ликвидировались шахты с большим количеством эндогенных пожаров, затрудняющих угледобычу и наносящих огромный экономический ущерб предприятиям, угольной отрасли в целом. Так, в 1990-1998 гг. на всех шахтах России каждый год регистрировалось около 30 пожаров от самовозгорания угля, в том числе в Кузбассе около 20 эндогенных пожаров, а с 1999 г. это число снизилось до 10-15 эндогенных пожаров по стране (в Кузбассе около 10 случаев ежегодно) [30].

Применение более совершенной высокопроизводительной угледобывающей техники привело к дальнейшему уменьшению количества возникающих на

шахтах экзогенных и эндогенных пожаров. Общее количество эндогенных и экзогенных пожаров, возникших по данным Ростехнадзора на шахтах Кузбасса за последние годы [41], представлено в табл. 1.1. В приведенных данных не учтены случаи самонагрева угля, подавленные на начальной стадии развития и не угрожающие жизни и здоровью шахтеров (инциденты).

Таблица 1.1

## Количество подземных пожаров, возникших на шахтах Кузбасса

Год	Общее количество подземных пожаров	Количество эндогенных пожаров	Количество экзогенных пожаров
2014	3	2	1
2013	5	4	1
2012	6	6	-
2011	3	3	-
2010	6	4	2
2009	2	2	-
2008	2	2	-
2007	5	3	2
2006	4	3	1
2005	4	2	2
2004	8	8	-
2003	7	6	1
2002	6	2	4
2001	7	6	1
2000	6	3	3
1999	10	8	2
1998	19	12	7
Всего за период	104	77	27

Анализируя результаты, приведенные в табл. 1.1, можно сделать вывод, что общее количество пожаров, особенно эндогенного происхождения, резко сократилось в 2000 году. Следующее существенное снижение количества подземных пожаров на шахтах Кузбасса произошла в 2005 году. В последующие годы число ежегодно регистрируемых подземных пожаров остается на одном уровне. Причем большая часть подземных пожаров (более 70 %) составляют пожары от самовоз-

горания угля. Особенно эта ситуация характерна в последние три года, за которые возникло только два экзогенных пожара и восемь эндогенных пожаров.

Экономический ущерб, причиненный подземными пожарами угольным шахтам Кузбасса за 2000-2010 г.г., представлен в табл. 1.2.

Таблица 1.2.

Экономический ущерб, причиненный угольным шахтам Кузбасса подземными пожарами

Год	Общий ущерб от пожаров, тыс. руб.	Ущерб от эндогенных пожаров, тыс. руб.	Ущерб от экзогенных пожаров, тыс. руб.
2010	273364,2	243263,3	30100,9
2009	49999,0	49999,0	-
2008	31699,0	31699,0	-
2007	52698,5	2947,2	49751,3
2006	33696,3	30084,7	3611,6
2005	63817,4	1372,4	62445,0
2004	21128,4	2128,4	-
2003	76546,9	74876,9	1670,0
2002	106280,0	500,0	105780,0
2001	26794,0	26764,7	29,3
2000	171865,0	80076,0	91789,0
Всего за период	907888	562711	345177

Приведенные в табл. 1.2. данные свидетельствуют, что наибольший экономический ущерб на угольных шахтах обусловлен эндогенными пожарами. Так, на их долю приходится около 62 % от ущерба, причиняемого всеми подземными пожарами. Потери, обусловленные пожарами, в том числе эндогенного происхождения, в последние годы незначительно колеблются относительно среднего уровня. Исключение составляет 2010 г., в котором произошло резкое увеличение экономического урона, наносимого эндогенными пожарами. В последние три года основные экономические потери происходят от возникновения самовозгорания угля. Так, в 2008-2010 гг. ущерб от эндогенных пожаров превышает 90 % от общих потерь.

В табл. 1.3 приведен средний экономический ущерб, обусловленный возникновением на шахтах Кузбасса эндогенных и экзогенных пожаров.

Представленные в табл. 1.3 данные свидетельствуют о том, что за 2000-2010 г.г. средний ущерб от одного пожара в шахте составляет 15 млн. 653 тыс. руб. Причем, учитывая значительное изменение условий протекания пожаров, наблюдается существенное колебание потерь, обусловленных этими авариями. Так, в различные годы средний ущерб от возникновения одного подземного пожара колеблется от 2 млн. 641 тыс. руб., до 45 млн. 560 тыс. руб. Еще более значительные изменения среднего экономического ущерба происходит в случае самовозгорания угля (от 250 тыс. руб. до 60 млн. 815 тыс. руб.). Средний урон, наносимый экзогенными пожарами, составляет 21 млн. 276 тыс. руб.

Таблица 1.3

## Средний экономический ущерб от одного подземного пожара

Год	Средний ущерб от одного подземного пожара, тыс. руб.	Средний ущерб от одного эндогенного пожара, тыс. руб.	Средний ущерб от одного экзогенного пожара, тыс. руб.
2010	45560,7	60815,8	15050,4
2009	24999,5	24999,5	-
2008	15849,5	15849,5	-
2007	10539,7	982,4	24875,6
2006	8424,1	10028,2	3611,6
2005	15954,3	686,2	31222,5
2004	2641,1	2641,1	-
2003	10935,3	12479,5	1670,0
2002	17713,3	250,0	26445,0
2001	3827,7	460,8	29,3
2000	28644,2	26692,0	30596,3
Средний ущерб от одного пожара за весь период	15653,2	13397,9	21576,5

Однако опасность эндогенных пожаров, возникающих в шахтах, существенно возрастает из-за низкой эффективности способов тушения очагов самовозгорания, возникающих в выработанном пространстве. Многие эндогенные пожары, несмотря на применяемые способы тушения, могут гореть годами. Нередки случаи рецидива эндогенных пожаров после проведенных мероприятий по ликвидации аварии, что свидетельствует не только о ненадежности применяемых спо-

собов тушения, но и о недостатках используемых способов и средств контроля за ходом тушения пожаров. В табл. 1.4 приведены данные о действующих пожарах на шахтах Кузбасса по состоянию на 02.11.2015 г.

Таблица 1.4

## Сведения о действующих пожарах на шахтах Кузбасса на 02.11.2015 г

№	Наименование шахты	Номер пожара	Дата возникновения	Примечание
1	2	3	4	5
1	ОАО Заречная	3-Р	20.09.2015г.	Подача инертной пены
2	ОАО «Шахта Грамотеинская»	80	14.04.2012г.	Проводится тушение, мониторинг
3	ОАО «Шахта Талдинская-Западная 1»	1	20.02.2015г.	Проводится затопление, мониторинг
4	ООО Шахта Листвяжная»	15	13.07.2015	Проводится мониторинг
5	ОАО «Шахта № 12»	457	07.07.2001г.	Проводится мониторинг
6	ОАО «Шахта № 12№	449	22.04.2003г.	Пассивный способ тушения
7	Распадская-Коксовая	48-р	21.09.2015г.	Производится тушение
8	ОАО «Киселевская»	458	05.06.2013г.	Проводится мониторинг
9	ОАО «Луговое» (Дальние горы)	446	22.04.2009г.	Проводится мониторинг
10	ООО Коксовая 2	611-р	18.10.2013г.	Подается вода
11	Зиминка	867-р	13.12.2014г.	Проводится мониторинг
12	Зиминка	872	14.08.2012г.	Проводится мониторинг
13	Красногорская	856р	26.03.2010г.	Подача азота
14	ООО «Шахта им. Дзержинского»	851-2р	13.07.2009	Подается пена, азот с поверхности
15	Томская	70	17.09.2012г.	Проводится мониторинг
16	ООО «Шахта им. Дзержинского»	871	01.12.2010	Подается пена, азот
17	Распадская	63	08.09.2010г.	Подача пены, азота
18	ОАО «Шахта Алардинская»	1 экз.	17.12.2002г.	Проводится мониторинг

1	2	3	4	5
19	ОАО «Шахта Алардинская»	75	25.04.2005г.	Проводится мониторинг
20	ОАО «Шахта Алардинская»	79	25.02.2011г.	Проводится мониторинг
21	ОАО «Шахта Есаульская»	1	08.02.2005г.	Проводится мониторинг
22	ОАО «Шахта им. Ленина»	23р	21.06.2001г.	Подача пены, азота
23	ОАО «Шахта им. Ленина»	55	18.11.1996г.	Подача пены, азота

Из представленных в табл. 1.4 данных видно, что эффективность тушения эндогенных пожаров не удовлетворяет требованиям производства. Так, на 02.11.2015 г. на шахтах Кузбасса действовало 23 подземных пожара. Причем один эндогенный пожар не могут потушить более 19 лет. Неоднократно наблюдаются рецидивы эндогенных пожаров.

Существенно снизить экономические потери от возникновения эндогенных пожаров позволяет быстрая ликвидация очага. Так, анализ аварийности за 2009 г. показал, что ущерб от двух возникших в этом году эндогенных пожаров составил 49999 тыс. руб. (табл. 1.2), а средние экономические потери от одного пожара достигли 24999,5 тыс. руб. (табл. 1.3). В этот же год на шахтах Кузбасса были зарегистрированы четыре инцидента, закончившиеся быстрой ликвидацией очагов самовозгорания на ранней стадии развития. Общий экономический ущерб от этих инцидентов составил 15763 тыс. руб., а средние потери от одного инцидента равны 3940 тыс. руб. Из приведенных данных видно, что в случае быстрой ликвидации очага самовозгорания средний экономический ущерб снижается в 6,3 раза.

Удельное количество эндогенных пожаров, возникающих на угольных шахтах Кузбасса, приходящихся на 1 млн. т добытого подземным способом угля, а также удельный экономический ущерб на 1 млн. т угля приведено в табл. 1.5.

Удельное количество эндогенных пожаров и удельный экономический ущерб от их возникновения на шахтах Кузбасса

Год	Добыто угля подземным способом в России, млн. т	Добыто угля подземным способом в Кузбассе, млн. т	Количество возникших эндогенных пожаров в Кузбассе	Ущерб от эндогенных пожаров в Кузбассе, млн. руб.	Удельное количество эндогенных пожаров в Кузбассе, энд.пож./млн. т угля	Удельный ущерб от эндогенных пожаров в Кузбассе, млн. руб./млн. т угля
2001	95,2	92,6	6	26,76	0,065	0,289
2002	86,6	82,6	2	0,50	0,024	0,006
2003	93,3	82,1	6	74,87	0,073	0,912
2004	101,7	81,4	8	2,13	0,098	0,026
2005	104,7	80,6	2	1,37	0,025	0,017
2006	108,7	79,9	3	30,08	0,037	0,376
2007	109,6	84,1	3	2,95	0,036	0,035
2008	104,2	81,8	2	31,70	0,024	0,387
2009	107,4	85,9	2	49,99	0,023	0,582
2010	102,1	79,2	4	243,26	0,050	3,071

Приведенные в табл. 1.5 сведения показывают, что средний удельный ущерб от эндогенных пожаров за рассматриваемый период составил 0,57 млн. руб./млн. т угля, удельная эндогенная пожароопасность равна 0,045 энд. пож./млн. т угля. Причем в последние годы наблюдается тенденция роста удельного экономического ущерба от эндогенных пожаров.

Таким образом, проведенные исследования показали, что в последние годы количество возникающих на шахтах Кузбасса подземных пожаров, в том числе эндогенных, стабилизировалось. Среди регистрируемых на угольных шахтах Кузбасса подземных пожаров основную долю составляют эндогенные пожары. Большая часть экономического ущерба, причиняемого угольным шахтам всеми видами аварий, также приходится на эндогенные пожары. Для снижения экономиче-

ских потерь, обусловленных эндогенными пожарами, необходимо применять способы быстрой ликвидации очагов самовозгорания.

## 1.2. Условия развития самовозгорания угля в шахтах

Развитие самовозгорания происходит при наличии горючего окисляющегося материала, притока к нему достаточного количества воздуха и условий теплообмена, при которых в окисляющемся материале выделяется тепла больше, чем теряется в окружающее пространство [6]. Состав и свойства углей могут изменяться в широких пределах, что существенно затрудняет исследования процесса самовозгорания. Так, нередко в аналогичных экспериментах, проводимых с разным углем, получаются противоречивые результаты. Зачастую у различных исследователей выводы существенно различаются из-за применения различных методик изучения процесса самовозгорания и физико-химических свойств угля.

Анализ литературных источников показывает, что в настоящее время нет единого мнения о причинах самовозгорания угля. Так, источниками выделения тепла считают наличие в угле пирита, жизнедеятельность микроорганизмов, фенольные группы, а также образование уголь-кислородных комплексов [12-14,21,42,43]. Согласно пиритной теории выделение тепла в угле происходит при взаимодействии с кислородом и водой пирита ( $\text{FeS}_2$ ). Процесс сопровождается образованием серной кислоты, взаимодействующей с горными породами с выделением тепла. Однако возникновение очагов самовозгорания в угле с незначительным содержанием пирита не подтверждает данное предположение.

Наличие бактерий также не является необходимым условием развития самовозгорания угля, так как в экспериментах самонагревание происходило в скоплениях, где микроорганизмы были уничтожены предварительным прогреванием. В теории уголь-кислородных комплексов кислород вначале сорбируется на поверхности угля с образованием неустойчивых соединений. Затем происходит распад этих соединений с образованием более сложных уголь-

кислородных комплексов. При образовании и распаде соединений выделяется тепло и образуется ряд газов ( углекислый газ, оксид углерода, вода и др.).

Сорбционная активность добываемого угля может изменяться в широких пределах. В наибольшей степени удельная скорость поглощения кислорода зависит от пористости угля, степени его метаморфизма, наличия включений, влажности и пр. [12-14,20,22,23,42,43]. Химическая активность может существенно меняться в пределах одного пласта, что, прежде всего, связано с его петрографической структурой, поэтому необходимы периодические измерения этого параметра для оценки склонности угля к самовозгоранию.

С увеличением степени метаморфизма углей их химическая активность уменьшается. Угли с пористой структурой более активны, чем с плотной структурой. Вблизи земной поверхности в зоне выветривания химическая активность углей понижена вследствие образования на поверхности угля пленки из окисленного угля. В зонах тектонических нарушений и в старых горных выработках угли могут иметь повышенную химическую активность вследствие выделения метана, освобождающего угольную поверхность для сорбции кислорода. В таких зонах также увеличивается пористость угля из-за разгрузки от горного давления, что облегчает проникновение кислорода. Повышение температуры, происшедшее от трения при смещении горных пород, способствовало увеличению химической активности углей.

Изучение литературных данных о проведенных исследованиях, показывает, что в настоящее время существуют различные мнения не только о количественном, но и качественном влиянии некоторых факторов на процесс самовозгорания угля. Например, многочисленные исследования были посвящены влиянию влажности угля на процесс самовозгорания [46-56]. Однако в литературе имеются противоречивые данные о влиянии влаги на химическую активность угля и динамику изменения температуры угольного скопления при самовозгорании. Так, в работах [46-50] утверждается, что вода, воздействуя на уголь, выполняет роль катализатора, ускоряя развитие самовозгорания угля. По мнению авторов, активность угля к окислению возрастает при добавке воды за

счет раскрытия микро- и макротрещин при набухании и последующем высыхании угля.

Однако в ряде других исследований установлено, что скорость поглощения кислорода углем снижается при увеличении его влажности [31,51-53]. Причиной такого действия является заполнение жидкостью пор и образование пленки из воды на поверхности угля, что замедляет проникновение кислорода к активным центрам. В работе [54] утверждается, что рост влажности угля существенно замедляет процесс самовозгорания за счет потерь образующегося тепла на нагрев и испарение жидкой фазы. Снижается скорость нагрева угля при увлажнении также из-за повышения его удельной теплоемкости и роста коэффициента теплопроводности угля. В [56] сделан вывод о возможности торможения процессов окисления угля кислородом воздуха в начальный период самонагрева угля за счет его увлажнения воздухом, влагосодержание которого увеличено на 20–25 %.

Математическое моделирование [24,30] показало, что за счет потерь тепла, идущих на нагрев и испарение жидкости, повышение влажности угля приводит к замедлению процесса самовозгорания. Замедление процесса самовозгорания при росте влажности угля установлено и в работе [57,58], где рекомендуется повышать влажность угольных скоплений путем подачи в выработанное пространство водных растворов антипирогенов.

Наиболее вероятной причиной противоречивых результатов исследования воздействия влаги на уголь является различие в физико-химических свойствах отобранных проб. Особенно значительное влияние на изменение свойств угля при увлажнении может оказать длительность хранения образцов угля перед исследованием. Так, длительный контакт угля с воздухом приводит к образованию на его поверхности пленки из продуктов окисления. В этом случае добавка воды может привести к разрушению такой пленки, что упростит проникновение кислорода к угольной поверхности и вызовет увеличение химической активности угля.

Неоднозначны результаты исследований о влиянии скорости воздуха, фильтрующегося через скопление угля, на процесс самовозгорания. Так, в ходе математического моделирования, результаты которого приведены в работах [23,24, 60], сделан вывод о том, что не существует единой оптимальной пожароопасной скорости фильтрации воздуха для всех случаев самовозгорания угля. В каждом конкретном случае имеется оптимальная скорость движения воздуха, обеспечивающая максимальную скорость повышения температуры скопления. Эта скорость воздуха может изменяться, и ее значение определяется мощностью угольного скопления и физико-химическими свойствами угля. Для реальных размеров угольных скоплений в выработанном пространстве шахт пожароопасные скорости фильтрации воздуха составляют  $10^{-5}$ – $10^{-3}$  м/с. Существенно увеличенные значения скорости фильтрации воздуха через выработанное пространство, способные вызвать самовозгорание угля, приведены в работах [61-62]. Так, полученные пожароопасные утечки равны  $10^{-2}$  –  $10^{-3}$  м/с.

Противоречивые выводы о влиянии расхода воздуха на процесс самовозгорания можно объяснить использованием углей с различными физико-химическими свойствами. Например, в работе [63] сделан вывод о возможности развития процесса самонагрева угольного скопления только за счет молекулярной диффузии кислорода. Максимальная температура в угольном скоплении только за счет молекулярной диффузии может достигать 150 °С. Однако данной температуры может быть достаточно для возникновения конвективных потоков воздуха, подводящих кислород к очагу, за счет развиваемой тепловой депрессии.

Результаты математического моделирования процесса самовозгорания угольного скопления, представленные в работе [59], показывают, что изменение скорости воздуха, фильтрующегося через скопление угля, неоднозначно влияет на процесс самовозгорания. Так, с ростом скорости воздуха увеличивается приток кислорода к углю, а, следовательно, и генерация тепла, но возрастает и вынос тепла из скопления проходящим воздухом. Согласно проведенным расчетам существует оптимальный поток фильтрующегося воздуха, обеспечивающий

максимальную скорость самовозгорания. С увеличением химической активности угля возрастает и оптимальная скорость фильтрации воздуха через скопление. Отклонение скорости фильтрации воздуха через угольное скопление от оптимального значения в большую или меньшую сторону тормозит развитие процесса самовозгорания угля.

Учитывая сложность процесса самовозгорания, многие исследователи отмечают его зависимость и от многих других параметров. Так, зафиксирована зависимость частоты возникновения эндогенных пожаров от марки угля, свойств пород кровли. Вероятность возникновения самовозгорания определяется наличием пожаров в пограничных полях, зольностью угля, содержанием серы в угле и т.д. Результаты лабораторных исследований и шахтовых наблюдений за влиянием некоторых из этих факторов приведены в работах [9–16].

Противоречивы мнения об изменении эндогенной пожароопасности угольных шахт с увеличением глубины горных работ. Так, в работах [64,65] делается вывод о росте вероятности возникновения эндогенных пожаров по мере перехода на более глубокие горизонты из-за увеличения скорости окисления угля, обусловленной ростом температуры горных пород. Между тем с ростом глубины работ возрастает газоносность пласта, что может привести к снижению концентрации кислорода в атмосфере выработанного пространства. Поэтому из-за недостатка окислителя может уменьшиться вероятность возникновения эндогенных пожаров в шахтах [66]. Высказана также гипотеза о влиянии горного давления, возрастающего с углублением горных работ, на вероятность возникновения очагов эндогенных пожаров в выработанном пространстве. Предполагается, что при росте горного давления повышается температура угля и пород, ускоряющая процессы окисления угля [67].

Существенно влияют на эндогенную пожароопасность шахт такие горно-геологические параметры отрабатываемых угольных пластов, как мощность и угол падения пласта, наличие геологических нарушений и пропластков угля и пр. [6,11,28,68]. От значения этих параметров зависит количество теряемого в выработанном пространстве угля, величина утечек воздуха, поступающих к

теряемым скоплениям окисляющегося материала, а также длительность контакта этого угля с воздухом.

Проведенными исследованиями установлено, что с ростом мощности угольного пласта увеличиваются концентрированные потери угля в выработанном пространстве, снижается эффективность изоляции выработанного пространства, что приводит к повышению эндогенной пожароопасности. Рост угла падения угольного пласта увеличивает вероятность развития процесса самовозгорания из-за низких темпов угледобычи, образования концентрированных скоплений угля, сложности изоляции выработанного пространства.

Одним из важнейших факторов, влияющих на эндогенную пожароопасность шахт, является наличие геологических нарушений угольного пласта и их виды. В местах нарушения пласта замедляются темпы угледобычи, что увеличивает длительность контакта угля с воздухом, образуются скопления угля, теряемые в выработанном пространстве. Ситуация усугубляется повышенной химической активностью угля, возникшей из-за трения сдвигавшихся горных пород [11,12].

Вероятность возникновения самовозгораний возрастает при отработке сближенных пластов из-за образования аэродинамической связи между выработанными пространствами, что затрудняет проведение изоляционных работ и увеличивает приток воздуха теряемому углю. Оказывают влияние на эндогенную пожароопасность угольных шахт и свойства вмещающих пород. Так, при обрушении крепких горных пород в выработанном пространстве создаются условия для прососа воздуха к скоплениям угля [61], что увеличивает вероятность развития самовозгорания. Слабо структурированные вмещающие породы быстро уплотняются, способствуя изоляции теряемого угля от притока свежего воздуха. Наличие угольных пропластков в породе, особенно в кровле пласта, приводит к росту потерь угля в выработанном пространстве и увеличению вероятности его самовозгорания.

Значительное влияние на эндогенную пожароопасность шахт оказывают горнотехнические факторы отработки угольного месторождения [12,70]. Так,

одной из наиболее пожароопасных систем разработки является щитовая, которая характеризуется большим количеством потерянного угля, трудностью изоляции отработанных пластов [12]. Однако некоторые авторы считают, что количество теряемого в выработанном пространстве угля не всегда является определяющим фактором высокой пожароопасности какой-либо системы разработки, т.к. самовозгорание может развиваться и в небольших объемах угля [71,72].

Количество подводимо к углю воздуха и продолжительность его притока зависят от схемы и способа проветривания горных выработок, аэродинамического сопротивления выработанных пространств и скорости отработки шахтных и выемочных полей [12]. Например, применение способов вскрытия и подготовки выемочных полей, способствующих длительному воздействию кислорода воздуха на разрыхленный уголь в процессе отработки пласта, приводит к увеличению вероятности возникновения процессов самовозгорания.

Важным фактором добычи угля, влияющим на эндогенную пожароопасность, является скорость подвигания очистного забоя, определяющая время нахождения угля в выработанном пространстве в зоне поступления свежего воздуха. При благоприятных условиях скорость подвигания очистного забоя позволяет отработать запасы угля в срок, не превышающий длительность инкубационного периода процесса самовозгорания угля, и эндогенный пожар не возникает. Величина минимальной пожаробезопасной скорости подвигания очистного забоя может существенно изменяться и зависит от свойств угля и горно-геологических условий залегания пласта. Например, для пологих угольных пластов пожаробезопасная скорость отработки составляет 50–60 м/мес., для крутых пластов – 40 м/мес. [70,73]. Однако в приведенных исследованиях не учитывается такой фактор, как зависимость длительности инкубационного периода от химической активности угля по отношению к кислороду. Поэтому с ростом активности угля должны возрастать и пожаробезопасные скорости подвигания очистного забоя.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. Эндогенная пожароопасность угольных шахт зависит от большого количества факторов. Частью таких факторов, например горнотехническими параметрами отработки месторождения угля, можно управлять, что позволяет снизить вероятность возникновения эндогенных пожаров в шахтах.

2. Влияние некоторых факторов на процесс самовозгорания недостаточно изучено, что затрудняет выбор способов предотвращения развития эндогенных пожаров в шахтах. Причиной такого положения могут быть изменение свойств угля в широких пределах и применение различных методик исследования.

3. Для снижения негативного влияния процессов самовозгорания угля на угольную промышленность Кузбасса необходима дальнейшая разработка способов обнаружения, профилактики и быстрого тушения эндогенных пожаров.

### **1.3. Способы подавления процессов самовозгорания угля в шахтах**

Подавление процессов самовозгорания угля в шахтах, большинство которых возникает в выработанном пространстве, может осуществляться по следующим направлениям:

- снижением количества подаваемого в выработанное пространство воздуха, что уменьшает величину выделяемого тепла;
- снижением концентрации кислорода в атмосфере выработанного пространства до безопасного уровня;
- уменьшением химической активности угля, что сокращает выделение тепла;
- увеличением потерь тепла из окисляющегося угля в окружающее пространство за счет подачи хладагента, повышения теплопроводности и теплоемкости окружающей скопление угля среды.

Учитывая недоступность для непосредственного воздействия большинства очагов самовозгорания, возникающих в выработанном пространстве, одним из наиболее распространенных способов борьбы с эндогенными пожарами в шахтах является изоляция участков [6-12]. Изоляция, осуществляемая в основном за счет возведения в горных выработках перемычек, прекращает или резко снижает коли-

чество поступающего к очагу воздуха. В результате уменьшается выделение тепла, токсичных продуктов окисления, и температура очага начинает снижаться. Однако качество изоляции перемычек постепенно падает, поэтому требуется их периодический ремонт и применение новых материалов [74,75].

О низкой эффективности тушения подземных пожаров возведением изолирующих сооружений свидетельствуют проведенные расчеты и практические наблюдения в шахтах, которые показали, что даже при полной изоляции остывание очагов пожаров в выработанном пространстве происходит очень медленно из-за теплоизоляционных свойств угля [76].

Длительное время для борьбы с подземными пожарами на шахтах Кузбасса применяется метод заиливания выработанного пространства отработанных участков [77-80]. Пульпа представляет собой водную суспензию из тонкодисперсного твердого материала (глины или суглинки). Объем глины в целике, подаваемой в выработанное пространство для профилактических целей, должен составлять 3-5 % от объема вынимаемого угля [33]. Для заиловочных работ используют глинистую пульпу объемной консистенции 1:8-1:10 летом 1:20 и выше зимой [78]. Однако о роли пульпы при борьбе с подземными пожарами существуют различные мнения.

Положительным действием глинистой пульпы является существенное снижение температуры обработанного разогретого угольного скопления из-за поглощения тепла на нагрев и испарение воды. Глинистая пульпа также тормозит реакцию окисления угля кислородом воздуха, образуя на его поверхности защитные предохранительные пленки, препятствующие проникновению кислорода воздуха к активным центрам. Жидкая составляющая пульпы увлажняет уголь, что увеличивает его теплопроводность и удельную теплоемкость, снижая скорость его разогрева в результате окисления после обработки.

Существенными недостатками способа заиливания являются высокая трудоемкость и необходимость подачи глинистой пульпы в больших объемах, что может приводить к образованию скоплений пульпы в выработанном пространстве с опасностью прорыва ее в действующие выработки. Кроме того, при подаче гли-

нистой пульпы может происходить эжекция воздуха в подаваемый состав. Так, экспериментами установлено, что с 1 м<sup>3</sup> суспензии подается до 3 м<sup>3</sup> воздуха, или до 50 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> глины в целике [81]. Недостатком глинистой пульпы является и ее большая плотность. Поэтому при подаче в выработанное пространство пульпа стекает по почве пласта и не обрабатывает весь объем обрушенной массы угля. В результате разогретый уголь в очаге зачастую не охлаждается, несмотря на подачу пульпы, а эжектируемый пульпой воздух окисляет уголь и способствует дальнейшему росту температуры.

Повысить эффективность изоляции очагов самовозгорания угля от притока свежего воздуха позволяет применение гелеобразующих составов. Гелеобразующий состав, основой которого чаще всего являются растворы жидкого стекла и хлористого аммония, является коллоидной системой, которая через определенное время загустевает. Из-за постепенного увеличения вязкости гелеобразующий состав удерживается в порах и трещинах обрушенных породах, не вытекая в горные выработки, что существенно снижает утечки воздуха через обработанные скопления угля и пород [82-96]. В гелеобразующий состав входят антипирогены, поэтому обработка угольных скоплений гелем позволяет снизить сорбционную активность угля по отношению к кислороду на 80 % [82]. Для получения геля и подачи его в выработанное пространство шахт разработано специальное оборудование [86]. Одним из преимуществ гелеобразующего состава является протекание эндотермической реакции при перемешивании исходных компонентов. Поэтому, из-за поглощения тепла, происходит снижение температуры образующегося геля и обрабатываемых им скоплений угля [83, 92, 96].

Существенным недостатком геля является его многокомпонентность, что осложняет получение состава. Кроме того, гелеобразующий состав быстро загустевает и, в случае нарушения технологической дисциплины или возникновения аварийных ситуаций, может вывести из строя оборудование и трубопроводы, по которым состав подается в выработанное пространство. Проблемой остается и сложность управления временем перехода жидкого состава в гель в выработанном пространстве, что может приводить к его стеканию по почве пласта.

Дальнейшим совершенствованием применения гелеобразующих составов для борьбы с очагами самовозгорания является предварительное вспенивание состава, что позволяет получить пеногели. Для вспенивания гелеобразующих составов необходимо снизить их поверхностное натяжение, что достигается добавлением пенообразователя. Разработанные схемы подачи гелеобразующих составов, оборудование для их получения, технологии приготовления и теоретические основы их применения для профилактики, локализации и подавления процессов самовозгорания угля в шахтах приведены в работах [84-96]. Однако из-за сложности получения, транспортирования и применения гелеобразующих составов, в настоящее время эти составы практически не применяются для борьбы с самовозгоранием угля на шахтах.

Добавка пенообразователей в количестве 1-5 % позволяет вспенивать подаваемые в шахту воду или глинистую пульпу, что значительно повышает эффективность борьбы с подземными пожарами. Благодаря большой вязкости и незначительной плотности пена накапливается в пористой структуре скопления угля и пород и производит объемную обработку выработанного пространства. Результаты исследования физических свойств пены, ее воздействия на уголь и обрабатываемое скопление приведены в работах [28, 34,35,97-103]. Лабораторные и шахтные исследования показали, что водовоздушная пена, поданная в скопление угля, делает его практически воздухонепроницаемым. Данное свойство позволило использовать пену для локализации очагов самовозгорания в выработанном пространстве действующих очистных забоев и отрабатывать подготовленные к выемке запасы угля с изолированным очагом.

Исследование сорбционной активности показало, что уголь, обработанный водо-воздушной пеной, поглощает в 2-3 раза меньше кислорода. Данный факт объясняется образованием на поверхности угля равномерной пленки пенообразующего раствора вследствие присутствия в жидкости поверхностно-активных веществ. Пенообразующая жидкость также позволяет существенно увеличить влажность обработанного скопления угля из-за лучшего проникновения в поры и тре-

щины. Выявленные свойства пены позволили использовать пенную обработку скоплений угля в выработанном пространстве для профилактики самовозгорания.

Применение водо-воздушной пены в практике борьбы с эндогенными пожарами показало, что ее существенным недостатком является быстрый распад, что приводило к восстановлению утечек воздуха к очагу самовозгорания и выносу токсичных газов в действующие горные выработки. Поэтому для усовершенствования пенного способа борьбы с подземными пожарами начали применять стабилизаторы. Наиболее простым и доступным средством являлась глина, поэтому на шахтах стали вспенивать глинистую пульпу.

Недостатком водовоздушных пен и вспененных суспензий являлось присутствие в составе в качестве газовой фазы воздуха. После подачи в выработанное пространство такой пены происходит ее распад, а выделяющийся воздух может попасть в очаг самовозгорания, стимулируя горение. Для устранения этого недостатка было предложено использовать в качестве газовой фазы инертные газы. Наибольшее распространение получили пены с использованием азота. На практике для вспенивания применяли азот в газообразном состоянии или в виде криогенной жидкости. Однако подача жидкого азота, имеющего температуру  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ , требует точной дозировки из-за возможности замерзания воды. Пена, газовой фазой которой являлся азот, при подаче в выработанное пространство дополнительно инерттизировала его атмосферу, что предотвращало дальнейшее развитие процесса самовозгорания и возможность взрыва горючих газов.

Однако недостатки пенного способа ограничивают применение пены для борьбы с самовозгоранием. Основным недостатком пены является ее быстрый распад, что ограничивает объем ее распространения в выработанном пространстве. Так, расчет некоторых параметров пенного способа борьбы с самовозгоранием [98], показал, что радиус распространения пены в выработанном пространстве составляет несколько метров. При выходе в горные выработки пена способна нарушить вентиляцию. Тушение очагов самовозгорания в выработанном пространстве пеной малоэффективно из-за ее низкой плотности и незначительной скорости распространения в скоплениях угля и горных пород.

Широко на шахтах Кузбасса для борьбы с самовозгоранием угля применяются антипирогены, снижающие химическую активность угля по отношению к кислороду после его обработки. Наибольшее распространение в настоящее время на угольных шахтах в качестве антипирогенов получили хлористый аммоний, хлористый кальций, гашеная известь, карбамид и другие нетоксичные вещества. Антипирогены применяются преимущественно в виде водных растворов для профилактической обработки выработанного пространства, целиков угля и концентрированных потерь. При отработке мощных пластов в зонах геологических нарушений рекомендуется пропитывать водными растворами антипирогенов краевые части целиков [58].

Особенно широкое распространение в шахтах Кузбасса в последние годы получил способ профилактики эндогенных пожаров путем обработки разрыхленных потерь угля водными растворами антипирогенов в виде тонкодисперсных аэрозольных частиц, подаваемых в выработанное пространство в потоке утечек воздуха [35,104,105]. Схема реализуется с помощью оборудования для приготовления и подачи водного раствора антипирогена, размещаемого на вентиляционном штреке, и генератора аэрозолей, устанавливаемого в тупике конвейерного штрека. Разработанная технология позволяет проводить обработку выработанного пространства без остановки добычных работ в лаве, что очень важно с экономической точки зрения. Производительность генерации аэрозолей антипирогенов с помощью туманообразователей или пылеподавителей достигает 20–30 л/мин.

Существенным недостатком применения способа подачи жидкого аэрозоля является малая дальность транспортирования частиц антипирогена в выработанном пространстве. Так, по данным [58], зона эффективной обработки обрушенной массы угля и пород не превышает 10–15 м от линии очистного забоя, поэтому скопления угля, образующиеся за пределами этой зоны, оказываются не подвергнутыми воздействию антипирогена. Поэтому данный способ непригоден для подавления уже возникших в выработанном пространстве очагов самовозгорания.

Известна практика применения антипирогенов для профилактики самовозгорания угля и в виде порошков [34,35,106]. В качестве антипирогена в шахтах

используются хлористый кальций, хлористый аммоний, карбамид, диаммоний фосфат и др. Широко применяются порошковые антипирогены в шахтах, разрабатывающих крутые мощные пласты самовозгорающегося угля щитовой системой разработки. Обработке подвергается междугоризонтный целик, обрушаемый над щитовым перекрытием. Подача антипирогена производится в пробуренные скважины с помощью пневмозарядчика ВАХШ-7ДМ.

Для обработки выработанного пространства предложено использовать и летучую золу, подаваемую в потоке сжатого инертного газа [34,66]. Проведенные эксперименты показали, что после обработки летучей золой снижается химическая активность угля. Летучую золу можно использовать для локализации и тушения пожаров в выработанном пространстве благодаря способности золы заполнять пустоты угольных скоплений. Зола транспортируется к скважине автоцементовозом ТЦ-11 от ТЭС.

Эффективным способом воздействия на процесс самовозгорания является снижение концентрации кислорода в атмосфере выработанного пространства путем подачи газов, не поддерживающих горение [107]. Преимуществом инертного газа перед остальными жидкими и твердыми составами является объемное воздействие на скопления угля, практически не ограниченная область распространения в выработанном пространстве и возможность воздействия на процесс самовозгорания на любой стадии развития. В практике борьбы с эндогенными пожарами использовались продукты сгорания, углекислый газ, азот [108-122].

Одними из первых инертных газов для борьбы с подземными пожарами на шахтах начали использоваться продукты сгорания. Наибольшее распространение получили генераторы инертных газов типа ГИГ [108-110]. Для выработки инертной газовой смеси применялись воздушно-реактивные авиационные двигатели, дополненные модулями для дожигания смеси и охлаждения продуктов горения путем подачи в исходящие газы воды. Выполненная из отдельных секций, установка транспортировалась в шахту, где собиралась для подачи инертного состава. Распыление воды не только снижало температуру продуктов сгорания, но и увеличивало их объем за счет образования пара.

Так, генератор ГИГ-1 укомплектован шахтным вентилятором, подающим воздух в камеру сгорания, состоящую из трех секций. Образующиеся продукты сгорания поступали в камеру охлаждения, где их температура снижалась распыляемой водой. Производительность генератора доходила до 350 м<sup>3</sup>/мин, содержание кислорода в смеси составляло около 3 %. Температура парогазовой смеси достигала на выходе 250 °С. Длина установки равнялась 13,4 м. Более совершенной является генератор инертных газов ГИГ-4, использующий газотурбинный авиационный двигатель АИ-8П. Производительность установки составляет 340 м<sup>3</sup>/мин, температура парогазовой смеси на выходе снижена до 80-90 °С. Концентрация кислорода в смеси уменьшена до 1,0 %. Содержание углекислого газа 7,0 %, оксида углерода не более 0,2 %. Длина установки 6,5 м, масса 910 кг.

Недостатком этих установок, используемым для получения продуктов сгорания непосредственно в шахтных условиях, является громоздкость, трудность спуска в шахту, а также высокая температура получаемого газа. Ограничивало применение установок ГИГ и образование большого количества оксида и диоксида углерода, представляющих опасность для людей, сложность работы и обслуживания, необходимость доставки в шахту большого количества керосина (расход топлива 850 кг/ч), небольшого напора, невзрывобезопасность и т.д. Поэтому установки ГИГ в основном используются для предотвращения взрывов горючего газа при развившихся подземных пожарах и тушения экзогенных пожаров в горных выработках.

Наибольшее распространение для борьбы с подземными эндогенными пожарами получил азот, подаваемый в основном в газообразном состоянии, хотя были попытки нагнетать в выработанное пространство и сжиженном виде [120–122]. Преимуществом азота является возможность его получения из воздуха, плотность, близкая к плотности воздуха. В ряде случаев шахты получают азот в сжиженном состоянии, и для его газификации применяются теплообменники, в которых для испарения и нагрева азота используется атмосферный воздух или го-

рячая вода. Однако при хранении и транспортировке сжиженного азота происходят большие потери газа из-за теплообмена с окружающей средой.

Для получения азота в последние годы все чаще используются разделительные установки, где применяются молекулярные сита [121–122]. Преимуществом таких установок является возможность получения азота непосредственно у места подачи, т.е. отпадает необходимость хранить азот в жидком состоянии и затем газифицировать его при подаче. Однако производительность существующих разделительных установок на основе молекулярных сит пока небольшая, что снижает эффективность их использования для борьбы с подземными пожарами.

Интенсивность теплосъема от разогретого угля можно существенно повысить, если в выработанное пространство подавать жидкий азот. Однако попытки нагнетания жидкого азота в очаги самовозгорания в ряде случаев вызвали резкий всплеск давления образующегося газа, что привело к повреждению скважины и подающего оборудования.

Интересным является предложение подавать инертный газ в выработанное пространство в импульсном режиме [34]. Во время выброса азота в пористой структуре возникает область избыточного давления газа, которая препятствует притоку свежего воздуха к теряемым в выработанном пространстве скоплениям угля. После прекращения подачи азота избыточное давление газа начинает снижаться, предотвращая некоторое время поступление воздуха в выработанное пространство. В момент снижения давления азота до естественного в выработанном пространстве значения, происходит следующий импульс в подаче инертного газа.

Предложено также использовать для борьбы с эндогенными пожарами, возникающими в выработанном пространстве шахт, емкости, заполненные инертным газом под большим давлением [123]. Емкости закладывают в выработанное пространство в места наиболее вероятного возникновения самовозгорания. При повышении температуры угля давление газа в емкости возрастает, происходит разрыв ее корпуса. При расширении исходящего газа его температура падает и охлаждает уголь. Одновременно в скоплении угля образуется инертная среда и прекращается процесс окисления и выделения тепла. Ударная волна, образующаяся

при разрыве емкости, уплотняет скопления угля и пород, снижая их воздухопроницаемость. В результате фильтрация воздуха замедляется, и инертный газ длительное время сохраняется в выработанном пространстве.

Основным препятствием для повышения производительности установок для получения инертного газа из жидкого азота является небольшая мощность газификатора, обусловленная низкой интенсивностью теплообмена между жидким азотом и теплоносителем через разделяющую их твердую стенку. В качестве теплоносителя обычно используют воду, подогреваемую тепловыделяющими элементами.

Существуют также газификаторы, в которых испарение жидкого азота происходит за счет теплообмена с атмосферным воздухом. Однако из-за малой теплоемкости воздуха и небольшого коэффициента теплообмена между газовой средой и поверхностью теплообменного устройства, размеры, масса и стоимость таких газификаторов достигают значений, делающих невозможным или нерентабельным их применение в практике борьбы с подземными пожарами. Сказываются на работе таких газификаторов и колебания температуры окружающего воздуха.

Применяемому способу газификации жидкого азота путем теплообмена с теплоносителем через разделительную стенку присущ еще один существенный недостаток. Так, образующийся газообразный азот является абсолютно сухим, что резко снижает его хладагентное действие. Кроме того, подача сухого газа в выработанное пространство приводит к высушиванию скоплений угля, что может вызвать увеличение его химической активности по отношению к кислороду с последующей интенсификацией процесса окисления, и развитию самовозгорания после вымывания азота. Аналогичным недостатком обладает и газообразный азот, получаемый с помощью молекулярных сит.

Реальным путем преодоления недостатков существующего способа газификации жидкого азота является создание условий для прямого соприкосновения участвующих в теплообмене компонентов. Совместное распыление жидкого азота, пара или воды приводит к образованию огромных площадей прямого контакта

между теплоносителем и жидким азотом. В результате резко увеличивается производительность устройства по газообразному азоту, уменьшается его масса и размеры.

Прямой контакт частиц жидкого азота с частицами воды или водяного пара приведет к образованию парогазовой смеси, содержащей газообразный азот, пар и частицы жидкости. В зависимости от соотношения исходных компонентов, в значительном диапазоне может меняться температура образуемой смеси. Так, частицы распыляемой воды или пар могут при охлаждении переходить в твердое состояние (частицы льда). Образуемый состав из инертного газа и частиц льда способен отнимать от скоплений разогретого угля значительное количество тепла, идущего на таяние льда, нагрев и последующее испарение жидкой фазы. Благодаря присутствию частиц жидкости и пара будет происходить дополнительное увлажнение обрабатываемого угля, что замедлит процесс генерации тепла и увеличит количество теряемого тепла. Результатом будет замедление или предотвращение процесса самовозгорания угля. Наличие частиц жидкости интенсифицирует также теплосъем с разогретого угля.

Исходя из изложенного, возникает необходимость исследовать свойства парогазовых составов, получаемых при перемешивании жидкого азота, пара, воды и их воздействие на уголь в естественном состоянии и на различных стадиях самовозгорания. Полученные данные позволят разработать высокопроизводительное оборудование для газификации жидкого азота путем непосредственного перемешивания жидкого азота с водой или водяным паром, а также технологические схемы применения парогазовых составов для борьбы с эндогенными пожарами.

Таким образом, проведенный литературный анализ показал, что применяемые способы борьбы с пожарами недостаточно эффективны для тушения очагов самовозгорания в шахтах из-за незначительного теплосъема с разогретого угля или ограниченного распространения хладагента в выработанном пространстве. Поэтому необходима разработка способов, использующих состав, способный резко повысить теплосъем с очага, и способный распространяться в выработанном пространстве на большие расстояния. Перспективным является использование со-

ставов на основе инертного газа азота, содержащего частицы, способные поглощать большое количество тепла, затрачиваемого на фазовые переходы, происходящие при постоянной температуре.

## **Выводы**

1. Среди регистрируемых на угольных шахтах Кузбасса подземных пожаров основную долю составляют эндогенные пожары. Большая часть экономического ущерба, причиняемого угольным шахтам всеми видами аварий, также приходится на эндогенные пожары. Для снижения экономических потерь, обусловленных эндогенными пожарами, необходимо применять способы быстрой ликвидации очагов самовозгорания.

2. Эндогенная пожароопасность угольных шахт зависит от большого количества факторов. Влияние некоторых факторов на процесс самовозгорания недостаточно изучено, что затрудняет выбор способов предотвращения развития эндогенных пожаров в шахтах. Причиной такого положения могут быть изменение свойств угля в широких пределах и применение различных методик исследования.

3. Применяемые способы борьбы с подземными пожарами недостаточно эффективны из-за незначительного теплосъема с разогретого угля или ограниченного распространения хладагента в выработанном пространстве. Поэтому необходима разработка способов, использующих состав, способный резко повысить теплосъем с очага, и способный распространяться в выработанном пространстве на большие расстояния. Перспективным является использование составов на основе инертного газа азота, содержащего частицы, способные поглощать большое количество тепла, затрачиваемого на фазовые переходы, происходящие при постоянной температуре.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ИНЕРТИЗИРУЮЩЕГО СОСТАВА

Учитывая способность газообразного азота легко транспортироваться через скопление угля и вмещающих пород, целесообразно его использовать в качестве несущего средства для частиц, способных поглотить большое количество тепла. Значительное количество тепла потребляют фазовые переходы вещества из твердого состояния в жидкое или из жидкого в газообразное. Поэтому для эффективного охлаждения очагов самовозгорания угля следует использовать вещества, испытывающие переходы из одного состояния в другое.

Наиболее эффективно применять частицы из замороженной воды. При их подаче в разогретый уголь будет поглощение тепла для нагрева льда, перехода его в жидкое состояние, а затем на нагрев воды. В случае высокой температуры очага большое количество тепла будет отнимать процесс перехода жидкости в парообразное состояние. Поэтому использование инертизирующего состава, состоящего из инертного газа и взвешенных частиц замороженной воды, позволит значительно интенсифицировать теплосъем с очага и сократить время тушения.

### 2.1. Исследование влияния соотношения исходных компонентов на температуру инертизирующего состава

Наиболее экономичным путем получения инертизирующего состава для борьбы с самовозгоранием угля является перемешивание распыленных частиц жидкого азота и воды. В процессе теплообмена между частицами температура воды будет снижаться, а тепло, отданное жидкому газу, будет использоваться для фазового перехода и получения газообразного азота. Отдающие тепло частицы воды начинают охлаждаться, превращаясь в кристаллики льда. В случае, если температура образующейся смеси будет равна температуре газа на линии насыщения ( $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  или  $77\text{ K}$ ), количество тепла, полученное жидким азотом, можно определить по уравнению

$$Q_a = G_a r_a, \quad (2.1)$$

где  $Q_a$  – количество тепла, получаемое азотом, кДж/с;  $G_a$  – расход азота, кг/с;  $r_a$  – удельная теплота испарения жидкого азота, кДж/кг.

Тепло, теряемое водой на газификацию азота равно

$$Q_w = Q_{wo} + Q_{wL} + Q_L, \quad (2.2)$$

где  $Q_w$  – тепло, отдаваемое водой жидкому азоту при перемешивании, кДж/с;  $Q_{wo}$  – тепло, отдаваемое водой при охлаждении от начальной температуры, до температуры кристаллизации, кДж/с;  $Q_{wL}$  – тепло, отдаваемое водой при замерзании, кДж/с;  $Q_L$  – тепло, отдаваемое льдом при охлаждении, кДж/с.

Тепло, теряемое водой при охлаждении от начальной температуры до начала кристаллизации, равно

$$Q_{wo} = G_w c_w (t_0 - t_L), \quad (2.3)$$

где  $G_w$  – расход воды, кг/с;  $c_w$  – удельная теплоемкость подаваемой воды, кДж/(кг·К);  $t_0$  – начальная температура воды, °С;  $t_L$  – температура замерзания воды, °С.

Тепло, теряемое при замерзании воды, находим из уравнения

$$Q_{wL} = G_w r_L, \quad (2.4)$$

где  $r_L$  – удельная теплота замерзания воды, кДж/кг.

Тепло, теряемое при охлаждении льда от температуры замерзания до температуры смеси, равно

$$Q_L = G_w c_L (t_L - t_c), \quad (2.5)$$

где  $c_L$  – удельная теплоемкость льда, кДж/(кг·К);  $t_c$  – температура образуемой смеси из азота и воды, °С.

Учитывая, что тепло, теряемое водой при контакте с жидким азотом, равно количеству тепла, получаемому жидким азотом при испарении, приравняем уравнения (2.1) и (2.2). Подставляя в полученное равенство формулы (2.3) – (2.5), получаем следующее выражение для расчета соотношения расхода жидкого азота

к воде, необходимого для получения инертизирующего состава с заданной температурой

$$\frac{G_a}{G_w} = \frac{c_w(t_o - t_L) + r_L + c_L(t_L - t_c)}{r_a}, \quad (2.6)$$

На рис. 2.1 приведено рассчитанное по формуле (2.6) изменение соотношения расхода жидкого азота и воды для получения инертизирующего состава, имеющего температуру  $-196^\circ\text{C}$ , в зависимости от величины начальной температуры воды. В расчетах принято, что удельная теплота испарения жидкого азота равна  $197,5$  кДж/кг, удельная теплоемкость воды  $4,2$  кДж/(кг·К), удельная теплоемкость льда равна  $2,09$  кДж/(кг·К), удельная теплота замерзания воды равна  $324$  кДж/кг,

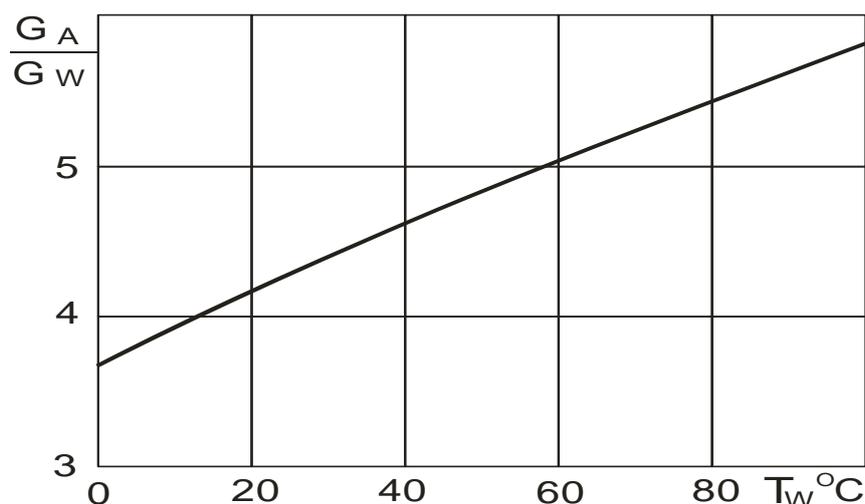


Рис. 2.1. Влияние начальной температуры воды ( $T_w$ ) на соотношение расхода жидкого азота ( $G_A$ ) и воды ( $G_W$ ) для получения инертизирующего состава

В случае, если температура получаемого инертизирующего состава будет превышать температуру испарения жидкого азота, то необходимо учесть количество тепла, необходимое для нагрева газообразного азота до температуры смеси. Поэтому количество тепла, необходимое для испарения и подогрева азота, можно определить из выражения

$$Q_a = G_a r_a + G_a c_a (t_c - t_a), \quad (2.7)$$

Влияние начальной температуры воды на соотношение расходов жидкого азота и воды для получения инертизирующего состава с температурой  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , рассчитанное по формуле (2.8), приведено на рис. 2.2. На рис. 2.3 показано изменение расхода жидкого азота и воды для получения инертизирующего состава с температурой  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  в зависимости от температуры исходной воды.

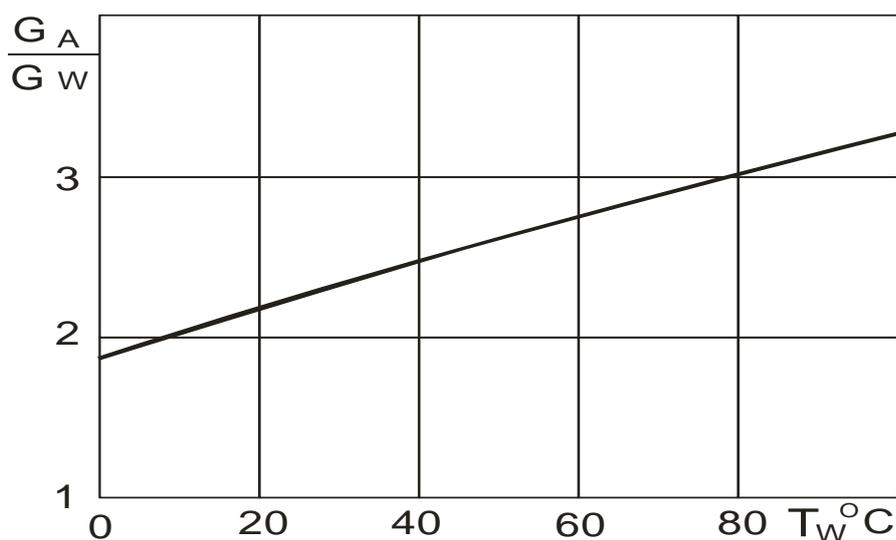


Рис. 2.2. Влияние начальной температуры воды ( $T_W$ ) на соотношение расходов жидкого азота ( $G_A$ ) и воды ( $G_W$ ) для получения инертизирующего состава с температурой  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Анализируя данные, приведенные на рис. 2.1, 2.2 и 2.3, можно сделать вывод, что с увеличением температуры воды, используемой для газификации жидкого азота, возрастает расход жидкого азота и, соответственно, увеличивается процентное содержание газообразного азота в инертизирующем составе. Рост температуры получаемого инертизирующего состава сопровождается снижением расхода газифицируемого жидкого азота и увеличением доли льда в смеси.

Важной теплофизической характеристикой воздуха является влагосодержание, равное массе пара, содержащегося в воздухе, на один кг сухого воздуха. При расчетах параметров получаемого состава необходимо учесть, что подаваемая вода или водяной пар для газификации жидкого азота может находиться в получаемом составе во всех агрегатных состояниях (в виде пара, жидких и твердых частиц). Поэтому используем следующее выражение для

определения общего количества влаги (в различных агрегатных состояниях) на 1 кг сухого азота

$$D = \frac{G_p}{G_a} \quad (2.9)$$

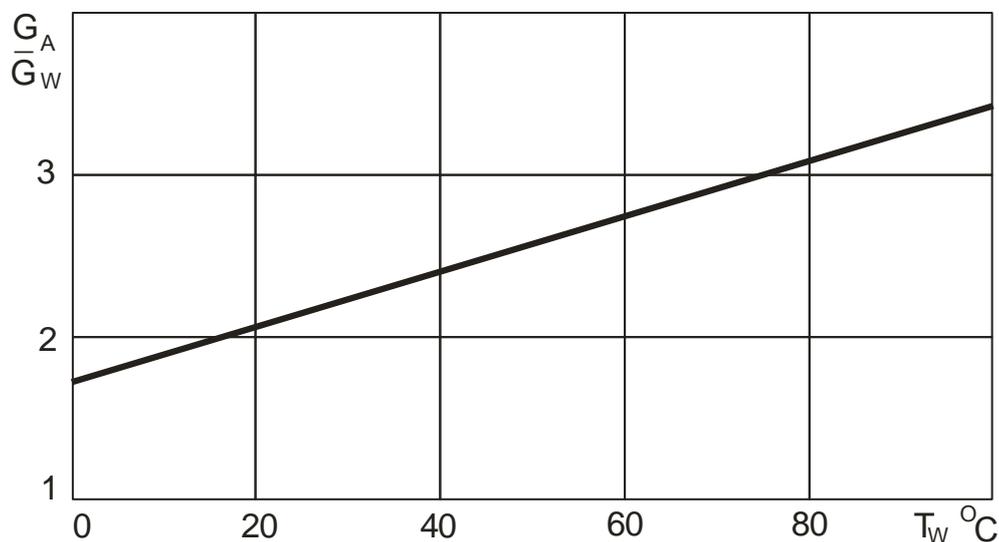


Рис. 2.3. Влияние начальной температуры воды ( $T_W$ ) на соотношение расходов жидкого азота ( $G_A$ ) и воды ( $G_W$ ) для получения состава с температурой  $-50$  °C

Влагосодержание получаемого инертного состава необходимо учитывать в случае прохождения его через скопление угля с очагом самовозгорания. В высокотемпературной области скопления вся жидкость, используемая для испарения жидкого азота, перейдет в состояние пара. Поэтому при расчете процессов тепло- и массообмена в разогретой области необходимым параметром будет влагосодержание поданного состава.

Влияние начальной температуры используемой воды на общее влагосодержание получаемого состава приведено на рис. 2.4 (температура получаемого инертизирующего состава равна  $-196$  °C) и рис. 2.5 (температура состава равна  $-100$  °C).

Из приведенных на рис. 2.4 и 2.5 результатов видно, что с ростом начальной температуры используемой воды уменьшается общее содержание влаги, находящейся в различных агрегатных состояниях в получаемом инертизирующем

составе. Аналогичный результат получается и при снижении температуры получаемого инертизирующего состава.

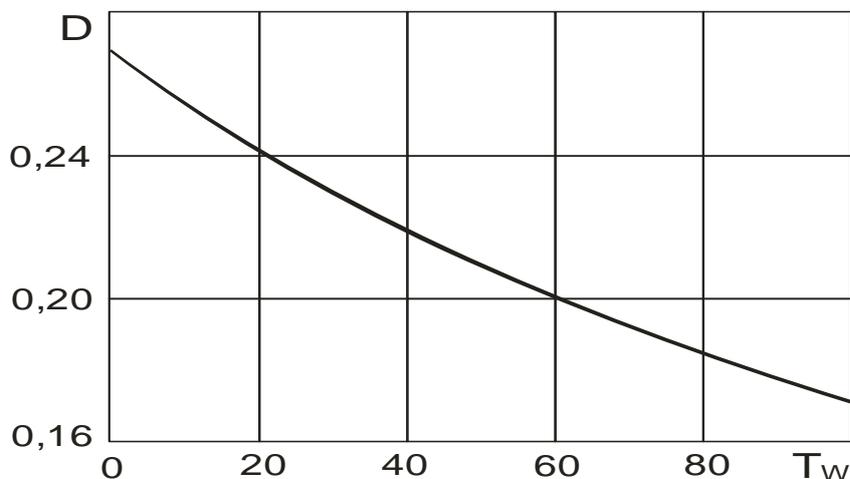


Рис. 2.4. Изменение влагосодержания ( $D$ ) инертизирующего состава с температурой  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  в зависимости от температуры воды ( $T_w$ )

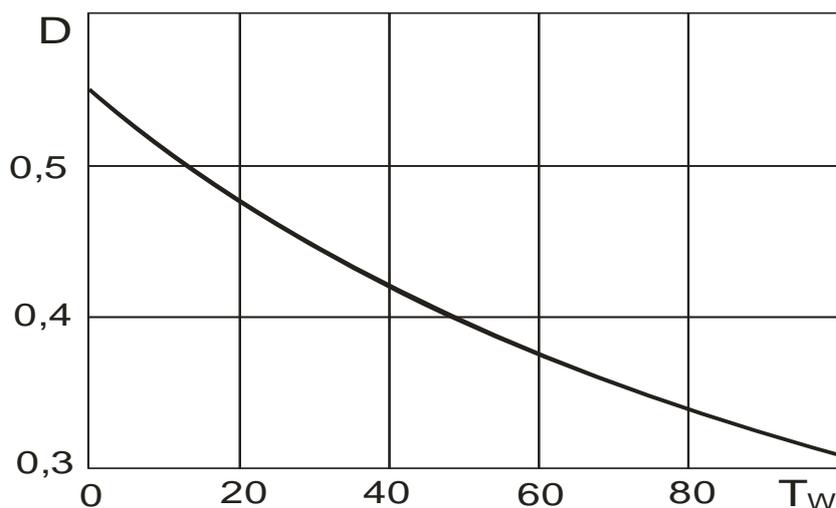


Рис.2.5. Изменение влагосодержания ( $D$ ) инертизирующего состава с температурой  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  в зависимости от температуры воды ( $T_w$ )

Более эффективным может быть получение инертизирующего состава в случае газификации жидкого азота водяным паром. Так, при охлаждении и конденсации пара выделяется значительное количество тепла, идущее на газификацию жидкого азота. Поэтому применение пара позволяет существенно сократить содержание жидкой фазы в образуемом составе, значительно расширить температурный диапазон образуемой смеси.

Распыление жидкого азота и пара в теплообменной камере приводит к интенсивному теплообмену между образующимися частицами при их соприкосновении. Передача тепла сопровождается фазовыми переходами. Так, жидкий азот испаряется, поглощая тепло, а пар частично конденсируется. Температура образующегося состава будет в основном определяться соотношением смешиваемых компонентов и их исходной температурой. Определить параметры получаемого продукта в зависимости от расхода перемешиваемых жидкого азота и пара при отсутствии тепловых потерь можно из уравнения теплового баланса

$$Q_p = Q_a, \quad (2.10)$$

где  $Q_p$  – количество тепла, отдаваемое паром на испарение и нагревание азота, кДж/с.

Количество тепла, отдаваемое паром, можно определить из выражения

$$Q_p = Q_{po} + Q_{pk} + Q_{wo} + Q_{wL} + Q_L, \quad (2.11)$$

где  $Q_{po}$  – количество тепла, теряемое паром при охлаждении до температуры конденсации, кДж/с;  $Q_{pk}$  – количество тепла, отдаваемое паром при конденсации, кДж/с;  $Q_{wo}$  – количество тепла, теряемое сконденсировавшейся жидкостью при охлаждении, кДж/с;  $Q_{wL}$  – количество тепла, отдаваемое жидкостью при замерзании, кДж/с;  $Q_L$  – количество тепла, отдаваемое кристаллами льда при охлаждении, кДж/с

Количество тепла, отдаваемое паром при охлаждении до начала конденсации, равно

$$Q_{po} = G_p c_p (t_p - t_{pk}), \quad (2.12)$$

где  $G_p$  – расход пара при образовании инертной смеси, кг/с;  $c_p$  – удельная теплоемкость пара, кДж/(кг·К);  $t_p$  – температура подаваемого пара, °С;  $t_{pk}$  – температура конденсации пара, °С.

Количество тепла, теряемого паром при конденсации, равно

$$Q_{pk} = G_p r_p, \quad (2.13)$$

где  $r_p$  – удельная теплота, выделяемая при конденсации пара, кДж/кг.

Подставляя полученные выражения для охлаждения и конденсации пара в формулу (2.10), а также используя ранее полученные уравнения (2.3–2.5), описывающие потерю тепла жидкостью, получаем следующее равенство, описывающее параметры инертизирующего состава в зависимости от соотношения расходов водяного пара и жидкого азота

$$\frac{G_a}{G_p} = \frac{r_p + r_{wL} + c_p(t_p - t_{pk}) + c_w(t_{pk} - t_L) + c_L(t_L - t_c)}{r_a + c_a(t_c - t_a)}. \quad (2.14)$$

Результаты расчета изменения температуры получаемого инертизирующего состава в зависимости от соотношения расходов жидкого азота и водяного пара, осуществленного по формуле (2.14), приведены на рис 2.6. Используемый в расчетах пар имел температуру 100 °С и находился на линии насыщения. На рис. 2.7 представлена зависимость между соотношением расхода жидкого азота и водяного пара и общим влагосодержанием получаемого инертизирующего состава.

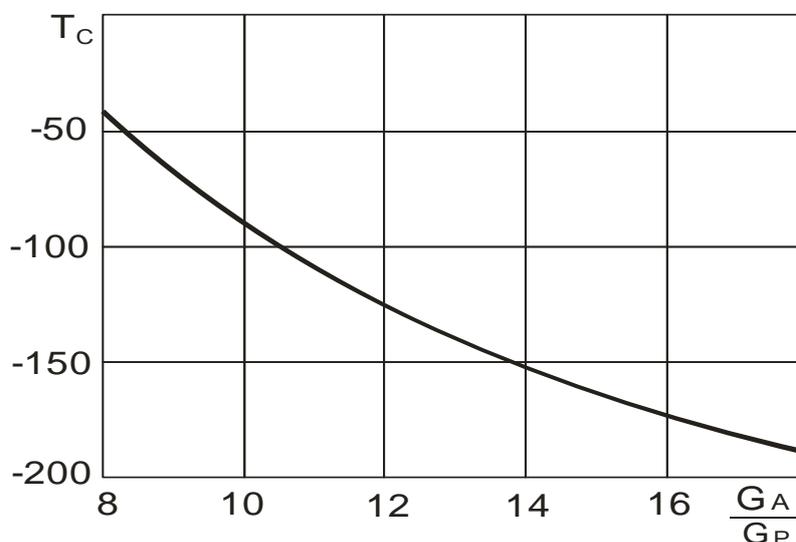


Рис. 2.6. Зависимость температуры получаемого инертизирующего состава ( $T_c$ ) от соотношения расхода жидкого азота ( $G_A$ ) и водяного пара ( $G_P$ )

Из приведенных данных видно, что применение пара вместо воды резко сокращает количество теплоносителя, необходимого для газификации жидкого азота. Существенно уменьшается общее содержание влаги в сухом азоте. Применение пара вместо воды позволяет значительно расширить температурные

пределы получаемого инертизирующего состава. Кроме того, из экспериментов следует, что использование водяного пара позволяет существенно уменьшить размеры образующихся частиц льда. Поэтому такой инертизирующий состав способен лучше проникать через скопления угля и пород.

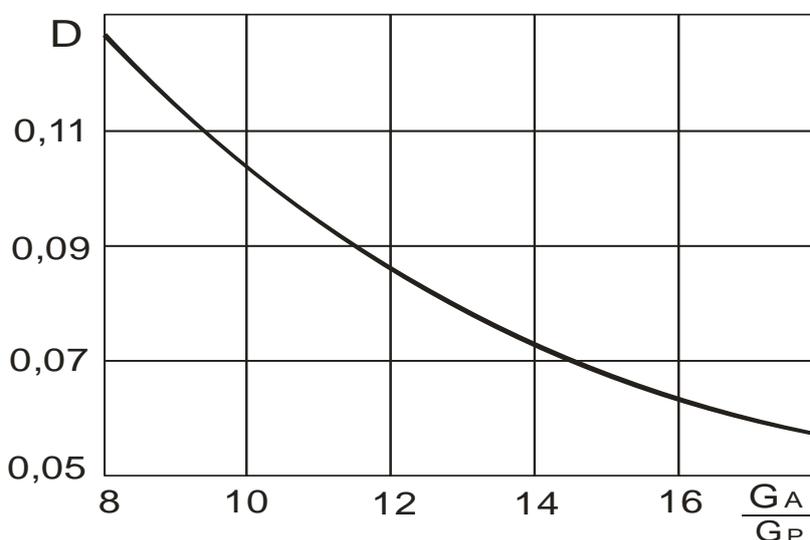


Рис. 2.7. Изменение влагосодержания инертизирующего состава (D) от соотношения расходов жидкого азота ( $G_A$ ) и пара ( $G_P$ )

## 2.2. Исследование теплофизических параметров инертизирующих составов

Движение низкотемпературного состава в нагретой пористой среде приведет к интенсивному теплообмену между контактирующими средами. Одним из важнейших параметров, характеризующих хладагентные свойства пожаротушающих составов, является их удельная теплоемкость. Данный параметр позволяет оценить количество тепла, отнимаемого хладагентом в случае движения его через разогретый уголь, при нагревании 1 кг инертного состава на 1 градус. Удельная теплоемкость состава подчиняется правилу аддитивности, поэтому, учитывая возможное различное агрегатное состояние жидкости в составе, его удельную теплоемкость можно подсчитать по выражению

$$c_c = c_a D_a + c_p D_p + c_w D_w + c_L D_L, \quad (2.15)$$

где  $D_a$  – доля газообразного азота в инертизирующем составе, доли ед.;  $D_p$  – доля пара в составе, доли ед.;  $D_w$  – доля воды в жидком состоянии, доли ед.;  $D_L$  – доля частиц льда в составе, доли ед.

В рассматриваемом случае получаемый состав имеет отрицательную температуру, поэтому он состоит в основном из газообразного азота и жидкости в виде частиц замороженной воды. Массовая доля воды в виде жидкости и пара имеет небольшое значение и в расчетах не учитывается. С учетом этих условий массовую долю замороженной жидкости в составе можно определить по зависимости

$$D_L = \frac{G_i}{G_i + G_a} = \frac{D}{1 + D}, \quad (2.16)$$

где  $G_i$  – расход воды или пара при получении инертизирующего состава, кг/с.

Массовую долю газообразного азота в инертизирующем составе можно рассчитать по уравнению

$$D_a = \frac{G_a}{G_i + G_a} = \frac{1}{1 + D}. \quad (2.17)$$

Используя полученные выражения (1.15–2.17), рассчитанные массовые доли частиц льда и газообразного азота в инертизирующем составе с температурой  $-196$  °С, а также удельная теплоемкость состава приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Параметры инертизирующего состава с температурой  $-196$  °С, полученного при перемешивании воды и жидкого азота

№	Температура воды ( $T_w$ ), °С	Отношение расхода азота к расходу воды при получении состава ( $G_A/G_W$ )	Масса поданной воды на 1 кг азота ( $D$ ), кг/кг	Массовая доля азота в составе ( $D_A$ )	Массовая доля частиц льда в составе ( $D_L$ )	Теплоемкость состава $C_c$ , кДж/(кг·К)
1	0	3,72	0,269	0,788	0,210	1,23
2	20	4,15	0,24	0,806	0,193	1,21
3	40	4,57	0,22	0,820	0,180	1,20
4	60	5,00	0,20	0,833	0,164	1,18
5	80	5,42	0,18	0,844	0,155	1,17
6	100	5,85	0,171	0,854	0,146	1,16

Удельная теплоемкость газообразного азота в расчетах принималась равной 1 кДж/(кг·К). Из приведенных данных видно, что удельная теплоемкость образуемого инертизирующего состава существенно больше теплоемкости сухого азота. С ростом доли воды при газификации жидкого азота, удельная теплоемкость состава повышается, что улучшает его хладагентное действие при подаче в очаг самовозгорания. Причем из расчетов следует, что по мере движения через скопление угля следует ожидать увеличения удельной теплоемкости инертизирующего состава. Причиной такого эффекта является постепенное таяние льда за счет теплообмена с углем. У образующейся жидкости удельная теплоемкость больше, чем у льда, поэтому теплоемкость смеси возрастает.

Для повышения температуры получаемого инертизирующего состава требуется увеличение расхода воды, необходимой для газификации жидкого азота. Параметры инертизирующего состава, имеющего температуру  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , приведены в табл. 2.2.

Анализируя приведенные данные, можно сделать вывод, что с ростом температуры получаемого инертизирующего состава, при неизменной температуре исходной воды, увеличивается расход воды, используемый для газификации жидкого азота, и возрастает удельная теплоемкость инертизирующего состава.

Таблица 2.2

Параметры инертизирующего состава с температурой  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , полученного при перемешивании воды и жидкого азота

№	Температура воды ( $T_w$ ), $^{\circ}\text{C}$	Отношение расхода азота к воде при получении состава ( $G_A/G_W$ )	Масса поданной воды на 1 кг азота (D), кг/кг	Массовая доля азота в составе ( $D_A$ )	Массовая доля частиц льда в составе ( $D_L$ )	Теплоемкость состава ( $C_C$ ), кДж/(кг·К)
1	0	1,820	0,549	0,645	0,355	1,39
2	20	2,105	0,475	0,678	0,322	1,35
3	40	2,398	0,418	0,705	0,295	1,32
4	60	2,680	0,373	0,728	0,272	1,30
5	80	2,960	0,337	0,748	0,252	1,28
6	100	3,250	0,307	0,765	0,235	1,26

В случае повышения температуры воды, используемой для газификации жидкого азота, снижается удельная теплоемкость получаемого инертизирующего состава. Одновременно наблюдается и уменьшение доли частиц льда в составе. Хладагентные свойства инертизирующего состава будут также уменьшаться при росте температуры распыляемой с жидким азотом воды.

Одним из вариантов получения инертизирующего состава является совместное распыление жидкого азота с водяным паром. В таблице 2.3 приведено содержание частиц льда, инертного газа в инертизирующем составе, полученном при перемешивании водяного пара с температурой 100 °С и жидкого азота. По мере охлаждения водяного пара все большее его количество будет переходить в жидкое состояние вокруг ядер конденсации. При температуре 0 °С сконденсированный пар будет переходить в твердое состояние и находиться в получаемом составе в виде частиц льда.

Таблица 2.3

Параметры инертизирующего состава, полученного при перемешивании пара и жидкого азота

№	Температура получаемого состава ( $T_c$ ), °С	Отношение расхода азота к расходу пара при получении состава ( $G_A/G_P$ )	Масса данного пара на 1 кг азота (D), кг/кг	Массовая доля азота в составе ( $D_A$ )	Массовая доля частиц льда в составе ( $D_L$ )	Теплоемкость состава ( $C_C$ ), кДж/(кг·К)
1	-196	17,28	0,058	0,945	0,055	1,060
2	-150	13,62	0,073	0,932	0,068	1,075
3	-100	10,94	0,091	0,916	0,084	1,092
4	-50	9,94	0,111	0,900	0,100	1,110
5	0	7,63	0,131	0,880	0,120	1,132

Из приведенных данных видно, что у инертизирующих составов, в которых при получении вода заменена на водяной пар, удельная теплоемкость снижается. Повышение температуры инертизирующего состава сопровождается увеличением его удельной теплоемкости, увеличением доли льда и снижением доли инертного газа.

Проведенные исследования также показали, что параметры инертизирующего состава, состоящего из азота и частиц льда, можно изменять в широком диа-

пазоне в зависимости от соотношения исходных компонентов, а также температуры подаваемых пара и воды. Удельная теплоемкость инертизирующего состава возрастает с увеличением в ней доли частиц льда. Температура состава может изменяться от температуры кипения жидкого азота, до температуры таяния льда. При отрицательной температуре состава дальность его транспортирования в выработанном пространстве возрастает.

Возможно также получение инертизирующих составов с положительной температурой. Однако в таком случае жидкие частицы быстро осядут на поверхности угля и горных пород, удельная теплоемкость состава резко уменьшится, и эффективность применения состава для борьбы с самовозгоранием снизится.

Плотность инертизирующего состава также изменяется в зависимости от соотношения расходов азота к жидкости (или водяного пара) при получении инертизирующего состава. Плотность состава рассчитаем из условия, что добавка частиц жидкости практически не изменяет объем газообразного азота. В этом случае плотность инертизирующего состава можно определить по формуле

$$\rho_C = \frac{M_a + M_B}{V_a}, \quad (2.18)$$

где  $M_a$  – масса азота в смеси, кг;  $M_B$  – масса замороженной жидкости в смеси, кг;  $V_a$  – объем газа в смеси, м<sup>3</sup>.

Масса азота в объеме смеси равна

$$M_a = \rho_a V_a, \quad (2.19)$$

а массу жидкости в смеси можно определить из уравнения

$$\frac{G_a}{G_B} = \frac{M_a}{M_B}. \quad (2.20)$$

Подставляя уравнения (2.19) и (2.20) в (2.18), получаем следующее уравнение для расчета плотности инертизирующего состава, получаемого при совместном распылении жидкого азота и воды

$$\rho_C = \rho_a \left(1 + \frac{1}{G_a/G_B}\right). \quad (2.21)$$

На рис. 2.8 представлена зависимость плотности инертизирующего состава от соотношения расходов совместно распыляемых жидкого азота и воды.

Приведенные на рис. 2.8 данные показывают, что плотность инертизирующего состава увеличивается с ростом расхода воды, используемой для распыления с жидким азотом. Плотность состава существенно превышает плотность газообразного азота, что дополнительно увеличивает хладагентное действие состава при охлаждении разогретого угля.

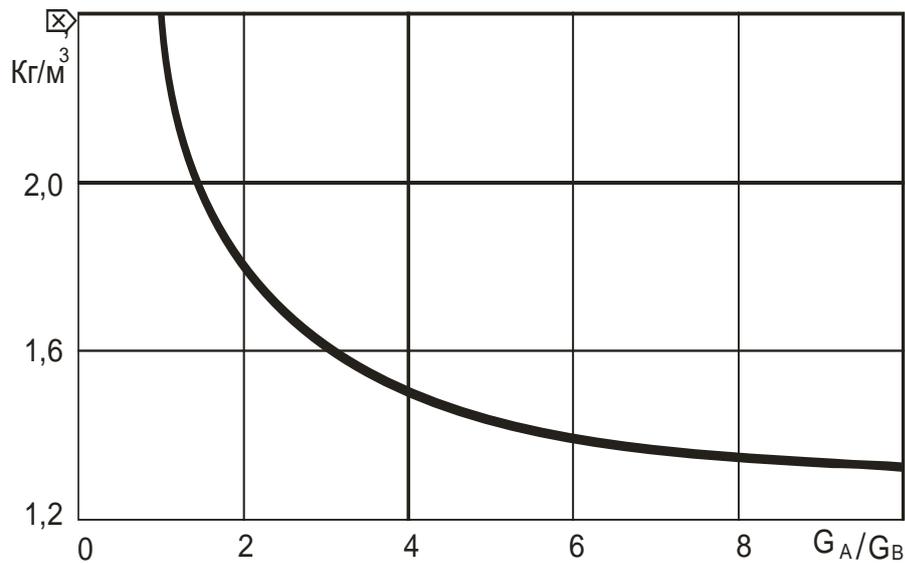


Рис. 2.8. Влияние соотношения расходов жидкого азота ( $G_A$ ) и воды ( $G_W$ ) на плотность образующегося состава ( $\rho$ )

### 2.3. Сравнительная оценка хладагентного действия пожаротушающих составов

Развитие эндогенных пожаров в шахтах обычно происходит в выработанном пространстве, где образуются скопления разрыхленного угля и создаются условия для фильтрации воздуха. В отличие от пожаров на поверхности, где подаваемый хладагент (вода, пена и пр.) нагревается, испаряется и уносится в атмосферу, в выработанном пространстве практически все тепло очага пожара при тушении остается в обрушенной массе. Тушение таких пожаров существенно осложняется, так как тепло, поглощаемое хладагентом в очаге пожара, переносится в соседние, ранее холодные области выработанного пространства. В результате объем разогретой области увеличивается.

Одним из наиболее эффективных средств тушения пожаров является вода, обладающая большой теплоемкостью и плотностью, а также малой вязкостью, позволяющей ей проникать через поры и трещины горящих материалов. Однако из-за большой плотности вода будет перемещаться в выработанном пространстве только по почве пласта угля. Очаги же самовозгорания, из-за условий теплообмена с окружающей средой и особенностей движения воздуха через выработанное пространство, будут располагаться в верхней части обрушенной массы угля и горных пород и окажутся вне зоны воздействия воды. Поэтому для тушения и профилактики самовозгорания угля в выработанном пространстве необходимо использовать составы, позволяющие производить его объемную обработку.

Наиболее пригодны для этой цели пена, инертные газы и составы на основе инертных газов, содержащие частицы, поглощающие большое количество тепла при фазовых переходах и нагревании. Необходима сравнительная оценка хладагентного действия этих составов для выбора наиболее эффективного подавления очагов самовозгорания на различных стадиях его развития.

Для сравнения хладагентного действия исследуемых составов возьмем скопление разогретого угля объемом  $1 \text{ м}^3$ . При тушении подземных пожаров необходимо учитывать, что пожар считается потушенным в случае снижения температуры исходящих из пожарного участка воздуха, воды, а также температуры охлаждаемых горных пород и угля до  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  [124].

Теплосодержание разогретого угля можно определить по формуле

$$Q = V\rho c(t_p - t_o), \quad (2.18)$$

где  $V$  – объем скопления угля,  $\text{м}^3$ ;  $\rho$  – плотность скопления угля,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c$  – удельная теплоемкость угольного скопления,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;  $t_p$  – температура разогретого скопления угля,  $\text{K}$ ;  $t_o$  – температура угольного скопления после охлаждения,  $\text{K}$ .

При расчете учтем, что плотность скопления угля равна  $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ , его удельная теплоемкость  $1,05 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ . Средняя температура горных пород на шахтах Кузбасса составляет около  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $288 \text{ K}$ ). Изменение теплосодержания

заданного объема разогретого угольного скопления в зависимости от исходной температуры, рассчитанное по формуле (2.18) приведено на рис. 2.9.

Приведенные на рис. 2.18 данные показывают, что теплосодержание угольного скопления линейно возрастает с увеличением его температуры.

Нагнетание газообразного азота в выработанное пространство с разогретым углем сопровождается нагреванием газа теплом, отнимаемым от самовозгорающегося угля. Количество тепла, поглощенное азотом при прохождении через скопление зависит от начальной температуры газа и определяется по зависимости

$$Q_a = V_a \rho_a c_a (t_c - t_a), \quad (2.19)$$

где  $V_a$  – объем поданного газообразного азота,  $\text{м}^3$ ;  $\rho_a$  – плотность газообразного азота,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c_a$  – удельная теплоемкость поданного азота,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $t_c$  – температура, до которой охлаждается при подаче азота разогретое процессом самовозгорания угольное скопление,  $\text{К}$ ;  $t_a$  – температура инертного газа, подаваемого в разогретое выработанное пространство,  $\text{К}$ .

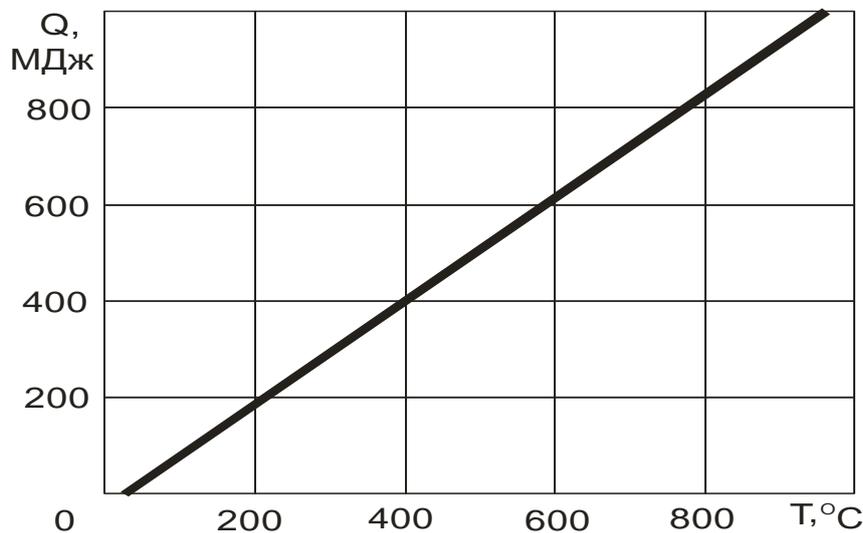


Рис. 2.9. Теплосодержание  $1 \text{ м}^3$  угольного скопления ( $Q$ ) в зависимости от температуры ( $T$ )

Приравняв выражения (2.18) и (2.19) определим количество газообразного азота, необходимого для охлаждения разогретого угольного скопления до требуемой температуры

$$V_a = \frac{V_{cp}(t_p - t_0)}{c_a \rho_a (t_c - t_a)}, \quad (2.20)$$

Анализ уравнения (2.20) показывает, что количество азота, необходимого для охлаждения нагретого угля, увеличивается с ростом начальной температуры угля и температуры подаваемого азота. Количество газообразного азота с различной начальной температурой, которое необходимо подать в разогретое угольное скопление объемом  $1 \text{ м}^3$  для охлаждения его до температуры, при которой пожар можно списать ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), определенное по формуле (2.20), приведено на рис. 2.10.

При расчетах принято, что плотность азота равнялась  $1,2 \text{ кг/м}^3$ , а его удельная теплоемкость  $1,0 \text{ кДж/(кг К)}$ . Из приведенных на рис. 2.10 данных видно, что существенно уменьшить количество азота, необходимого для охлаждения очагов самовозгорания, позволяет снижение его начальной температуры. Так, при температуре азота  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , требуется  $16975 \text{ м}^3$  газа для охлаждения  $1 \text{ м}^3$  угольного скопления до необходимой для списания пожара температуры. Снижение начальной температуры газа до  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ , уменьшает расход необходимого объема азота до  $5658 \text{ м}^3$ .

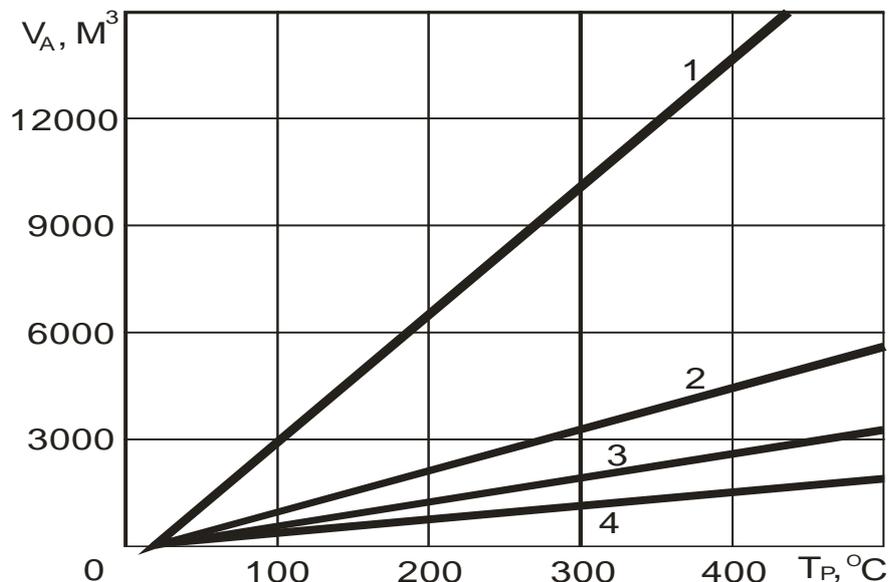


Рис. 2.10. Объем азота, необходимый для охлаждения разогретого угольного скопления ( $V_A$ ) в зависимости от температуры угля ( $T_P$ ) и температуры подаваемого газа: 1 – температура подаваемого азота  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 – температура азота  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 3 – температура азота  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 4 – температура азота  $-190 \text{ }^\circ\text{C}$

Между тем в настоящее время для борьбы с эндогенными пожарами зачастую используют сжиженный азот, который газифицируют и нагревают перед подачей в выработанное пространство до температуры окружающей среды. Полученные результаты показывают, что жидкий азот необходимо только газифицировать и подавать в выработанное пространство с очагом самовозгорания при минимальной температуре.

Оценим эффективность применения пены для охлаждения угольного скопления. Пена состоит из жидкой фазы и газа, соотношение между которыми определяет кратность пены. Количество тепла, которое может поглотить пена, зависит от ее начальной температуры, соотношения между жидкой и газовой фазой и может быть определено по формуле

$$Q_n = \rho_w c_w \frac{V_n}{K} (t_c - t_n) + \rho_a c_a (V_n - \frac{V_n}{K}) (t_c - t_n), \quad (2.21)$$

где  $\rho_w$  – плотность жидкой фазы пены, кг/м<sup>3</sup>;  $c_w$  – удельная теплоемкость жидкой фазы пены, кДж/(кг К);  $V_n$  – объем подаваемой пены, м<sup>3</sup>;  $K$  – кратность подаваемой пены;  $t_c$  – температура, до которой охлаждается угольное скопление, К;

$t_n$  – температура подаваемой пены, К.

Для расчета необходимого для охлаждения угольного скопления количества пены приравняем формулы (2.18) и (2.21). Получим следующее выражение

$$V_n = \frac{\rho c V K (t_p - t_0)}{\rho_w c_w (t_c - t_n) + \rho_a c_a (R - 1) (t_c - t_n)}. \quad (2.22)$$

Количество пены, необходимой для охлаждения 1 м<sup>3</sup> разогретого угольного скопления, рассчитанное по формуле (2.22), представлено на рис. 2.11.

Анализ представленных на рис. 2.11. зависимостей показывает, что существенно сократить расход объема пены, необходимого для снижения температуры разогретого угольного скопления, позволяет снижение кратности пены. В случае снижения кратности пены происходит увеличение доли жидкой

фазы в единице объема пены, способной поглощать значительное количество тепла при нагревании вследствие большой плотности и удельной теплоемкости воды.

Однако кратность пены можно регулировать при ее получении, а при движении по выработанному пространству кратность пены быстро возрастает из-за оседания жидкой фазы на поверхности угля. Поэтому пена, попадающая в очаг разогретого угля после движения по выработанному пространству от удаленной точки подачи, может существенно отличаться по хладагентному действию от пены, свойства которой можно определить в месте генерации. Кроме того, пена низкой кратности имеет большую плотность и может стекать по почве пласта, что снижает эффект объемной обработки скоплений угля и породы и не позволит попасть пене в очаги, расположенные выше точки подачи хладагента.

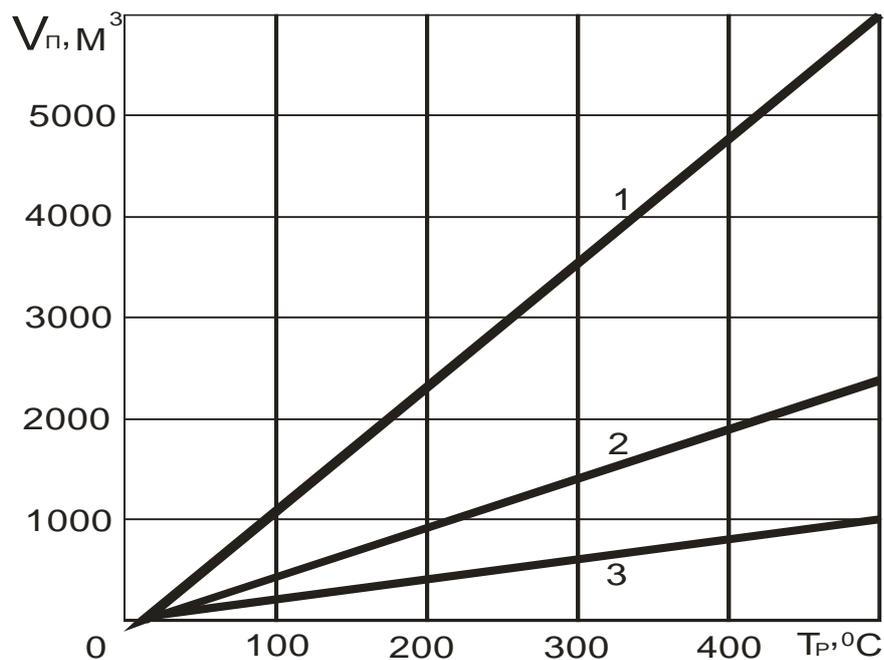


Рис. 2.11. Объем пены, необходимый для охлаждения угольного скопления ( $V_{п}$ ) в зависимости от начальной температуры угля ( $T_{р}$ ) и кратности подаваемой пены: 1 – кратность пены равна 500; 2 – кратность пены 200; 3 – кратность пены равна 100

Сравнивая расход инертного газа и пены, необходимый для охлаждения угольного скопления с заданными параметрами, видно, что использование пены вместо азота может значительно сократить количество подаваемого хладагента. Однако, в случае использования газообразного азота с низкими температурами,

требуемые объемы пены, особенно большой кратности, и инертного газа отличаются незначительно. При температурах, близких к температуре кипения жидкого азота, охлаждающие свойства газообразного азота оказываются лучше, чем у пены кратностью 200.

Подача инертизирующего состава, созданного при перемешивании жидкого азота и распыленной воды, приводит к поглощению тепла на нагрев газа и льда, таяние льда и нагрев образующейся жидкости. Учитывая, что объем частиц льда в составе пренебрежимо мал по сравнению с объемом инертного газа, количество отнимаемого инертизирующей смесью тепла можно определить из выражения

$$Q_s = V_s c_a \rho_a (t_0 - t_s) + M_w c_w (t_p - t_{pl}) + M_w c_l (t_{pl} - t_s) + M_w r_{pl}, \quad (2.23)$$

где  $V_s$  – объем инертизирующего состава, м<sup>3</sup>;  $M_w$  – масса частиц льда в инертизирующем составе, кг;  $t_s$  – температура подаваемого инертизирующего состава, К;  $t_{pl}$  – температура плавления льда, К;  $c_l$  – удельная теплоемкость льда, кДж/кг;  $r_{pl}$  – удельная теплота плавления льда, кДж/кг.

Для нахождения массы частиц, находящихся в жидком или твердом состоянии, в инертизирующем составе, полученном путем перемешивания частиц воды и жидкого азота, преобразуем уравнение (2.6)

$$M_w = \frac{M_a r_a}{c_w (t_0 - t_l) + c_l (t_l - t_c) + r_l}, \quad (2.24)$$

где  $M_a$  – масса газообразного азота в инертизирующем составе, кг.

Приравнявая уравнение (2.23) к уравнению (2.18), можем определить объем инертизирующего состава, необходимый для охлаждения разогретого угля до температуры, достаточной для списания пожара в категорию потушенных. Массу частиц в инертизирующем составе определим по формуле (2.24), причем массу инертного газа находим из выражения

$$M_s = M_a = V_a \rho_a. \quad (2.25)$$

Объем инертизирующего состава, необходимый для охлаждения разогретого угля, в зависимости от его температуры, приведен на рис. 2.12. При расчете использовался инертизирующий состав с начальной температурой -196

°С, полученный при совместном распылении жидкого азота и воды с исходной температурой 15 °С.

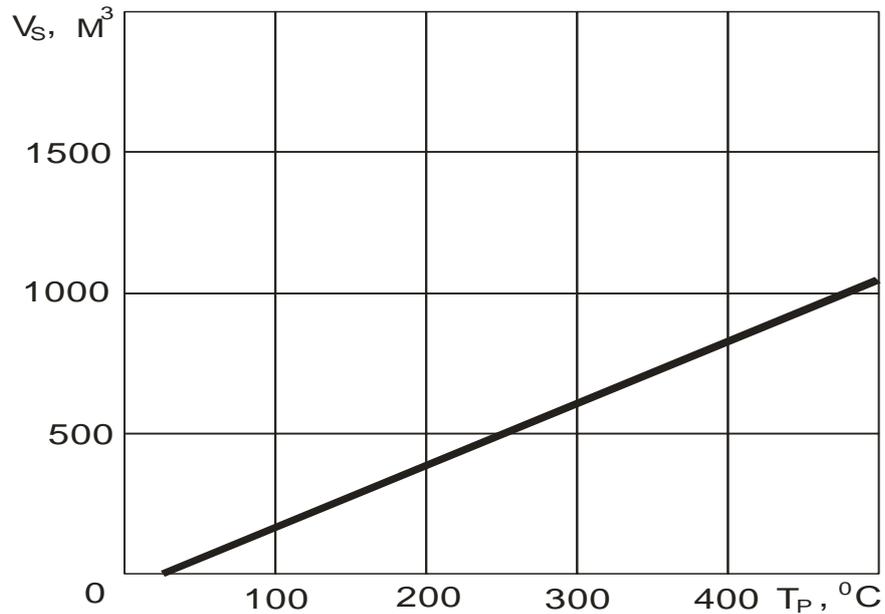


Рис. 2.12. Влияние температуры разогретого угля ( $T_p$ ) на объем инертизирующего состава ( $V_s$ ), необходимого для его охлаждения

Проведенные исследования показали, что полученная зависимость объема инертизирующего состава, необходимого для охлаждения угольного скопления, незначительно отличается при изменении начальной температуры воды, распыляемой совместно с жидким азотом. Применение для газификации жидкого азота водяного пара вместо воды снижает хладагентные свойства получаемого инертизирующего состава из-за уменьшения доли частиц льда в составе.

Количество инертизирующего состава, необходимого для охлаждения 1 кг разогретого угля, в зависимости от начальной температуры инертизирующего состава приведено на рис. 2.13. Начальная температура распыляемой воды равна 15 °С. Температура получаемого инертизирующего состава регулировалась изменением соотношения расходов воды и жидкого азота. Конечная температура охлаждаемого угля 25 °С.

Результаты, приведенные на рис. 2.13, свидетельствуют о повышении эффективности охлаждения разогретого угля в случае увеличения температуры подаваемого инертизирующего состава. Причиной такого эффекта является увеличение доли частиц льда в составе с ростом его температуры.

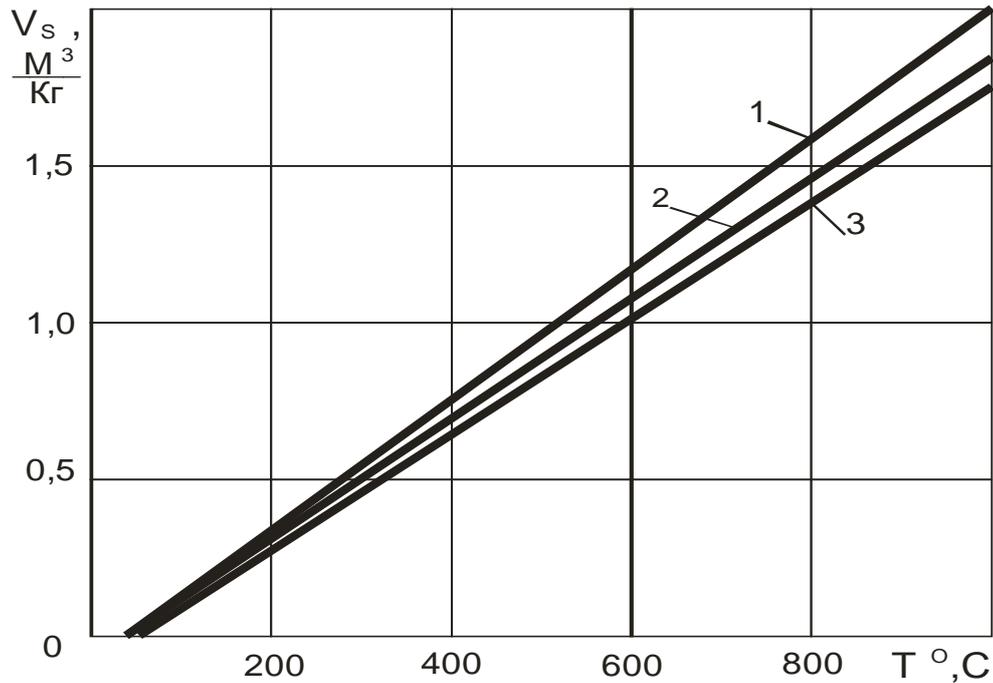


Рис. 2.13. Объем инертизирующего состава ( $V_s$ ), необходимый для охлаждения угля в зависимости от температуры угля ( $T$ ) и температуры подаваемого состава: 1 - температура состава равна  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2 – температура состава  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3 – температура состава  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Сравнивая данные расчетов, приведенных на рис. 2.10, 2.11 и 2.12, можно сделать вывод, что хладагентные свойства инертных составов, полученных при совместном распылении воды и жидкого азота, значительно выше, чем у применяемого газообразного азота и сопоставимы с нагнетаемой в выработанное пространство пеной низкой кратности. Однако зона распространения пены в выработанном пространстве ограничена несколькими метрами из-за большой вязкости пены и ее быстрого распада. Поэтому применение инертизирующих составов существенно повысит эффективность борьбы с эндогенными пожарами из-за увеличения вероятности попадания хладагента в очаг. Одновременно подача инертизирующих составов сократит время тушения очагов самовозгорания и уменьшит расход инертного газа, что повысит безопасность горных работ и снизит экономический ущерб, обусловленный подземными эндогенными пожарами.

## **Выводы**

1. Изменение соотношения расходов жидкого азота и воды позволяет изменять в широких пределах температуру получаемого инертизирующего состава и содержание в нем частиц льда.

2. Параметры инертизирующего состава, состоящего из азота и частиц льда, можно изменять в зависимости от исходной температуры подаваемых пара или воды.

3. Удельная теплоемкость инертизирующего состава возрастает с увеличением в ней доли льда. Плотность инертизирующего состава увеличивается с ростом расхода воды, используемой для распыления совместно с жидким азотом.

4. Хладагентные свойства инертизирующего состава, получаемого при совместном распылении воды и жидкого азота, больше, чем у инертного газа и пены, что позволит сократить время тушения очагов самовозгорания угля в шахтах.

5. Повышение температуры инертизирующего состава, получаемого при совместном распылении воды и жидкого азота, увеличивает эффективность охлаждения угля за счет роста количества частиц льда в составе.

### **3. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ УГОЛЬНОГО СКОПЛЕНИЯ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ИНЕРТИЗИРУЮЩИМИ СОСТАВАМИ**

#### **3.1. Исследование теплофизических параметров угольного скопления после обработки инертизирующими составами**

Подача инертизирующих составов в выработанное пространство шахт приводит к воздействию низкотемпературного хладагента, содержащего взвешенные частицы льда, на угольные скопления, имеющие различную температуру. В результате процесса теплообмена с инертизирующим составом происходит снижение температуры скопления угля и вмещающих пород. Степень охлаждения угля зависит от длительности контакта поверхности угля с хладагентом, его температуры, состояния и величины поверхности угля в скоплении, а также параметров состава.

После прекращения подачи инертизирующего состава продолжается процесс теплообмена между охлажденным скоплением и окружающими породами, сохранившими естественную температуру горных пород на данной глубине. Передача тепла от обработанного скопления к окружающей среде происходит за счет теплопроводности и конвективного теплообмена, возникающего при движении газа в скоплении. Перемещение газа в выработанном пространстве может происходить за счет перепадов давления газа, обусловленных работой вентиляторов проветривания, а также за счет разности температур газа в различных зонах выработанного пространства.

Естественная нормализация температуры ранее обработанных инертизирующими составами угольных скоплений может вызвать движение воздуха в выработанном пространстве, что приведет к поступлению кислорода к угольным скоплениям и к процессам окисления угля кислородом рудничной атмосферы. Выделяющееся при взаимодействии угля и кислорода тепло может вновь спровоцировать повышение температуры скопления. Поэтому необходимо оценить возможность развития процесса самовозгорания в угольных скоплениях выработанного пространства, ранее обработанных инертизирующими составами.

Обработка угля инертизирующим составом, состоящим из инертного газа и частиц замороженной жидкости, приводит к изменению некоторых физических и химических свойств угля и окружающей его газовой фазы, оказывающих влияние на развитие процесса самовозгорания. Так, подача состава изменяет газовый состав атмосферы выработанного пространства. Концентрация кислорода может существенно снижаться за счет разбавления рудничной атмосферы поданным азотом. Частицы льда, осевшие в порах и трещинах выработанного пространства, начинают таять, что сопровождается увлажнением угольного скопления.

Снижение температуры и увеличение влажности угольного скопления приводит к изменению удельной теплоемкости, коэффициента теплопроводности и плотности угля. Повышение влажности угольного скопления существенно скажется на процессе поглощения углем кислорода. Покрывающая поверхность угольных частиц влага будет препятствовать проникновению кислорода к активным центрам, что снизит скорость окисления и, соответственно, уменьшит количество генерируемого в скоплении тепла.

Увеличение влажности угольного скопления приведет к изменению таких его теплофизических параметров, как коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность. Причиной изменения теплофизических параметров угля при увлажнении является замещение части воздуха, находящегося в порах и трещинах, на жидкость. Так, коэффициент теплопроводности воды равен 0,6 Вт/(м·К), а воздуха 0,026 Вт/(м·К). Плотность воздуха при естественных температурах шахты равна 1, 2 кг/м<sup>3</sup>, а воды 1000 кг/м<sup>3</sup>. Удельная теплоемкость воды в четыре раза превышает аналогичный параметр воздуха.

Согласно проведенным лабораторным исследованиям [125, 126], увеличение влажности насыпок угля в пределах от 0 до 30 % приводит к возрастанию коэффициента теплопроводности по линейному закону. Описать изменение коэффициента теплопроводности скопления угля от влажности можно уравнением

$$\lambda = \lambda_0(1 + 10,56W), \quad (3.1)$$

где  $\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности сухого угля, Вт/(м·К);  $W$  – влажность угля, доли ед.

На рис. 3.1 приведено изменение коэффициента теплопроводности угольного скопления в зависимости от его влажности. При расчете по формуле (3.1) принято, что коэффициент теплопроводности сухого угля равен 0,071 Вт/(м·К) [125].

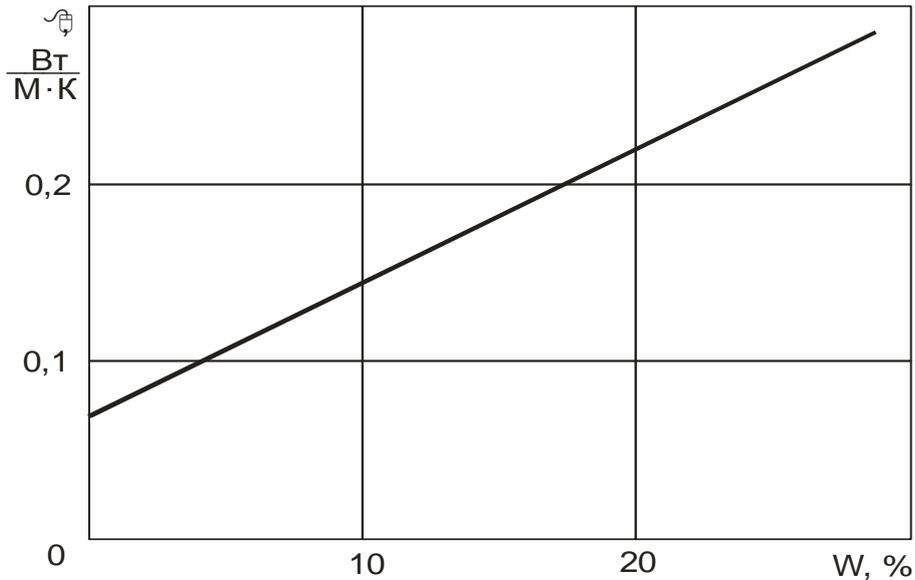


Рис.3.1. Изменение коэффициента теплопроводности скопления угля ( $\lambda$ ) в зависимости от влажности ( $W$ )

Анализируя приведенные на рис. 3.1 данные, можно сделать вывод, что увеличение влажности угля после перехода осевших на его поверхности частиц льда в жидкое состояние способно существенно повысить коэффициент теплопроводности угольного скопления. В результате возрастут потери тепла из угольного скопления тепла, выделяющегося при окислении горючего ископаемого, что замедляет повышение температуры и увеличивает длительность инкубационного периода самовозгорания угля.

Удельная теплоемкость увлажненного угольного скопления подчиняется правилу аддитивности, поэтому его значение в зависимости от количества влаги можно описать уравнением

$$c = c_0 + c_w W, \quad (3.2)$$

где  $c_o$  – удельная теплоемкость сухого угля, Вт/(м·К);  $c_w$  – удельная теплоемкость воды, Вт/(м·К).

На рис. 3.2 показана зависимость изменения удельной теплоемкости угольного скопления от его влажности. При расчете по формуле (3.2) принято, что удельная теплоемкость сухого угля равна 0,84 кДж/(кг·К) [125].

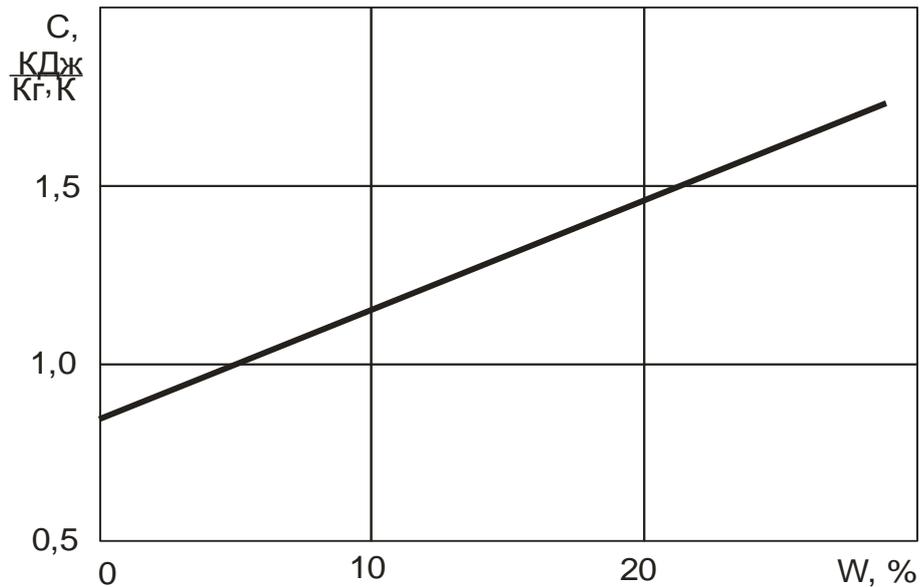


Рис. 3.2. Влияние влажности (W) на величину удельной теплоемкости угольного скопления (C)

Приведенные на рис. 3.2 данные свидетельствуют об увеличении удельной теплоемкости угольного скопления за счет увлажнения после подачи инертизирующего состава. Так, в анализируемом диапазоне влажности угля удельная теплоемкость возрастает в два раза. В результате роста удельной теплоемкости угля скорость разогрева увлажненного скопления при его окислении также уменьшится.

Для расчета плотности скопления угля при различных значениях влажности воспользуемся уравнением изменения массы скопления при добавке влаги

$$M = M_o + M_w, \quad (3.3)$$

где  $M_o$  – масса сухого угля, кг;  $M_w$  – масса влаги в угле, кг.

Учтем, что влажность угольного скопления определяется из выражения

$$W = \frac{M_w}{M_o + M_w}. \quad (3.4)$$

Из выражения (3.4) имеем

$$M_w = (M_o + M_w)W. \quad (3.5)$$

Подставляя уравнение (3.5) в (3.3) получаем

$$M = M_o + MW. \quad (3.6)$$

Учитывая, что объем угольного скопления при увеличении влажности практически не изменяется, разделим каждый член уравнения (3.6) на объем. В результате получим следующее выражение для определения плотности скопления угля в зависимости от его влажности

$$\rho = \frac{\rho_o}{1 - W}, \quad (3.7)$$

где  $\rho_o$  – плотность сухого угольного скопления, кг/м<sup>3</sup>.

На рис. 3.3 представлен график изменения плотности скопления угля при увеличении его влажности. Плотность сухого скопления равна 1000 кг/м<sup>3</sup>.

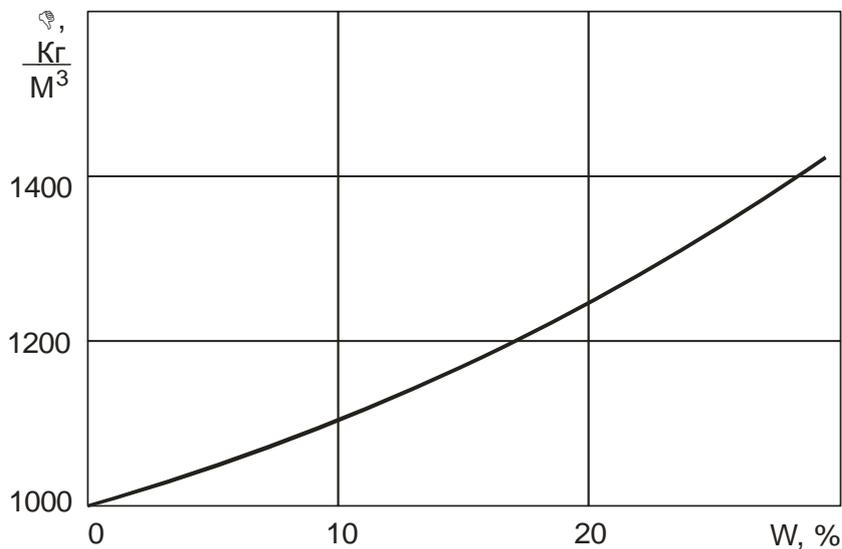


Рис. 3.3. Изменение плотности угольного скопления ( $\rho$ ) при увеличении его влажности ( $W$ )

Из рис. 3.3 видно, что плотность угольного скопления также увеличивается при росте влажности, хотя темпы роста плотности меньше, чем у удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности. Повышение плотности

обработанного инертизирующим составом угольного скопления также замедлит повышение температуры окисляющегося материала при сохраняющейся скорости выделения тепла.

Для оценки степени увлажнения угольного скопления после подачи инертизирующего состава необходимо учитывать неравномерность осаждения частиц льда в порах и трещинах. Так, в случае, если частицы льда находились в трещинах только во взвешенном состоянии в потоке инертного газа, то объем инертизирующего состава, находящийся в скоплении угля, подсчитывается по уравнению

$$V = \Pi V_C, \quad (3.8)$$

где  $V$  – объем пор в скоплении угля, м<sup>3</sup>;  $V_C$  – объем скопления угля, м<sup>3</sup>;  $\Pi$  – пористость скопления угля.

Для определения количества жидкости, находящейся в виде частиц льда в инертном составе, воспользуемся соотношением между расходом жидкой фазы и жидкого инертного газа [127]

$$\frac{G_a}{G_w} = \frac{c_w(t_0 - t_L) + r_L + c_L(t_L - t_c)}{r_a + c_a(t_c - t_L)}, \quad (3.9)$$

где  $G_a$  – количество газифицированного азота, кг/с;  $r_a$  – теплота испарения жидкого азота, кДж/кг;  $G_w$  – расход воды, кг/с;  $c_w$  – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·К);  $t_0$  – начальная температура воды, °С;  $t_L$  – температура замерзания воды, °С;  $r_L$  – теплота замерзания воды, кДж/кг;  $c_L$  – удельная теплоемкость льда, кДж/(кг·К);  $t_c$  – температура образуемого инертизирующего состава из азота и воды, °С;  $c_a$  – удельная теплоемкость газообразного азота, кДж/(кг·К).

Учтем, что соотношение расходов исходных компонентов для получения инертизирующего состава можно представить в виде уравнения

$$\frac{G_w}{G_a} = \frac{M_w \tau}{M_a \tau} = \frac{M_w}{V_a \rho}, \quad (3.10)$$

где  $M_w$  – масса жидкости, используемой для создания инертизирующего состава, кг;  $M_a$  – масса азота, поданного при получении инертизирующего состава, кг;  $\tau$  – длительность подачи исходных компонентов, с;  $V_a$  – объем инертного газа в составе, м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность инертного газа, кг/м<sup>3</sup>.

Сопоставляя формулы (3.8), (3.9) и (3.10), получаем следующее уравнение, описывающее количество жидкости, оставшееся в скоплении угля после прекращения подачи инертизирующего состава

$$M_w = \frac{\Pi \rho V_C (r_a + c_a (t_C - t_L))}{c_w (t_o - t_L) + r_L + c_L (t_L - t_C)}. \quad (3.11)$$

Подставляя уравнение (3.11) в (3.4), можно получить следующее выражение для расчета влажности угольного скопления после подачи инертизирующего состава.

$$W = \frac{\Pi [r_a + c_a (t_C - t_L)]}{c_w (t_o - t_L) + r_L + c_L (t_L - t_C) + [r_a + c_a (t_C - t_L)]}. \quad (3.12)$$

Анализ уравнения (3.12) показывает, что количество влаги, привнесенной в угольное скопление подаваемым инертным составом, зависит от пористости скопления, температуры используемой воды и образуемого инертизирующего состава. С увеличением температуры инертизирующего состава и ростом пористости скопления повышается количество внесенной в уголь влаги. Увеличение температуры воды, используемой для получения инертизирующего состава, приводит к уменьшению влажности обработанного угольного скопления. Изменение влажности угольного скопления после подачи инертизирующего состава в зависимости от пористости угля и температуры состава приведены в табл. 3.1. Температура воды, используемой для получения инертизирующего состава, равнялась 15°С. При 0°С вода в инертизирующем составе находилась в виде частиц льда. Зависимость влажности обработанного угольного скопления от температуры поданного инертизирующего состава приведены на рис. 3.4.

Изменение влажности угольного скопления после подачи инертизирующего состава

Пористость угольного скопления	Температура подаваемого инертизирующего состава			
	-196 °С	-100 °С	-50 °С	0 °С
0,5	0,094	7,54	13,01	20,29
0,4	0,075	6,12	10,69	16,90
0,3	0,056	4,66	8,23	13,25
0,2	0,037	3,16	5,64	9,24

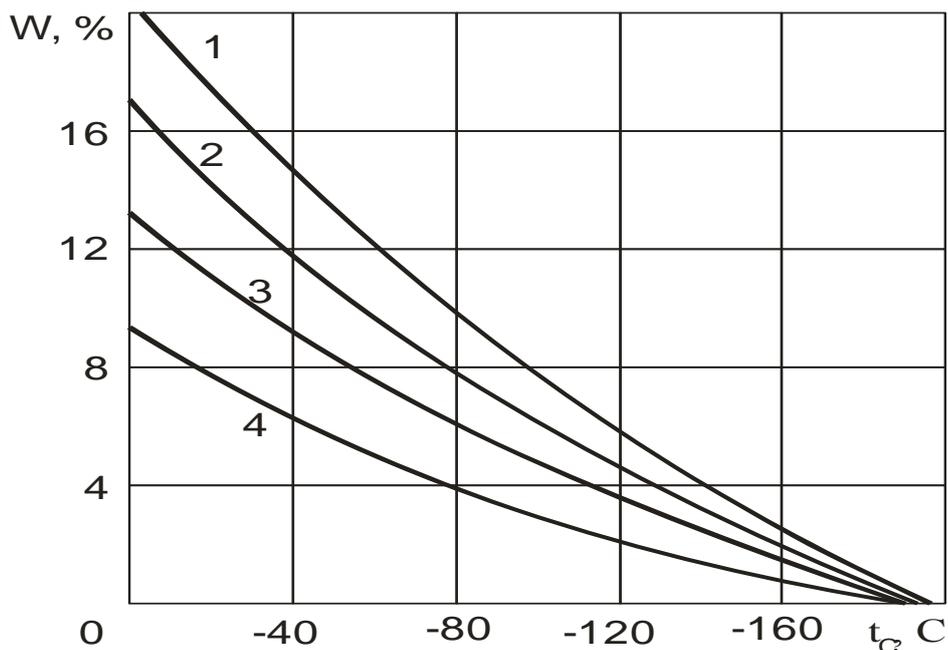


Рис. 3.4. Влияние температуры инертизирующего состава ( $t_c$ ) на влажность угольного скопления ( $W$ ) с пористостью: 1 – пористость 0,5; 2 – пористость 0,4; 3 – пористость 0,3; 4 – пористость 0,2

Изучение приведенных данных показывает, что для профилактики самовозгорания угля целесообразно использовать инертизирующие составы с температурой выше  $-80^{\circ}\text{C}$ . В этих случаях добавленная инертизирующими составами влага способна замедлить развитие самовозгорания из-за потерь тепла, необходимых на нагрев жидкости.

Таким образом, проведенные исследования показали, что после подачи инертизирующего состава, состоящего из газообразного азота и частиц льда, происходит увеличение влажности угольного скопления за счет таяния осевших частиц льда. Дополнительная жидкость приводит к увеличению коэффициента теплопроводности угля, что способствует лучшему рассеиванию тепла,

образующегося при окислении горючего вещества, из скопления угля. Поэтому такая обработка замедлит развитие процесса самовозгорания угольного скопления.

Теплоемкость угольного скопления также возрастает при увеличении его влажности. Увеличение теплоемкости замедляет скорость повышения температуры окисляющегося угля.

### 3.2. Исследование химической активности угля после обработки инертизирующими составами

Подача в выработанное пространство инертизирующего состава, состоящего из газообразного азота и частиц льда, приведет к уменьшению химической активности угля по отношению к кислороду за счет воздействия нескольких факторов. Одним из факторов, снижающих химическую активность угля, является падение его температуры при взаимодействии с частицами льда и низкотемпературным газом. Так, согласно закону Аррениуса, скорость химических реакций определяется выражением

$$k = A e^{-E / RT}, \quad (3.13)$$

где  $A$  – фактор эффективности соударений;  $E$  – энергия активации, кДж/кмоль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(кмоль·К);  $T$  – температура, К.

Согласно уравнению (3.13), скорость взаимодействия между углем и кислородом существенно снижается при охлаждении угольного скопления. Однако теоретически оценить изменение химической активности угля от температуры невозможно из-за сложности строения угля, а также образования множества уголь-кислородных комплексов, являющихся промежуточными продуктами реакций и способных существовать длительное время. Поэтому рассчитать энергию активации и степень влияния изменения температуры на химическую активность угля невозможно без проведения экспериментов.

Для исследования химической активности угля по отношению к кислороду воздуха использовалась установка, приведенная на рис. 3.5. Дополнительный эффект изменения химической активности угля после обработки инертным составом

обусловлен образованием воды при таянии частиц льда. Появляющаяся жидкость формирует на поверхности угля защитную пленку, препятствующую проникновению кислорода к активным центрам. Снижение количества выделяемого при окислении угля тепла происходит при подаче инертного состава также из-за уменьшения концентрации кислорода в атмосфере выработанного пространства.

Определение химической активности предварительно прогретого угля необходимо также для оценки возможности рецидива процесса самовозгорания после обработки выработанного пространства с очагом пожара инертизирующим составом. Необходимо также исследовать перспективу применения инертизирующих составов для профилактики самовозгорания угля.

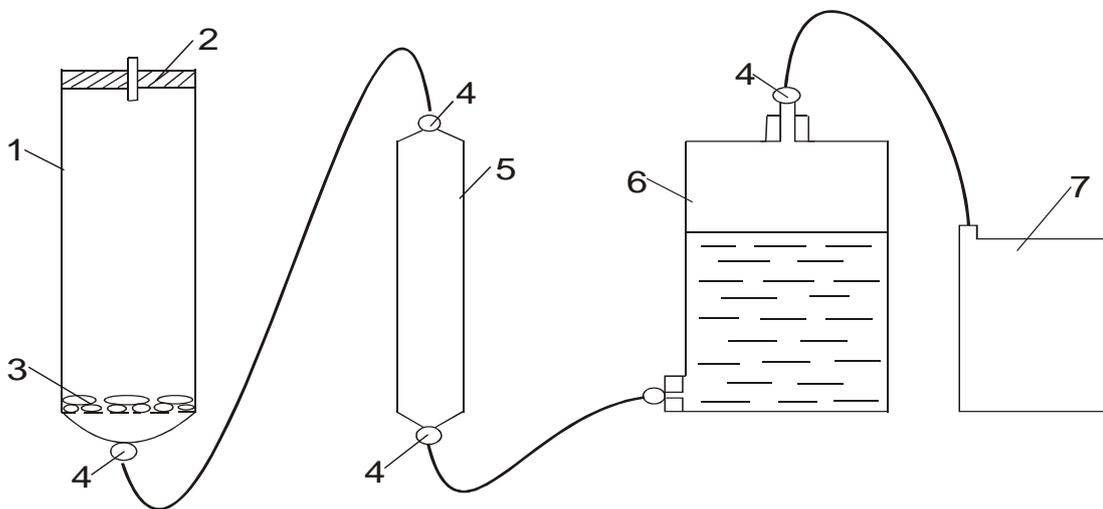


Рис. 3.5. Установка для определения химической активности углей: 1 – сорбционный сосуд; 2 – пробка; 3 – стеклянные палочки; 4 – кран; 5 – прободоотборная пипетка; 6 – емкость с раствором; 7 – вакуумный насос

Отбор проб угля для определения химической активности производился в шахте на свежееобнаженной поверхности угольного пласта. Отбитый уголь помещали в герметичную емкость и отправляли в лабораторию, где отобранную пробу угля измельчали, просеивали на ситах для выделения фракции 1-3 мм и исследовали на установке. Для исследования химической активности угля использовалась методика, применяемая ИГД им. А.А. Скочинского [15-18].

Исследуемая проба угля помещалась в сорбционный сосуд 1, и герметически закрывалась. Предварительно на дно сосуда заливали около  $10 \text{ см}^3$  воды, с условием, что уголь не контактирует с водой. Для исключения влияния окружа-

ющей среды на результаты эксперимента, опыт протекал при постоянной температуре, для чего сорбционный сосуд помещали в термостат. По истечении определенного времени из сорбционного сосуда отбирали пробу газа и с помощью газоанализаторов определяли в ней оставшуюся концентрацию кислорода. Эксперименты показали, что пробу угля достаточно выдерживать в сорбционном сосуде 24 часа для получения достоверных результатов.

С учетом изменения барометрического давления и упругости водяных паров в воздухе вычисление скорости сорбции кислорода углем производилось по формуле [15-18].

$$U = -\frac{V(B-P)}{M\tau 760} \ln \frac{C_A(1-C_0)}{C_0(1-C_A)}, \quad (3.14)$$

где  $B$  – барометрическое давление перед началом сорбции, мм рт. ст.;  $P$  – упругость паров воды при температуре проведения эксперимента, мм рт. ст.;  $M$  – масса пробы угля в сосуде, кг;  $\tau$  – время контакта воздуха с углем, ч;  $C_A$  – концентрация кислорода в пробе отобранного воздуха, доли ед.;  $V$  – объем воздуха в сорбционном сосуде с пробой угля, м<sup>3</sup>;  $C_0$  – начальная концентрация кислорода в атмосфере сорбционного сосуда, доли ед.;

По мере проведения опыта химическая активность угля постепенно уменьшается, что объясняется образованием слоя окисленного угля на его поверхности, препятствующего проникновению кислорода к активным центрам. Поэтому в течение эксперимента определяли скорости сорбции кислорода через 50, 100, 150, 200 и 250 ч от начала опыта. Затем по формуле (3.15) вычисляли среднеарифметическое значение полученных результатов, которое является основным показателем химической активности угля.

$$U_{25} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n}, \quad (3.15)$$

где  $n$  – число замеров скорости сорбции кислорода углем в эксперименте;  $i$  – номер замера скорости сорбции кислорода углем.

Серия экспериментов оценивала влияние на химическую активность угля снижения его температуры. С этой целью пробы угля в сорбционном сосуде помещали в термостат с различной температурой. Для каждой пробы угля измерение химической активности производили через 24, 65, 148 и 252 часа. Заполнение сорбционного сосуда свежим воздухом осуществлялось каждые 24 часа. Результаты исследований приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Изменение химической активности угля при охлаждении

Температура угля, °С	Удельная скорость сорбции, см <sup>3</sup> /(г·ч)			
	Время от начала сорбции, ч			
	24	65	148	252
20	0,0625	0,0416	0,0216	0,0109
7	0,0268	0,0173	0,0112	0,0069
3	0,0127	0,0074	0,0043	0,0037
0	0,0079	0,0039	0,0021	0,0017
-5	0,0058	0,0026	0,0015	0,0011
-10	0,0044	0,0021	0,0009	0,0007

Изменение химической активности угля в зависимости от температуры представлено на рис. 3.6.

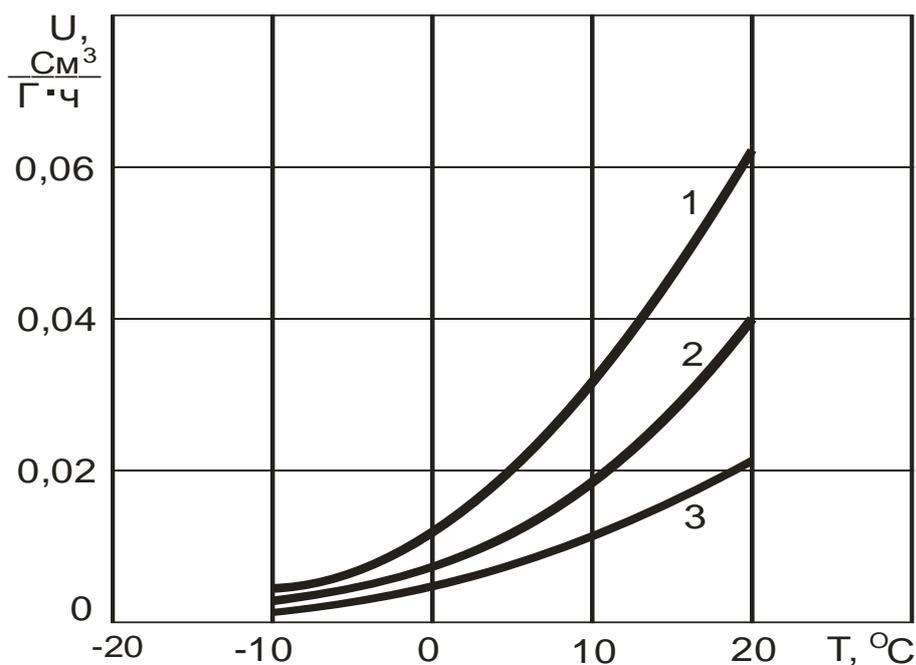


Рис. 3.6. Изменение химической активности угля (U) в зависимости от температуры (T): 1 – через 24 часа от начала сорбции; 2 – через 64 часа от начала сорбции; 3 – через 148 часов от начала сорбции

Из приведенных в табл. 3.2 и рис. 3.6 данных видно, что уменьшение температуры угля значительно снижает химическую активность угля по отношению к кислороду. Так, при охлаждении с 20 до 3 °С химическая активность угля падает в 3 – 4 раза. Наибольшее уменьшение химической активности наблюдается у свежесобранного угля. По мере увеличения времени контакта углем с воздухом, эффект снижения химической активности угля за счет охлаждения уменьшается. Средняя химическая активность угля за время эксперимента снизилась с 0,0234 см<sup>3</sup>/(г·ч) (температура 20 °С) до 0,0056 см<sup>3</sup>/(г·ч) (температура 3 °С).

Дальнейшее снижение температуры угля до отрицательных значений также вызвало уменьшение скорости сорбции кислорода. Например, при температуре –5 °С удельная скорость сорбции кислорода углем через 24 часа равнялась 0,0058 см<sup>3</sup>/(г·ч), а через 65 часов снизилась до 0,0026 см<sup>3</sup>/(г·ч). Можно также отметить, что наибольшая скорость снижения химической активности отмечается при падении температуры угля в пределах от 20 до 0 °С. При дальнейшем охлаждении угля наблюдается замедление скорости уменьшения химической активности угля.

Исходя из полученных результатов, можно рекомендовать производить профилактику процесса самовозгорания угля в выработанном пространстве шахт путем снижения температуры обрушенных угольных скоплений до значения 0 °С. При тушении очагов самовозгорания также следует снижать температуру обрабатываемого угля не до 25 °С (при которой, согласно действующей инструкции, эндогенный пожар можно списывать в категорию потушенных), а до температуры замерзания воды. Такая обработка позволит избежать рецидива пожара в последующем [128].

Таким образом, проведенные исследования показали, что снижение температуры угля способно уменьшить скорость сорбции кислорода углем в 3–10 раз. Поэтому предварительное охлаждение выработанного пространства со скоплениями разрыхленного угля инертными составами позволит предотвратить развитие процесса самовозгорания и отказаться от применения способов, предполагающих использование в шахтах дорогостоящих, а иногда токсичных и экологически вредных составов.

Изучение влияния на химическую активность угля газообразного азота и жидкой фазы инертизирующих составов, образующихся после таяния и оседания частиц льда на поверхности угля, производилось в следующей серии экспериментов. Для исследования сорбционной активности угля использовалась установка, представленная на рис. 3.5. Пробы предварительно измельченного до фракции 1–3 мм угля перед помещением в сорбционный сосуд продувались чистым газообразным азотом, а также азотом с частицами распыленной воды. Опыты проводились при постоянной температуре 25 °С. Одновременно для сравнения исследовался необработанный уголь. Результаты эксперимента приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

## Изменение химической активности угля при обработке

Вид обработки угля	Удельная скорость сорбции, см <sup>3</sup> /(г·ч)			
	Время от начала сорбции, ч			
	24	65	148	252
Не обработан	0,0563	0,0324	0,0175	0,0092
Обработан азотом с частицами воды	0,0356	0,0263	0,0131	0,0063
Обработан газообразным азотом	0,0598	0,0352	0,0183	0,0105

На рис. 3.7 показано изменение сорбционной активности угля по отношению к кислороду после обработки.

Проведенные исследования показали, что частицы воды, осевшие на поверхность угля после подачи инертизирующего состава, производят антипирогенное действие. Так, химическая активность не окисленного угля снизилась в 1,58 раза. По мере окисления угля антипирогенный эффект обработки водой снижается.

Обработка угля только газообразным азотом привела к незначительному увеличению химической активности угля по отношению к кислороду по сравнению с не обработанным углем. Этот эффект может быть объяснен удалением кислорода, ранее физически адсорбированного на поверхности угля, потоком азота. Поэтому после восстановления притока воздуха кислород начинает более интенсивно поглощаться углем.

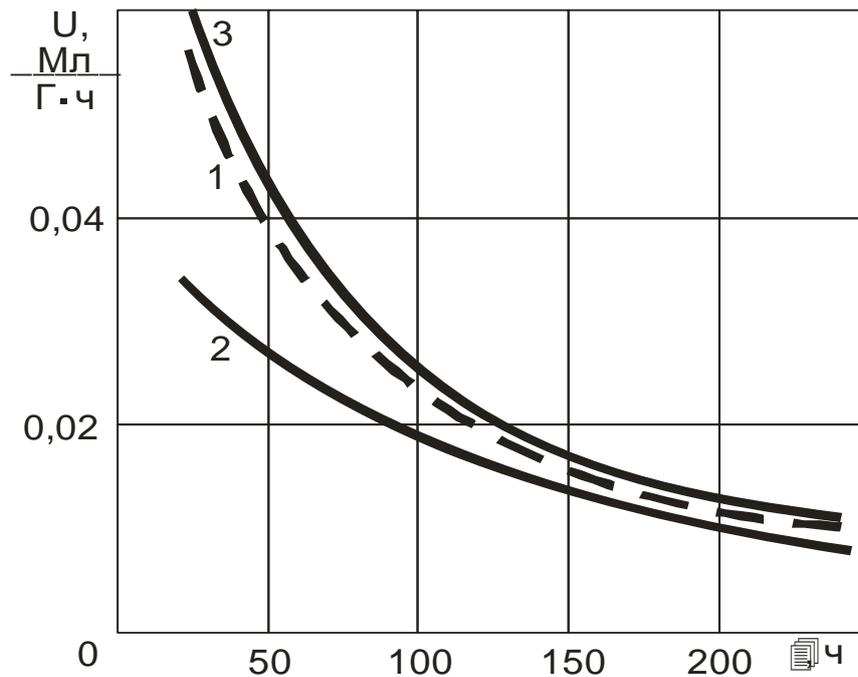


Рис. 3.7. Изменение скорости сорбции углем ( $U$ ) со временем:  
 1 – не обработанный уголь; 2 – обработан азотом с частицами воды;  
 3 – обработан азотом

Таким образом, эксперименты показали, что инертизирующие составы могут использоваться в качестве антипирогенов для предупреждения самовозгорания угля. Основной эффект снижения химической активности угля после подачи инертизирующих составов обусловлен снижением температуры угля и увлажнением скоплений после таяния частиц льда.

### 3.3. Изменение химической активности прогретого угля после обработки инертизирующими составами

Учитывая, что инертизирующие составы, состоящие из взвешенных в газе частиц льда, предполагается использовать для тушения подземных пожаров, в том числе в выработанном пространстве, необходимо исследовать влияние обработки на химическую активность предварительно нагретого, а затем охлажденного с составом угля. Для исследования химической активности угля по отношению к кислороду воздуха использовалась установка, приведенная на рис. 3.5.

Перед исследованием химической активности пробы угля помещали в сорбционный сосуд и подвергались нагреву в сушильном шкафу до температуры

100 °С. Затем сорбционный сосуд вынимали, и нагретый уголь охлаждался путем продувки атмосферным воздухом, потоком газообразного азота, а также инертными составами, состоящими из азота с частицами льда. Температура инертного состава равнялась -20 °С, массовая доля частиц льда в азоте варьировалась путем изменения температуры исходной воды, используемой для получения состава. После охлаждения до комнатной температуры сорбционные сосуды с пробами обработанного угля продувались воздухом, герметично закрывались и выдерживались при постоянной температуре для определения химической активности угля. Результаты исследования приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Изменение химической активности прогретого угля при обработке

Вид обработки предварительно прогретого угля	Удельная скорость сорбции, см <sup>3</sup> /(г·ч)			
	Время от начала сорбции, ч			
	24	65	148	252
воздухом	0,0737	0,0486	0,0312	0,0169
азотом	0,0854	0,0598	0,0386	0,0215
Инертизирующим составом с массовой долей льда 0,355	0,0324	0,0236	0,0187	0,0102
Инертизирующим составом с массовой долей льда 0,322	0,0368	0,0302	0,0249	0,0171
Инертизирующим составом с массовой долей льда 0,272	0,0424	0,0377	0,0283	0,0216
Инертизирующим составом с массовой долей льда 0,235	0,0487	0,0415	0,0328	0,0258

Приведенные в табл. 3.4 данные показывают, что уголь, остывший под действием подаваемого газообразного азота, имеет максимальную химическую активность по отношению к кислороду. Химическая активность такого угля оказалась выше, чем у пробы угля, охлажденной атмосферным воздухом. Наибольшее антипирогенное действие на уголь оказывает инертизирующий состав, имеющий наибольшую массовую долю частиц льда в смеси. По мере снижения количества льда химическая активность обработанного угля повышается.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что основной антипирогенный эффект на уголь оказывают частицы льда. При таянии частиц льда образующаяся жидкость покрывает поверхность угля пленкой и препятствует по-

ступлению кислорода к активным центрам. Поэтому использование для тушения подземных пожаров инертизирующих составов, состоящих из газообразного азота и частиц замороженной воды, позволит предотвратить повторное возникновение очагов самовозгорания.

### **Выводы**

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

1. Подача инертизирующего состава, состоящего из газообразного азота и частиц льда, приводит к увеличению влажности угольного скопления за счет таяния осевших частиц льда. Появление жидкости сопровождается увеличением коэффициента теплопроводности угля, что способствует лучшему рассеиванию тепла, образующегося при окислении горючего вещества, из скопления угля. Удельная теплоемкость угольного скопления также возрастает при увеличении его влажности. Поэтому обработка угольного скопления инертным составом замедлит развитие процесса самовозгорания угольного скопления.

2. Обработка проб угля инертизирующим составом существенно снижает его химическую активность за счет уменьшения температуры и образования пленки жидкости, препятствующей проникновению кислорода к поверхности.

3. Охлаждение разогретого угля инертизирующим составом с частицами льда существенно снижает химическую активность угля по сравнению пробами, остывшими путем продувки азотом или в воздухе, что повысит эффективность предотвращения рецидивов пожара после тушения. По мере повышения содержания частиц льда в инертном составе его антипирогенный эффект увеличивается.

#### 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССА САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ

Проведенный анализ показал, что развитие процесса самовозгорания угля в шахтах зависит от множества факторов, параметры которых способны изменяться в широких пределах. Причем степень воздействия некоторых факторов на процесс самовозгорания окисляющегося материала в достаточной степени не изучена. Поэтому необходимо дальнейшее исследование поведения процесса самовозгорания угля в зависимости от параметров воздействующих факторов.

Факторы, влияющие на эндогенную пожароопасность угольных шахт можно разделить на две группы. В первую группу входят факторы, косвенно влияющие на процесс самовозгорания угля. Такие факторы способствуют образованию разрыхленных угольных скоплений, имеющих развитую поверхность, способную адсорбировать кислород окружающего воздуха. Факторы этой группы формируют условия, способствующие притоку свежего воздуха к угольным скоплениям.

Вторая группа факторов непосредственно воздействует на развитие процесса самовозгорания в угольном скоплении. К таким факторам относятся физико-химические свойства угольного скопления, его параметры, свойства поступающего воздуха, скорость его фильтрации, концентрация кислорода

Часть факторов, влияющих на эндогенную пожароопасность шахт, не поддается регулированию и зависит от особенностей месторождений. К таким факторам можно отнести горно-геологические условия залегания угольных пластов, природную химическую активность угля по отношению к кислороду.

Определенным количеством факторов, влияющих на процесс самовозгорания угля в шахтах, частично можно управлять. Так, можно подбирать горнотехнические условия отработки месторождения, способствующие уменьшению потерь угля в выработанном пространстве, а также снижающие утечки воздуха к разрыхленным скоплениям угля. Необходимо учесть и возможность сокращения длительности контакта разрыхленного угля с воздухом.

Однако зачастую возможности управления горнотехническими факторами ограничены из-за особенностей месторождения, недостатка средств на дорогостоя-

ящее оборудование, отсутствия необходимых специалистов. Поэтому для предотвращения возникновения эндогенных пожаров требуется дополнительное воздействие на угольные скопления. Причем оценить эффективность влияния на процесс самовозгорания многих воздействующих факторов возможно только в лабораторных условиях или путем математического моделирования.

Ранжирование факторов, влияющих на процесс самовозгорания угля, по степени значимости позволит предложить новые и усовершенствовать известные способы борьбы с эндогенными пожарами в шахтах. Полученные данные могут использоваться для прогноза эндогенной пожароопасности угледобывающих предприятий и оценки тенденции поведения очагов самовозгорания, в том числе в период активного и пассивного воздействия на них.

Практика показала, что физическое моделирование процесса самовозгорания угля для оценки влияния на него различных факторов зачастую оказывается малоэффективным из-за невозможности сохранить параметры угольного скопления в каждом эксперименте. Каждая проба отобранного угля будет отличаться по гранулометрическому составу, проницаемости, физическим и химическим свойствам. Поэтому возникают проблемы сопоставления получаемых результатов.

Недостатком физического моделирования является невозможность изменения некоторых параметров процесса [129,130]. Кроме того, при физическом моделировании процесса самовозгорания невозможно произвольно изменять некоторые параметры процесса, не изменяя другие. Так увеличение влажности угля обязательно скажется на коэффициенте теплопроводности скопления, удельной теплоемкости угля. Неизбежно изменение влажности отразится и на химической активности угля. Поэтому возникают сложности при ранжировании факторов по степени влияния на процесс самовозгорания.

Приведенные в литературе попытки физического моделирования процесса самовозгорания [131–135] давали противоречивые результаты и не позволили исследовать влияние отдельных факторов на динамику повышения температуры скопления угля. Эксперименты отличались высокой трудоемкостью, повышенной опасностью для людей из-за опасности выделения токсичных продуктов окисле-

ния в атмосферу. Поэтому в последнее время для исследования процесса самовозгорания предпочитают использовать метод математического моделирования.

#### **4.1. Выбор математической модели для исследования процесса самовозгорания угля**

Применение математического моделирования позволяет проводить исследования процесса самовозгорания с минимальными материальными затратами, в короткий срок, не подвергая исполнителей работы опасности отравления продуктами горения. Преимуществом математического моделирования является возможность изменять как любой отдельный параметр, влияющий на процесс самовозгорания, так и совокупность параметров одновременно. Причем изменять параметры можно в любом диапазоне, а также на любом этапе процесса самовозгорания. Поэтому математическое моделирование незаменимо для оценки эффективности способов профилактики самовозгорания угля, а также выборов способа подавления эндогенных пожаров на любой стадии развития пожара.

Проведенный анализ литературных источников [23,24,36,136–142] показал, что принципиально применяемые математические модели, описывающие процесс самовозгорания угля, отличаются незначительно. Основу моделей составляют уравнения, описывающие перенос тепла в скоплении угля, имеющем источники тепловыделения, а также перенос кислорода в фильтрующемся потоке воздуха. Некоторые отличия в моделях возникали при описании источника тепловыделения в скоплении угля. Для упрощения моделей, что позволяло использовать аналитические способы решения уравнений, принимались стационарные источники тепла, а также линейно возрастающие при повышении температуры угля. Однако наиболее реально отражает происходящий процесс экспоненциальное увеличение скорости химических взаимодействий между углем и кислородом от температуры.

При выборе математической модели необходимо учесть увеличение влажности угольного скопления при движении инертизирующих составов. Жидкость будет образовываться при таянии частиц льда, осевших в порах и трещинах угля.

Поэтому в составе уравнений, описывающих теплообмен в скоплении угля, должен быть член, учитывающий потери тепла, возникающие при испарении жидкости. Для упрощения решения уравнения могут быть одномерными, причем такой вариант возможен и в реальных условиях. Уравнения также должны быть нестационарными, что позволит описать динамику изменения температуры угольного скопления и концентрации кислорода в фильтрующемся воздухе.

В результате анализа для исследования процесса самовозгорания угольного скопления, подвергнутого воздействию инертизирующего состава, была выбрана модель [36], описывающая нестационарный тепло-массоперенос в одномерном скоплении угля. Перенос тепла, генерируемого при взаимодействии кислорода с углем, осуществлялся за счет теплопроводности угольного скопления и фильтрации воздуха. В модели учитывались также потери тепла, возникающие за счет испарения изначально присутствовавшей и привнесенной инертизирующим составом жидкости. С учетом испарения влаги и экспоненциальной зависимости скорости сорбции кислорода углем от температуры использовались следующие уравнения

$$\begin{aligned}
 (1-m)\rho_1c_1 \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} (1-m) + (1-m)\rho_1CQK \exp(-E/RT) - \rho_2c_2V \frac{\partial T}{\partial x} - Q_W\rho_3 \frac{\partial W}{\partial \tau}; \\
 m \frac{\partial C}{\partial \tau} &= mD \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} - (1-m)\rho_1CK \exp(-E/RT); \\
 T(x,0) &= T_0; \quad C(x,0) = C_0; \quad W(x,0) = W_0; \\
 \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha_1(T - T_0); \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = \alpha_2(T - T_0); \quad \frac{\partial W}{\partial \tau} \Big|_{T < 373} = 0; \\
 D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha_{c1}(C - C_0); \quad D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=L} = \alpha_{c2}(C - C_0),
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

где  $m$  – пористость скопления угля, доли ед.;  $\rho_1$  – плотность угля, кг/м<sup>3</sup>;  $c_1$  – удельная теплоемкость скопления угля, Дж/(кг·К);  $T$  – температура, К;  $\tau$  – время, с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности угля, Вт/(м·К);  $C$  – концентрация кислорода, доли ед.;  $Q$  – тепловой эффект реакции окисления, Дж/м<sup>3</sup>;  $K$  – константа скорости окисления, м<sup>3</sup>/(кг·с);  $E$  – энергия активации, Дж/моль;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $\rho_2$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $c_2$  – теплоемкость газа,

Дж/(кг·К);  $V$  – скорость фильтрации газа, м/с;  $Q_w$  – удельная теплота испарения воды, Дж/кг;  $\rho_3$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $W$  – влажность угля, доли ед.;  $D$  – коэффициент молекулярной диффузии кислорода, м<sup>2</sup>/с;  $\alpha_i$  – коэффициент теплоотдачи от угля, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_{ci}$  – коэффициент массоотдачи, м/с;  $L$  – размер угольного скопления, м.

Для решения системы уравнений (4.1) использовался конечно-разностный метод [143-147], реализация которого осуществлялась на ПЭВМ. Проведенные исследования показали, что после прохождения инертного состава через скопление угля изменяются такие параметры, как температура угля, его химическая активность, влажность. Внесенная влага изменяет коэффициент теплопроводности угольного скопления, его удельную теплоемкость. Дополнительно в скоплении угля возникают потери тепла, необходимые для испарения внесенной инертизирующим составом жидкости.

С учетом эффектов, возникающих в угольном скоплении после подачи инертизирующего состава, при решении уравнений (4.1) оценивалось влияние на процесс самовозгорания таких изменяющихся факторов, как коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость скопления, влажность, сорбционная активность и начальная температура угля. При расчете изменялись также скорость фильтрующегося воздуха и концентрация кислорода в нем. В расчетах использовалось скопление угля со следующими параметрами:  $L = 4,0$  м;  $\rho_1 = 1200$  кг/м<sup>3</sup>;  $m = 0,3$ ;  $Q = 1,26 \cdot 10^7$  Дж/м<sup>3</sup>;  $E = 6,28 \cdot 10^4$  Дж/моль. С целью упрощения расчетов было принято, что испарение влаги происходит только при температуре 373 К. Скорость испарения подбиралась из условия, что все тепло, выделяемое при окислении угля кислородом, расходуется на парообразование.

Для исследования процесса охлаждения разогретого угольного скопления инертизирующими составами необходимо учесть отсутствие кислорода в подаваемой смеси, что предотвращает выделение тепла за счет окисления угля. Особенностью такого охлаждения является также потребление тепла инертизирующим составом при фазовых переходах, возникающих при температурах 0 °С (таяние льда) и 100 °С (испарение жидкой фазы). Поглощение тепла инертизирующими

составами при фазовых переходах совершается при постоянных температурах до полного перехода льда или жидкости соответственно в воду или пар.

Перенос тепла в угольном скоплении осуществляется за счет теплопроводности угля и потоком инертизирующего состава. С учетом вышеизложенных особенностей процесса подачи инертизирующего состава в очаг самовозгорания использовалась следующая математическая модель охлаждения предварительно разогретого угольного скопления

$$\begin{aligned}
 (1-m)\rho_1c_1 \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} (1-m) - \rho_c c_c V \frac{\partial T}{\partial x} - Q_L \rho_L \frac{\partial C_L}{\partial \tau} - Q_W \rho_W \frac{\partial C_W}{\partial \tau} ; \\
 T(x,0) &= T_H(x) ; \quad C_L(x=0, \tau=0) = C_{L0} ; \quad C_W(x=0, \tau=0) = C_{W0} ; \\
 \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha_1 (T - T_0) ; \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = \alpha_2 (T - T_0) ; \\
 \frac{\partial C_L}{\partial \tau} \Big|_{T(273K)} &= 0 ; \quad \frac{\partial C_W}{\partial \tau} \Big|_{T(373K)} = 0 \quad C_L(x=0, \tau=0) = C_W(x=0, \tau=0) = D_L ,
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

где  $c_c$  – теплоемкость инертизирующего состава, кДж/(кг·К);  $\rho_c$  – плотность инертизирующего состава, кг/м<sup>3</sup>;  $C_L$  – концентрация частиц льда в инертизирующем составе, доли ед.;  $C_W$  – концентрация частиц жидкости в инертизирующем составе, доли ед.

Расчет процесса охлаждения угольного скопления производился из условия, что таяние льда происходило только при температуре 273 К, а испарение жидкости только при температуре 373 К. Для решения уравнений (4.2) также использовался конечно-разностный метод. Параметры модели остались прежние.

#### 4.2. Исследование развития процесса самовозгорания угля после воздействия инертизирующих составов

Подача инертизирующих составов, состоящих из азота и частиц льда, в выработанное пространство со скоплениями угля, приводит к снижению концентрации кислорода в рудничной атмосфере, уменьшению температуры угля и горной породы, а также к увеличению влажности угольных скоплений за счет таяния частиц льда. Рост влажности угля вызывает повышение значений таких теплофизических параметров скопления угля, как удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и плотность.

Существенное влияние на развитие процесса самовозгорания угля оказывает концентрация кислорода в окружающем воздухе. Подача инертизирующего состава, газовой фазой которого является азот, будет приводить к снижению концентрации кислорода, что вызовет уменьшение генерации тепла в угольном скоплении и замедление процесса самонагрева вплоть до остановки роста температуры. Для оценки влияния концентрации кислорода на процесс самовозгорания использовалась система уравнений (4.1). Результаты расчета приведены на рис. 4.1, где показано изменение максимальной температуры в очаге самонагрева во времени при фильтрации через угольное скопление газа с концентрациями кислорода 20 %, 14 % и 12 %. Скорость фильтрации воздуха через скопление разрыхленного угля составляла  $2,8 \cdot 10^{-4}$  м/с.

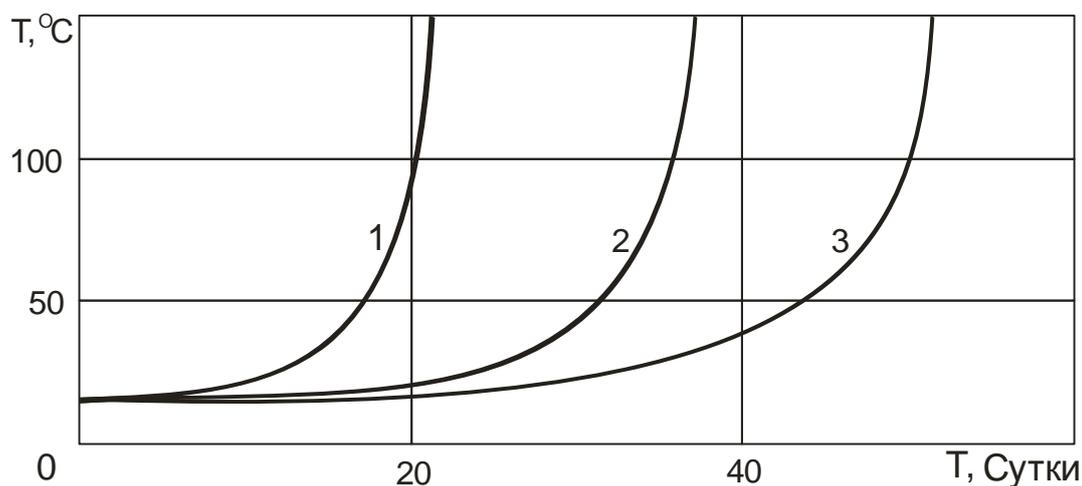


Рис. 4.1. Развитие процесса самовозгорания угля при различных концентрациях кислорода: 1 – концентрация кислорода 20 %; 2 – концентрация кислорода 14 %; 3 – концентрация кислорода 12 %

Анализ полученных результатов показывает, что снижение концентрации кислорода в воздухе позволяет существенно затормозить или предотвратить процесс самовозгорания (рис. 4.1). При уменьшении содержания кислорода в газовой среде наблюдается значительное увеличение продолжительности начальной стадии разогрева. Из результатов исследований следует, что при значениях химической активности угля, характерных для угольных пластов Кузбасса, возгорания угля в течение расчетных 100 суток не произошло при содержании кислорода в фильтрующемся газе менее 10 %. Однако с увеличением химической активности

угля для предотвращения развития процесса самовозгорания необходимо снижение концентрации кислорода до меньших значений.

Моделирование показало, что изменение концентрации кислорода в потоке воздуха оказывает влияние и на величину оптимальной скорости фильтрующегося потока газа, обеспечивающей наибольший прирост температуры. Так, оптимальная скорость газа снижается при уменьшении концентрации кислорода в газе.

Существенно влияет на процесс самовозгорания угля и величина химической активности угля по отношению к кислороду. Изменение скорости окисления угля при моделировании процесса самовозгорания угля происходило путем перемены значения константы  $K$ , входящей в уравнения (4.1), и пропорциональной числу взаимодействий между молекулами кислорода и активными центрами угля. Характер повышения температуры угля в процессе самовозгорания в зависимости от величины сорбционной активности угля приведено на рис. 4.2.

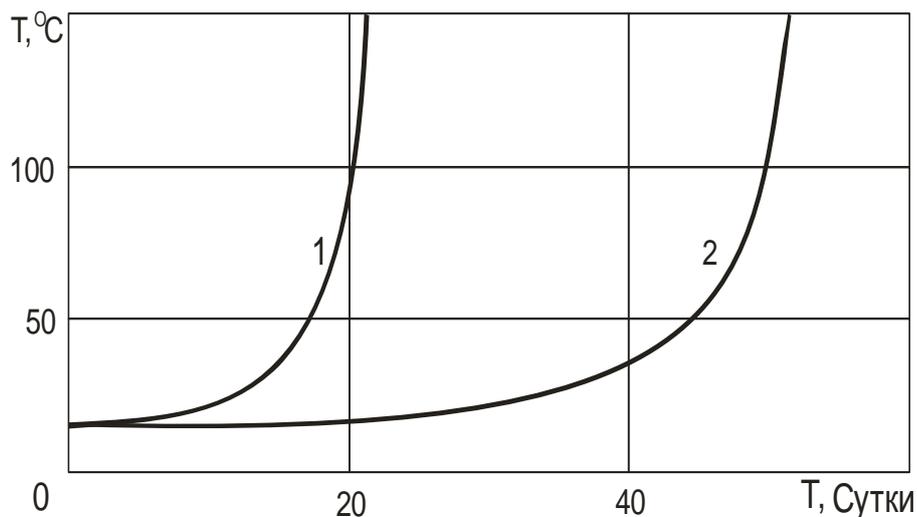


Рис. 4.2. Влияние химической активности угля на развитие процесса самовозгорания угля: 1 – константа скорости окисления  $K = 600 \text{ м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$ ; 2 –  $K = 300 \text{ м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что снижение сорбционной активности угля по отношению к кислороду после воздействия инертизирующим составом [148] является эффективным средством, для замедления процесса самовозгорания или предотвращения эндогенного пожара. Так, уменьшение сорбционной активности угля в 2 раза увеличивает длительность инкубационного периода почти в 3 раза.

Проведенные эксперименты показали, что существенно влияет на процесс самовозгорания угля изменение начальной температуры угольного скопления [149]. Одновременно с начальной температурой угля в расчетах изменялась и зависящая от нее величина химической активности угля. Изменение максимальной температуры в самовозгорающейся насыпке угля во времени при различных начальных температурах угольных скоплений приведено на рис. 4.3.

Из расчетов следует, что снижение начальной температуры угля резко замедляет начальную стадию низкотемпературного окисления. Так, уменьшение температуры в два раза (с 20 °С до 10 °С) увеличивает время разогрева до критической температуры в 4 раза. Незначительное количество тепла, выделяемое при окислении охлажденного угля, быстро рассеивается в окружающей среде, что резко увеличивает длительность инкубационного периода. В результате появляется возможность отработки подготовленных запасов угля без возникновения эндогенного пожара. В случае снижения температуры угля ниже 0 °С самовозгорания не произойдет.

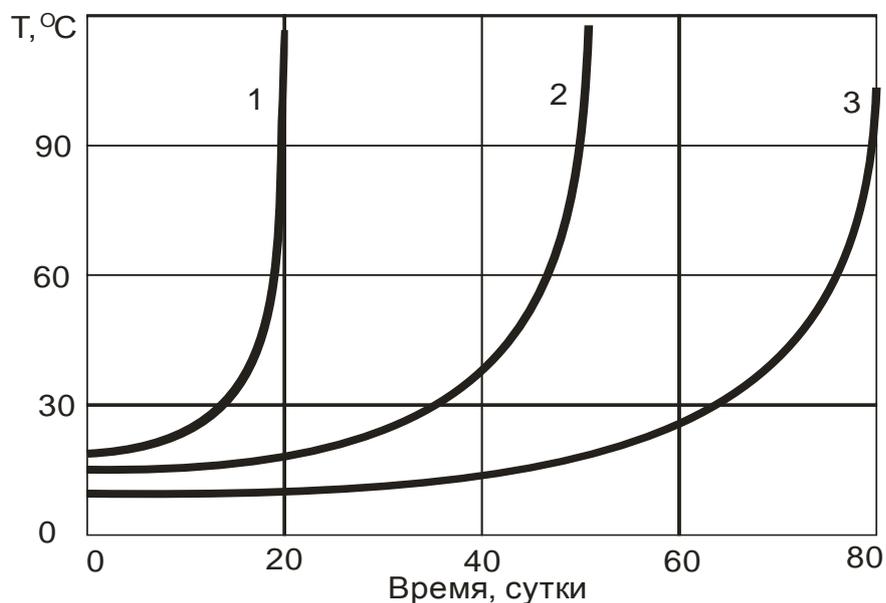


Рис. 4.3. Изменение температуры угля ( $T$ ) во времени в процессе самовозгорания: 1 – начальная температура угля 20 °С; 2 – начальная температура угля 15 °С; 3 – начальная температура угля 10 °С

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод, что охлаждение угольных скоплений резко замедляет процесс самонагрева и

может предотвратить рост температуры угля. Поэтому для предупреждения эндогенных пожаров в шахтах можно снижать температуру теряемых скоплений угля путем подачи в выработанное пространство инертных составов, содержащих частицы замороженной жидкости.

В меньшей степени на процесс самовозгорания угля влияет изменение удельной теплоемкости угля. Представленные на рис. 4.4. результаты расчета показывают, что увеличение удельной теплоемкости угольного скопления за счет увлажнения в 1,7 раза замедляет процесс самонагрева только в 1,5 раза.

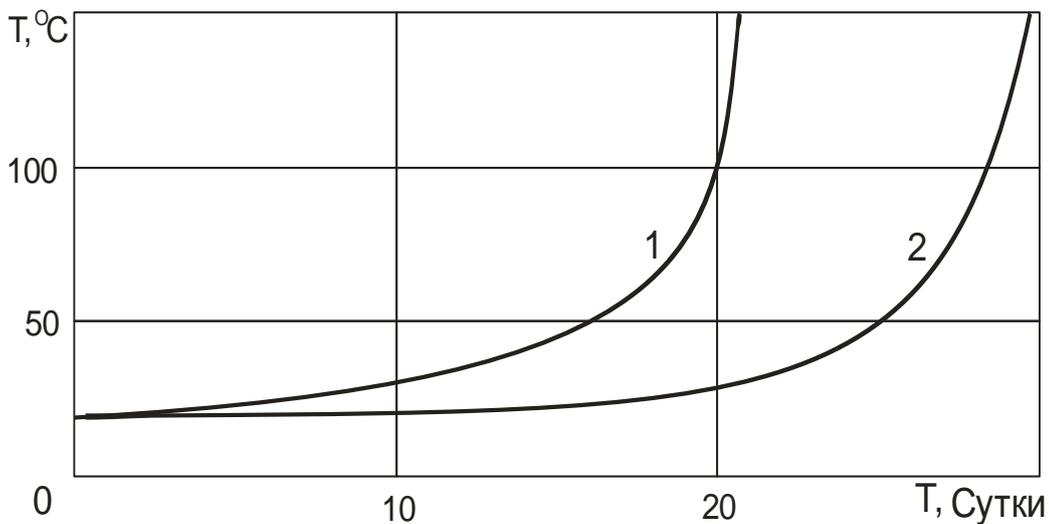


Рис. 4.4. Влияние удельной теплоемкости угля на процесс самовозгорания угля: 1 – удельная теплоемкость угля равна 1 кДж/(кг·К); 2 – удельная теплоемкость угля равна 1,7 кДж/(кг·К)

Расчеты показали, что изменение коэффициента теплопроводности угольного скопления, увеличивающегося при добавке жидкости, незначительно влияет на процесс самовозгорания. Данный факт свидетельствует, что основные потери тепла из скопления угля осуществляются за счет конвекции. Увеличение влажности угольного скопления также замедляет длительность процесса самовозгорания. Рост температуры угля прекращался при температуре испарения до полного выпаривания влаги, затем продолжается нагревание.

Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют о целесообразности и эффективности применения инертнизации атмосферы выработанного пространства для предотвращения развития самовозгорания угля. В случае тушения уже возникшего очага пожара, подача инертизирующего состава должна

осуществляться из условия снижения концентрации кислорода ниже 12 %, что предотвратит взрыв возникающих скоплений метана.

Инертизацию атмосферы выработанного пространства целесообразно проводить подачей инертизирующего состава в поток воздуха, поступающего в выработанное пространство. Чистота получаемого азота обычно может колебаться от 90 до 100% в зависимости от оборудования. Поэтому содержание кислорода в образуемой смеси газов зависит от соотношения расходов воздуха и подаваемого инертизирующего состава. Концентрацию кислорода в выработанном пространстве можно определить по выражению

$$C = \frac{G_B C_B + G_A C_A}{G_B + G_A}, \quad (4.3)$$

где  $C_A$ ,  $C_B$  – концентрация кислорода соответственно в поступающем в выработанное пространство воздухе и подаваемом азоте;  $G_A$ ,  $G_B$  – расход соответственно азота и воздуха, м<sup>3</sup>/с.

Величина концентрации кислорода получаемой газовой смеси в зависимости от соотношения расходов азота и воздуха представлена на рис. 4.5.

Приведенные на рис. 4.5 данные позволяют выбрать расход инертизирующего состава в зависимости от чистоты исходного азота и количества поступающего в выработанное пространство воздуха для создания взрывобезопасной атмосферы и предотвращения самовозгорания угля.

Реальная концентрация кислорода в выработанном пространстве будет снижаться за счет дополнительного выделения метана из угля и вмещающих пород. Определить содержание кислорода в выработанном пространстве в случае выделения метана можно по формуле

$$C = \frac{G_B C_B + G_A C_A}{G_B + G_A + G_M}, \quad (4.4)$$

где  $G_M$  – интенсивность выделения метана в выработанном пространстве, м<sup>3</sup>/с.

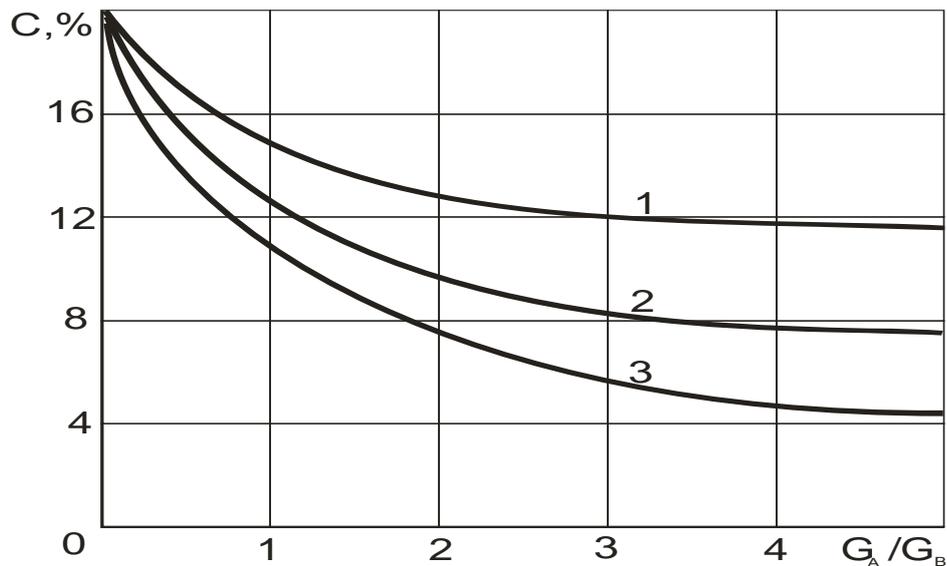


Рис. 4.5. Изменение концентрации кислорода в выработанном пространстве (C) в зависимости от соотношения расхода инертизирующего состава ( $G_A$ ) к расходу воздуха ( $G_B$ ): 1 – чистота исходного азота 90 %; 2 – чистота азота 95 %; 3 – чистота азота 99 %

Таким образом, проведенные исследования показали, что применение инертизирующих составов, состоящих из азота и частиц льда, позволяет предотвратить развитие самовозгорания угля [150-152]. Наиболее важными факторами, позволяющими значительно замедлить процесс самовозгорания угля, являются снижение температуры угля, падение концентрации кислорода в рудничной атмосфере и уменьшение химической активности угля. Менее значимыми факторами замедления процесса самовозгорания являются увеличение удельной теплоемкости, влажности и коэффициента теплопроводности угольного скопления.

Наибольшее влияние на процесс самовозгорания угля оказывает начальная температура скопления. Так, снижение температуры угольного скопления до значений 0–5 °С путем подачи инертизирующего состава позволяет полностью предотвратить развитие самовозгорания угля. Повышение температуры скопления угля за счет окисления кислородом воздуха возможно только после прогрева угля до 5–20 °С за счет теплообмена с окружающей средой. Длительность такого прогрева будет зависеть от скорости фильтрующегося воздуха, его температуры, влажности, естественной температуры окружающих горных пород, их теплофизи-

ческих параметров, а также от размеров охлажденной подачи инертизирующего состава зоны.

#### **4.3. Тушение очагов самовозгорания угля инертизирующими составами**

Подача инертизирующего состава, состоящего из инертного газа и частиц льда, через очаг самовозгорания в угольном скоплении приводит к интенсивному теплосъему от угля. Отнимаемое от разогретого угля тепло используется на подогрев инертного газа и частиц льда, затем, при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , - на фазовый переход частиц льда в жидкое состояние [153-155]. При более высоких температурах происходит подогрев газа и частиц образовавшейся жидкости. В областях, прогретых более  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , идет интенсивное поглощение тепла на испарение жидкой фазы.

В процессе моделирования использовалось одномерное угольное скопление размером 4 м. Для разогрева угольного скопления вначале осуществлялась подача воздуха, способствующая окислению угля с выделением тепла. При расчете процесса самовозгорания угля использовалась система уравнений (4.1). Скорость фильтрации воздуха через скопление разрыхленного угля составляла  $2,8 \cdot 10^{-4}$  м/с. После достижения в эпицентре очага температуры  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  температурное поле фиксировалось. Затем начиналась подача через скопление угля инертизирующего состава.

Расчет изменения температуры в угольном скоплении осуществлялся с использованием системы уравнений (4.2), учитывающих теплообмен между углем и газообразным азотом, содержащим частицы замерзшей жидкости. При температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  происходил фазовый переход частиц льда из твердого состояния в жидкое с поглощением необходимого количества тепла.

В процессе исследования оценивались хладагентное действие инертизирующих составов, подаваемых с различной скоростью через угольное скопление. Также изучалось влияние на процесс охлаждения угля изменение начальной температуры инертизирующих составов и соотношения расходов жидкого азота и воды, совместно распыляемых для получения хладагента. подача инертного

состава прекращалась при достижении максимальной температуры угольного скопления менее 20 °С.

Для оценки скорости подачи инертизирующего состава на температуру предварительно разогретого угольного скопления осуществлялось моделирование процесса охлаждения инертизирующим составом с температурой -100 °С, полученным при соотношении (массовом) распыляемого жидкого азота и воды, равном 2,1. Скорость подачи инертизирующего состава в скопление угля варьировалась в пределах от  $10^{-2}$  м/с до 1,0 м/с. Так, на рис. 4.6 показано распределение температуры в скоплении угля в различные моменты времени в результате подачи инертизирующего состава, состоящего из газообразного азота и частиц льда. Скорость подачи инертизирующего состава в течение всего процесса охлаждения составляла 0,01 м/с.

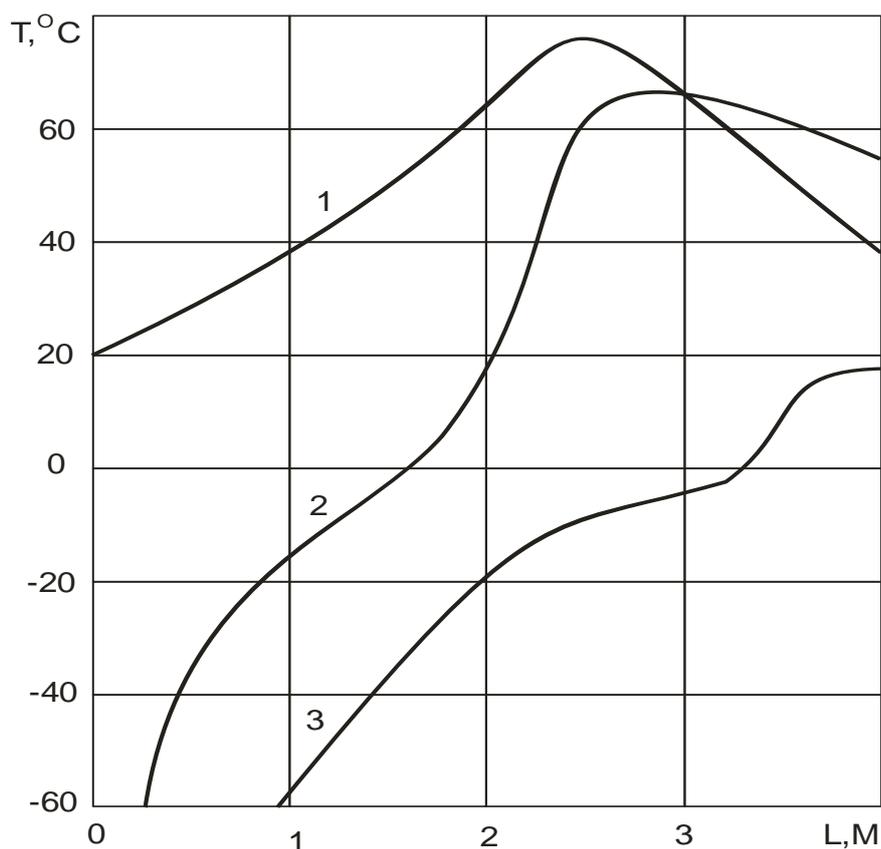


Рис. 4.6 . Изменение температуры угольного скопления (Т) при подаче инертизирующего состава с начальной температурой -100 °С со скоростью  $10^{-2}$  м/с: 1 – начальное состояние; 2 – через 21 час; 3 – через 55 часов

На рис. 4.7 представлено распределение температур в скоплении угля в различные моменты времени при подаче инертизирующего состава, получаемого

при перемешивании воды и жидкого азота с начальной температурой  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Скорость движения инертного состава с частицами льда в порах и трещинах угольного скопления равнялась  $0,1\text{ м/с}$ .

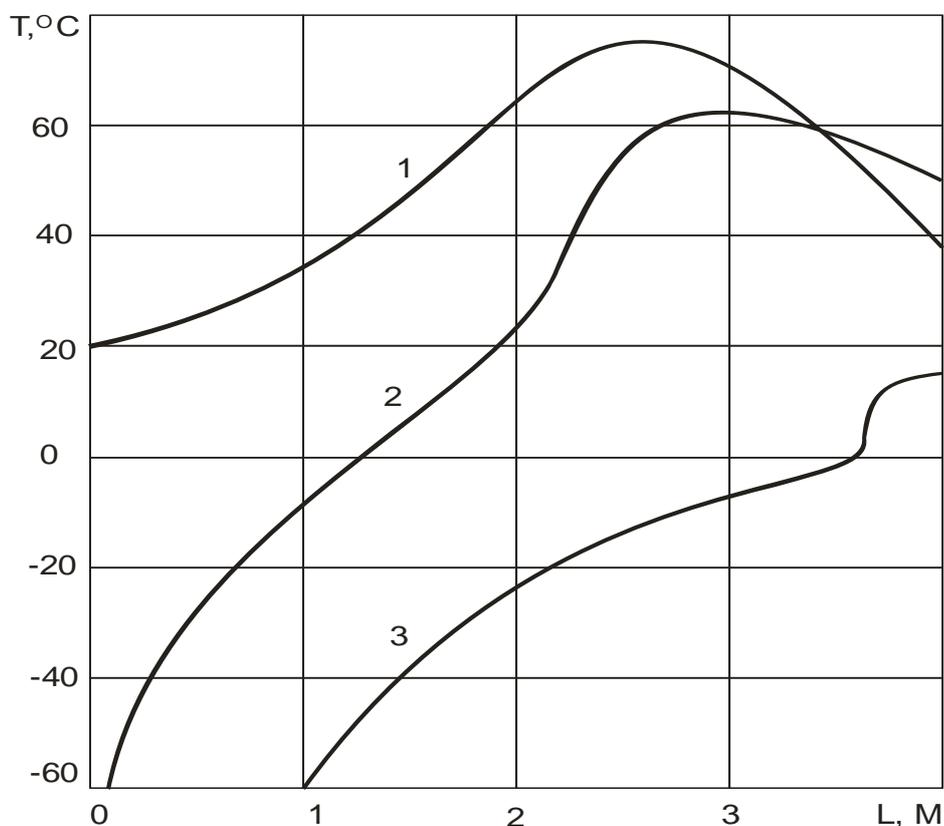


Рис. 4.7. Охлаждение скопления инертизирующим составом с температурой  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , подаваемым со скоростью  $0,1\text{ м/с}$ : 1 – начальное состояние; 2 – через 2 часа; 3 – через 6 часов

На рис. 4.8 показано изменение температуры в скоплении угля в случае подачи инертизирующего состава с теми же параметрами, но со скоростью  $1,0\text{ м/с}$ .

Сравнение результатов расчета, приведенных на рис 4.6–4.8, показывает, что увеличение скорости подачи инертизирующего состава существенно сокращает длительность охлаждения угольного скопления. Однако общее количество инертизирующей смеси, необходимой для охлаждения угольного скопления, в этом случае, практически не меняется. Конечное распределение температуры в охлажденном скоплении угля также сопоставимо.

В следующей серии расчетов оценивалось влияние начальной температуры инертизирующего состава, получаемого при смешивании воды и жидкого азота, на длительность охлаждения и распределение температуры в угольном скоплении. Температура состава варьировалась в интервале от  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  путем изменения соотношения расходов воды и жидкого азота при их совместном распылении. Скорость движения инертизирующего состава через угольное скопление составила в этих исследованиях  $0,1\text{ м/с}$ .

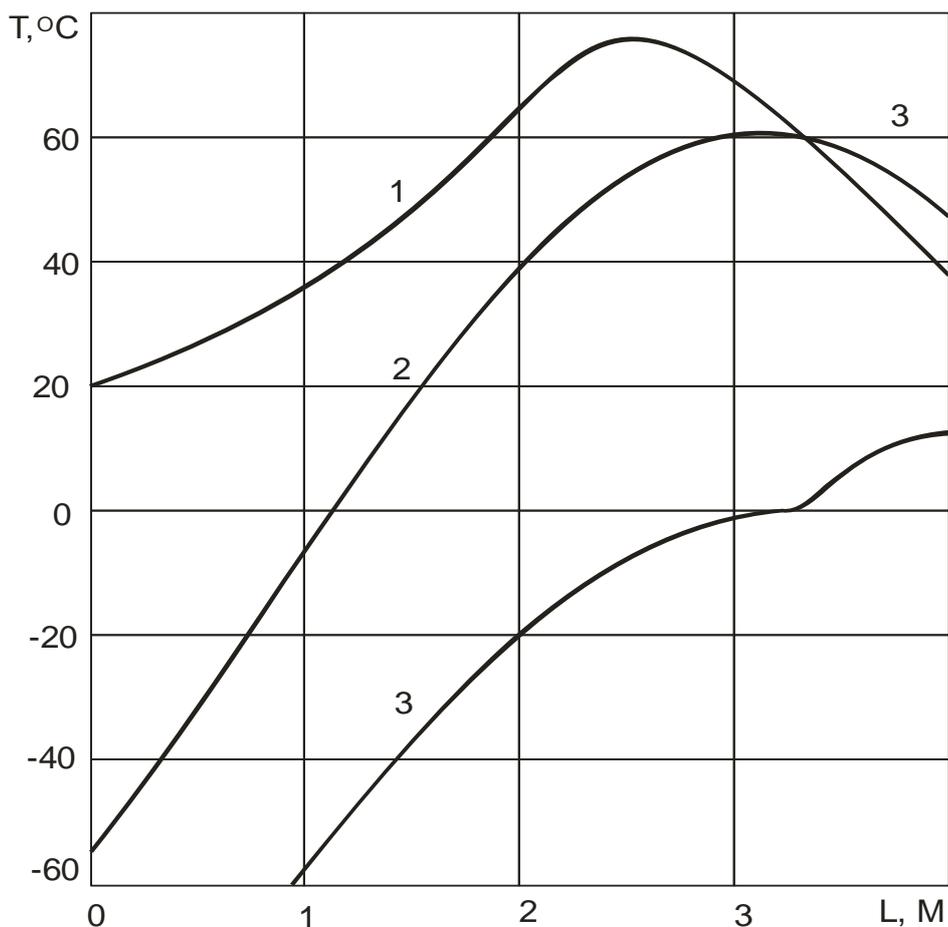


Рис. 4.8. Изменение температуры угольного скопления (Т) при подаче инертизирующего состава с температурой  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  со скоростью  $1\text{ м/с}$ : 1 – начальная температура;  
2 – через  $0,25$  часа; 3 – через  $0,75$  часа

При повышении температуры образуемого инертизирующего состава от  $-196$  до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  увеличивается доля замерзшей воды в инертизирующем составе. Так, при получении состава с температурой  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  масса азота в единице объема инертного состава больше в  $4,15$  раза массы частиц замерзшей воды. В составе с температурой  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  масса азота в единице объема в  $2,1$  раза больше, чем масса

замерзших частиц воды. При температуре  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  соотношение масс азота и частиц льда в единице инертизирующего состава составляет 1,4.

На рис. 4.9 показано распределение температуры в угольном скоплении при подаче инертизирующего состава с температурой  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$

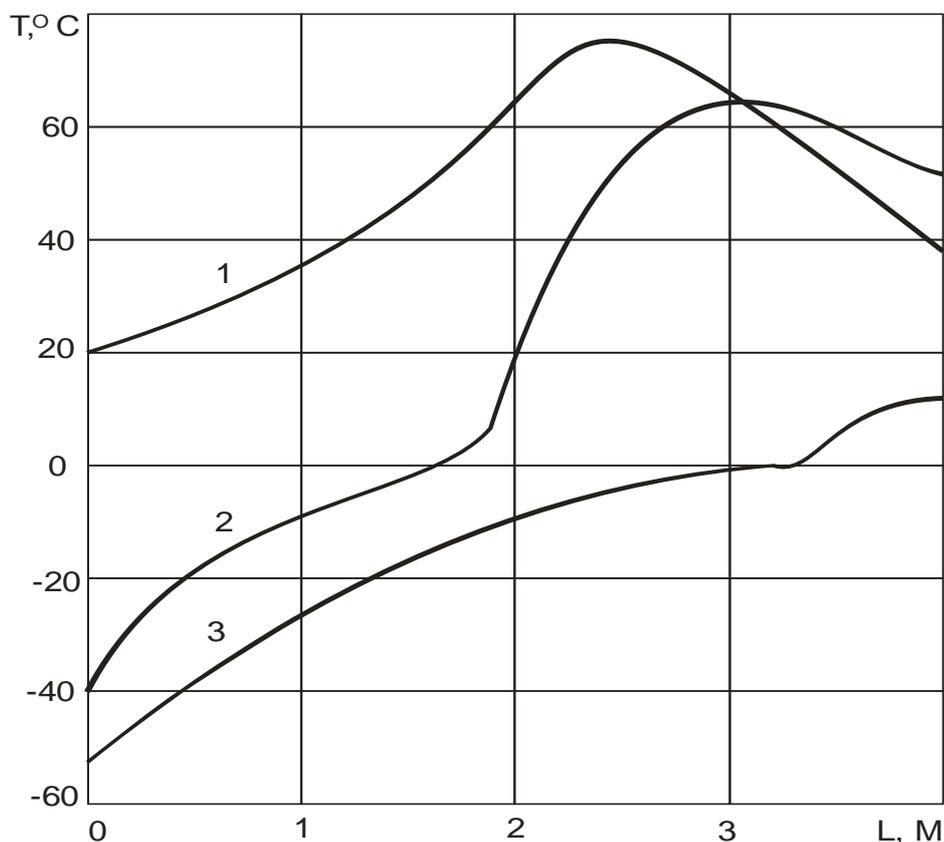


Рис. 4.9. Изменение температуры скопления угля ( $T$ ) при подаче инертизирующего состава с температурой  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  со скоростью  $0,1\text{ м/с}$ : 1 – начальное состояние; 2 – через 2 часа; 3 – через 4.5 часа

На рис. 4.10 представлено распределение температуры в различные моменты времени при охлаждении скопления угля инертизирующим составом на основе жидкого азота и воды с исходной температурой  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Сопоставление данных, приведенных на рис. 4.7, 4.9 и 4.10 показывает, что снижение температуры инертизирующего состава за счет уменьшения доли льда в составе, увеличивает время охлаждения угольного скопления. Так, для снижения температуры угольного скопления менее  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  необходимо около 4,5 часа при подаче инертного состава с температурой  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Снижение температуры состава до  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  требует увеличения длительности подачи хладагента 6,0 часов. Подача

инертизирующего состава с температурой  $-196^{\circ}\text{C}$  способствует росту времени подачи до 8,0 часов. Однако средняя температура угольного скопления в случае уменьшения температуры инертизирующего состава снижается.

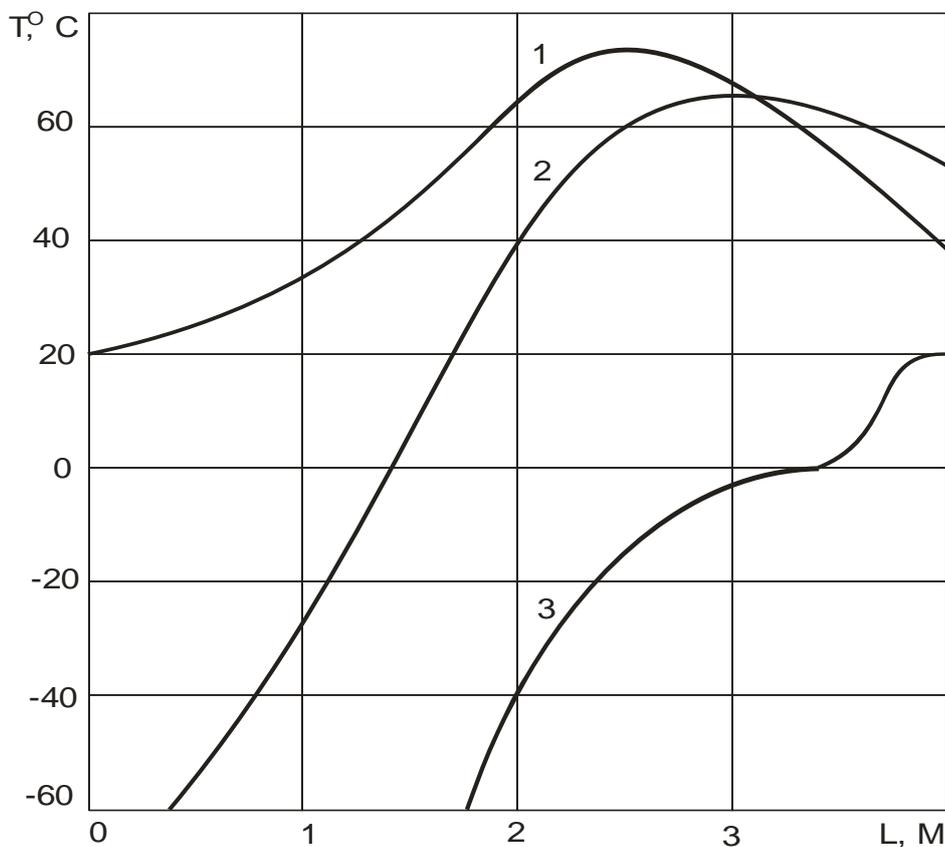


Рис. 4.10. Изменение температуры угольного скопления ( $T$ ) при подаче инертизирующего состава с температурой  $-196^{\circ}\text{C}$  со скоростью  $0,1\text{ м/с}$ : 1 – начальное состояние;  
2 – через 2,5 часа; 3 – через 8 часов

На рис. 4.11 приведено изменение температуры угольного скопления при подаче инертизирующего состава с начальной температурой  $-100^{\circ}\text{C}$ , полученного при перемешивании распыленного жидкого азота и водяного пара с исходной температурой  $100^{\circ}\text{C}$ . Массовое соотношение азота к пару в единице объема составляло 10,94. Скорость подачи инертизирующего состава через угольное скопление равнялась  $0,1\text{ м/с}$ .

Анализируя данные, приведенные на рис. 4.7 и 4.11, можно сделать вывод, что при прочих равных параметрах подаваемых инертизирующих составов, использование водяного пара вместо воды для совместного распыления с жидким

азотом существенно ухудшает хладагентное действие инертизирующего состава. Так, если для охлаждения разогретого угольного скопления инертизирующим составом на основе воды и жидкого азота потребовалось 6,0 часов подачи, то использование водяного пара увеличило длительность подачи хладагента до 15,5 часов. Причем средняя температура охлажденного угольного скопления изменилась незначительно.

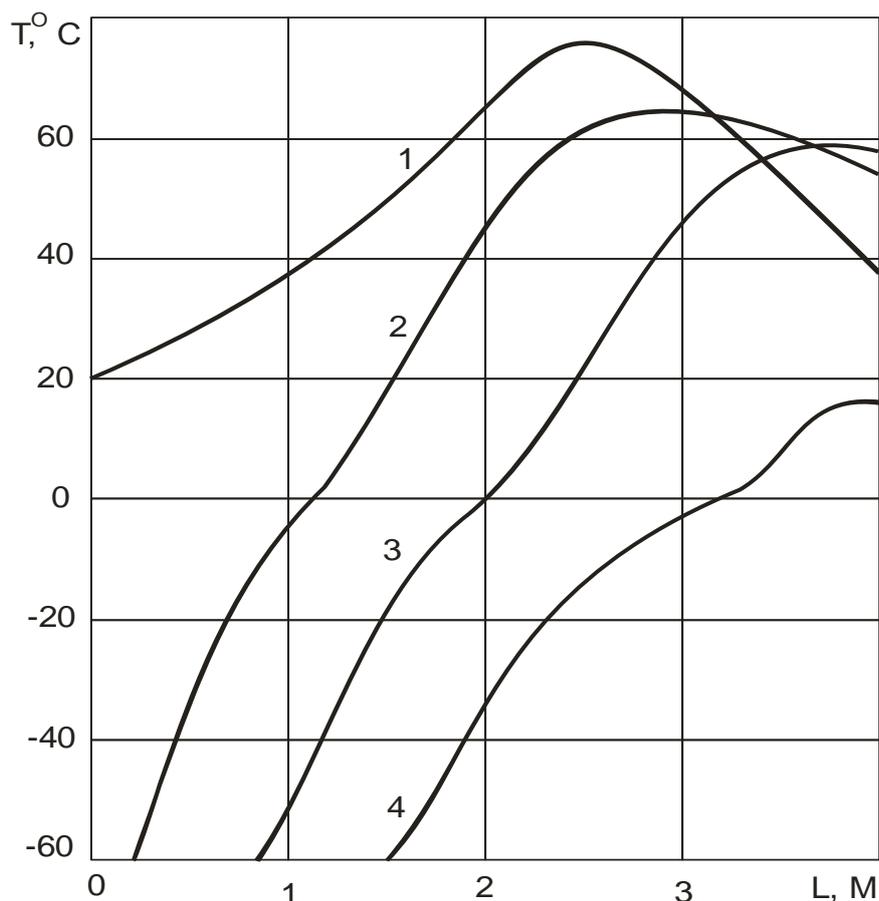


Рис. 4.11. Изменение температуры угольного скопления (Т) при подаче инертизирующего состава на основе пара и жидкого азота с температурой  $-100^{\circ}\text{C}$  со скоростью  $0,1\text{ м/с}$ : 1 – начальное состояние; 2 – через 4 часа; 3 – через 9 часов; 4 – через 15,5 часа

Однако применение пара вместо воды может дать и некоторые преимущества при использовании инертизирующих составов для борьбы с пожарами, возникающими в выработанном пространстве угольных шахт. Превосходство инертизирующего состава, получаемого при совместном распылении водяного пара и жидкого азота заключается в получении частиц льда малого размера, что повышает транспортные возможности хладагента. Размер

распыляемой воды в значительной степени зависит от давления подаваемой жидкости, конструкции форсунки, поэтому не всегда можно получить частицы льда с размером, позволяющим им транспортироваться потоком газа на значительные расстояния.

Инертизирующий состав, получаемый из пара и жидкого азота, позволяет получить за счет конденсации и последующего замораживания частицы льда незначительного размера. Благодаря небольшому диаметру частиц льда состав можно подавать в выработанном пространстве на большие расстояния.

На рис. 4.12 приведено изменение максимальной температуры угольного скопления при подаче инертизирующих составов на основе воды и жидкого азота с различными исходными температурами.

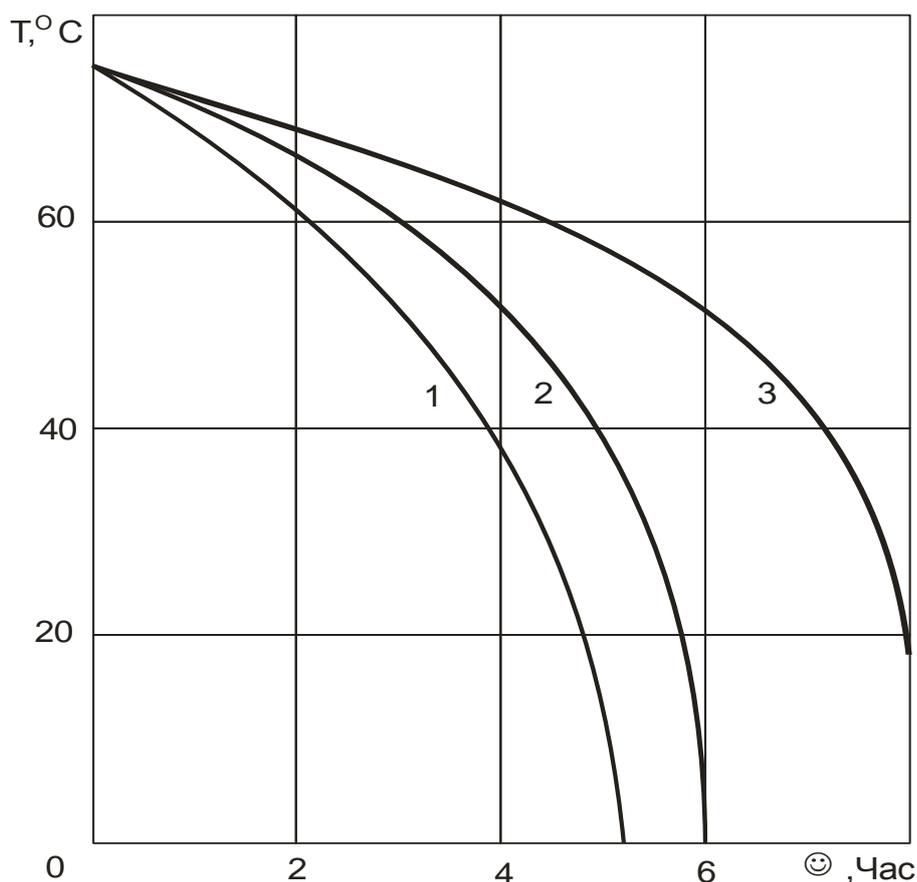


Рис. 4.12. Изменение максимальной температуры скопления (Т) во времени (τ) при подаче инертизирующего состава: 1 – с начальной температурой  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2 – с начальной температурой  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3 – с начальной температурой  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$

Приведенные данные показывают, что вначале подачи инертизирующих составов температура угольного скопления понижается медленно. Причем чем ниже начальная температура инертизирующего состава, тем медленнее снижается максимальная температура угля. Постепенно скорость падения температуры угольного скопления увеличивается, достигая максимума в конце подачи инертизирующего состава.

На рис. 4.13 показана длительность охлаждения разогретого угольного скопления в зависимости от исходной температуры инертизирующего состава, полученного при совместном распылении воды и жидкого азота. Приведенные данные показывают, что для повышения эффективности охлаждения угля целесообразно использовать инертизирующие составы с более высокой исходной температурой. Повышение температуры инертизирующих составов необходимо достигать за счет увеличения доли частиц льда в инертном газе. Повышение температуры исходной воды, приводящее к росту температуры получаемого инертизирующего состава, не приводит к сокращению времени тушения очага самовозгорания угля.

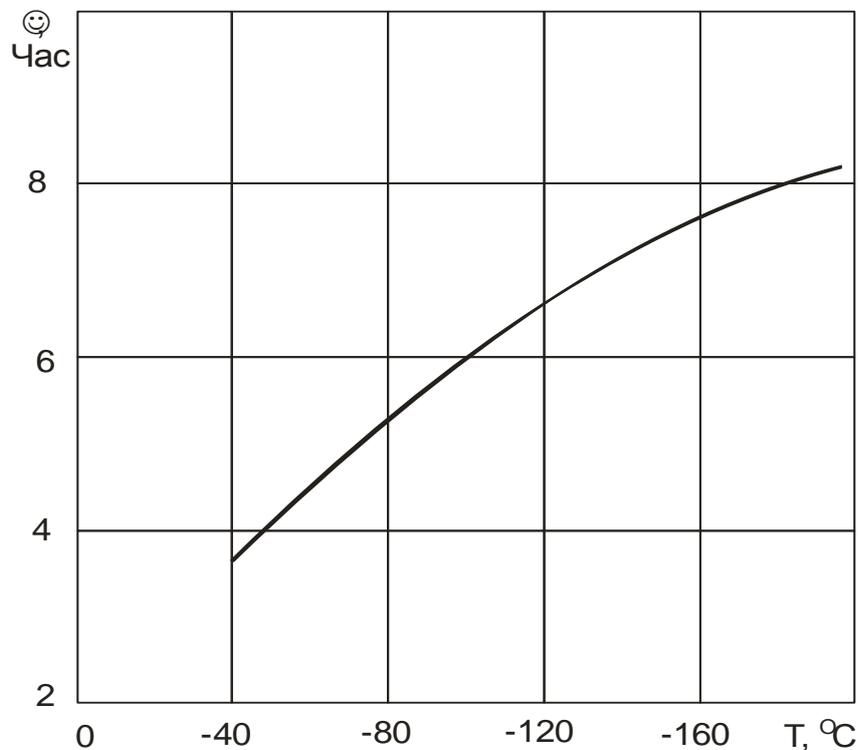


Рис. 4. 13. Длительность остывания скопления ( $\tau$ ) в зависимости от начальной температуры инертизирующего состава (T)

Влияние соотношения расходов жидкого азота и воды при получении инертизирующего состава на длительность охлаждения разогретого угольного скопления представлено на рис. 4.14. Приведенные данные показывают, что увеличение доли азота в инертизирующем составе вызывает рост длительности процесса охлаждения угольного скопления. Поэтому для повышения эффективности охлаждения очагов самовозгорания целесообразно путем увеличения расхода воды при образовании инертизирующего состава. Повысить долю частиц льда в инертизирующем составе можно также путем снижения исходной температуры воды, используемой для получения состава путем совместного распыления с жидким азотом.

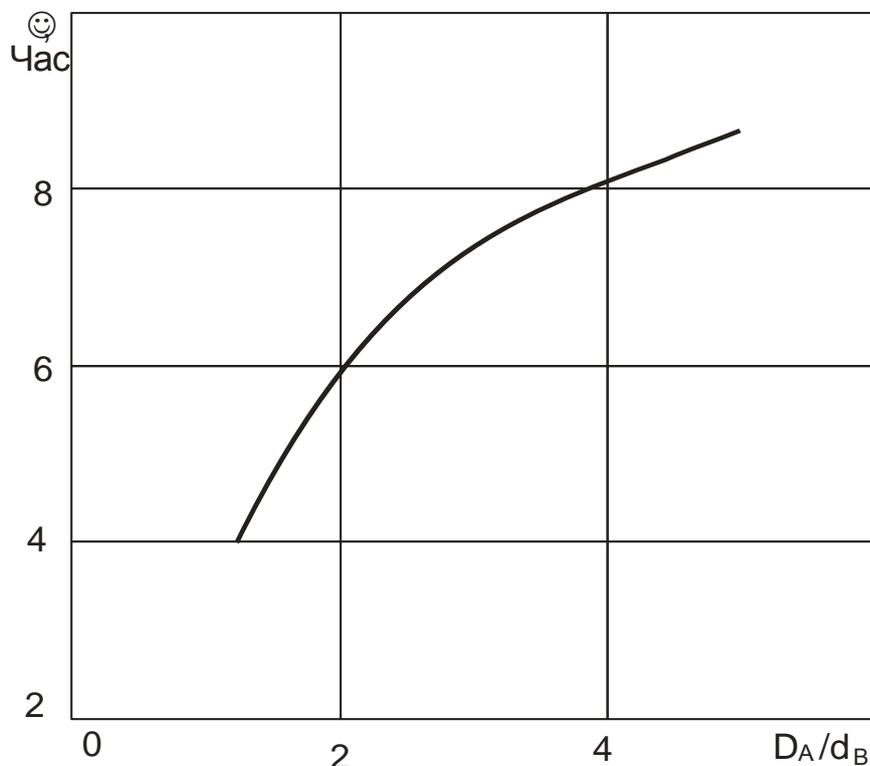


Рис. 4.14. Изменение времени охлаждения угольного скопления ( $\tau$ ) от соотношения расхода жидкого азота ( $D_A$ ) и воды ( $d_B$ ) при получении инертизирующего состава

Зависимость длительности охлаждения угольного скопления от логарифма скорости фильтрации инертизирующего состава через уголь приведена на рис. 4.15. Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что увеличение скорости фильтрации инертизирующего состава через уголь резко уменьшает длительность охлаждения предварительно разогретого угольного скопления.

Одновременно с ростом скорости газа возрастает и дальность транспортирования частиц льда в выработанном пространстве угольных шахт.

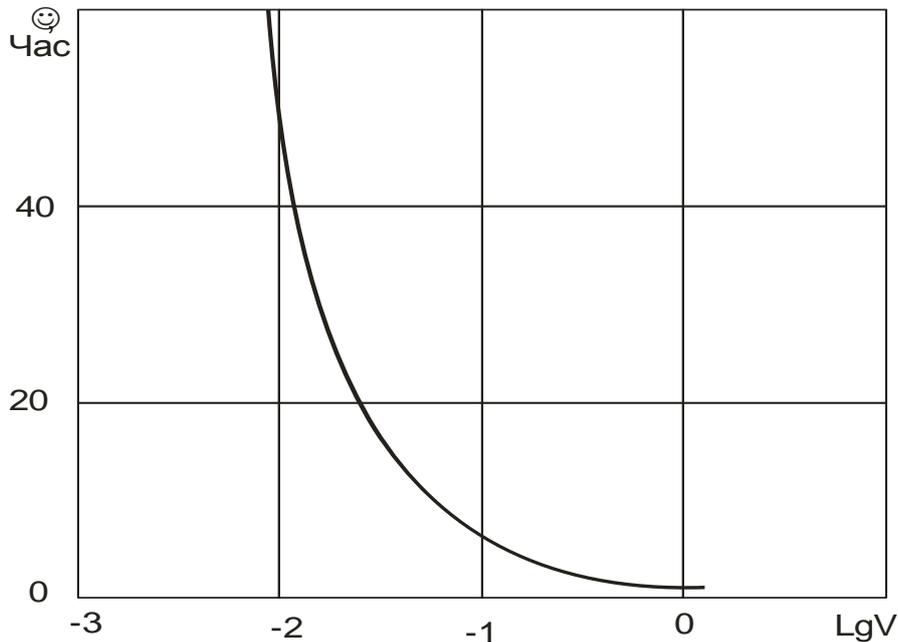


Рис. 4.15. Влияние скорости фильтрации инертизирующего состава (V) через скопление угля на длительность охлаждения очага (τ)

### Выводы

1. Увеличение скорости фильтрации инертизирующего состава через разрыхленный уголь существенно интенсифицирует процесс охлаждения угля. Однако расход инертизирующего состава, необходимого для охлаждения угольного скопления, при изменении скорости хладагента практически остается постоянным.

2. Снижение начальной температуры инертизирующего состава за счет сокращения доли частиц льда в единице объема состава увеличивает продолжительность охлаждения разогретого угольного скопления. Так, рост доли инертного газа в составе в 2,96 раза (с 1,4 до 4,15) приводит к повышению длительности охлаждения в 1,78 раза (с 4,5 до 8,0 суток).

3. Применение водяного пара вместо жидкости для получения инертизирующего состава существенно снижает хладагентное действие состава. Причиной является снижение доли частиц льда в составе при одинаковой начальной температуре. Например, в инертизирующем составе с температурой  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  доля

азота увеличивается в 5, 2 раза при замене воды на водяной пар (с 2,1 для состава на основе жидкости до 10,94 для состава с использованием водяного пара).

4. Снижение температуры исходной воды, используемой для получения инертизирующего состава, увеличивает долю частиц льда в хладагенте при одинаковой температуре состава и повышает эффективность тушения.

5. Подача инертизирующего состава приводит к существенному снижению температуры ранее разогретого угольного скопления, что снижает опасность развития процесса самовозгорания угля после прекращения подачи хладагента и восстановления утечек воздуха.

## 5. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИНЕРТИЗИРУЮЩИХ СОСТАВОВ И СХЕМЫ ИХ ПОДАЧИ

### 5.1. Параметры инертизирующих составов при распространении в выработанном пространстве

Поступление инертизирующего состава в очаг самовозгорания угля в выработанном пространстве шахт может быть обеспечено через скважины, пробуренные с земной поверхности или из близлежащих действующих горных выработок. Для предотвращения отравления людей токсичными продуктами горения пожарный участок обычно изолируют от действующих горных выработок с помощью перемычек. В результате прекращения утечек воздуха в разрыхленном угле будет поддерживаться одинаковое давление газа. Поэтому подаваемый инертизирующий состав будет равномерно распространяться в выработанном пространстве шахты вокруг точки подачи [156]. По мере удаления от точки подачи скорость инертизирующего состава будет уменьшаться. В случае равновероятного распространения по всем направлениям от точки подачи скорость инертизирующего состава можно описать уравнением

$$v = \frac{Q}{S}, \quad (5.1)$$

где  $Q$  – расход подаваемого в скважину инертизирующего состава,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $S$  – поверхность сферы,  $\text{м}^2$ .

Поверхность сферы в зависимости от ее радиуса описывается уравнением

$$S_c = 4\pi R^2, \quad (5.2)$$

где  $R$  – расстояние от точки подачи инертизирующего состава до поверхности сферы, м.

Учитывая, что инертизирующий состав распространяется только по пустотам выработанного пространства, необходимо ввести в уравнение (5.1) коэффициент пористости скопления. В этом случае уравнение (5.1) примет вид

$$v = \frac{Q}{4\pi R^2 \Pi}, \quad (5.3)$$

где  $\Pi$  – пористость скопления угля и пород в выработанном пространстве шахты.

Зависимость скорости инертизирующего состава в выработанном пространстве шахты при пористости 0,4 от расстояния до точки подачи, рассчитанная по формуле (5.3), приведена на рис. 5.1.

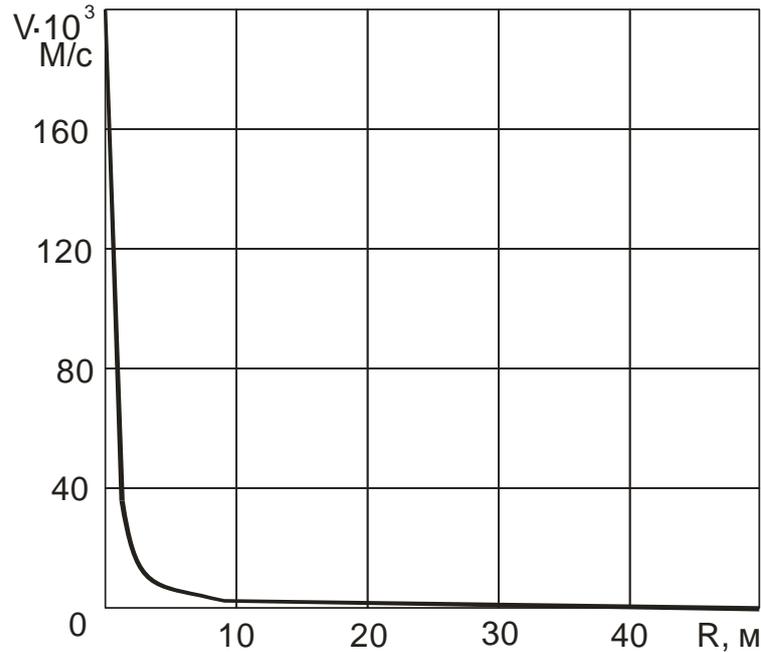


Рис. 5.1 Изменение скорости инертизирующего состава ( $V$ ) в зависимости от расстояния от точки подачи ( $R$ )

Длительность движения инертизирующего состава на определенное расстояние в случае распространения из точки подачи по сфере можно определить из уравнения

$$\tau = \frac{R}{v}. \quad (5.4)$$

Подставляя уравнение (5.3) в (5.4) получаем

$$\tau = \frac{4\pi R^3 \Pi}{Q}. \quad (5.5)$$

Длительность движения инертизирующего состава в выработанном пространстве в зависимости от расстояния от точки подачи, определенная по уравнению (5.5), представлено на рис. 5.2. Пористость скопления горных пород и угля равна 0,4.

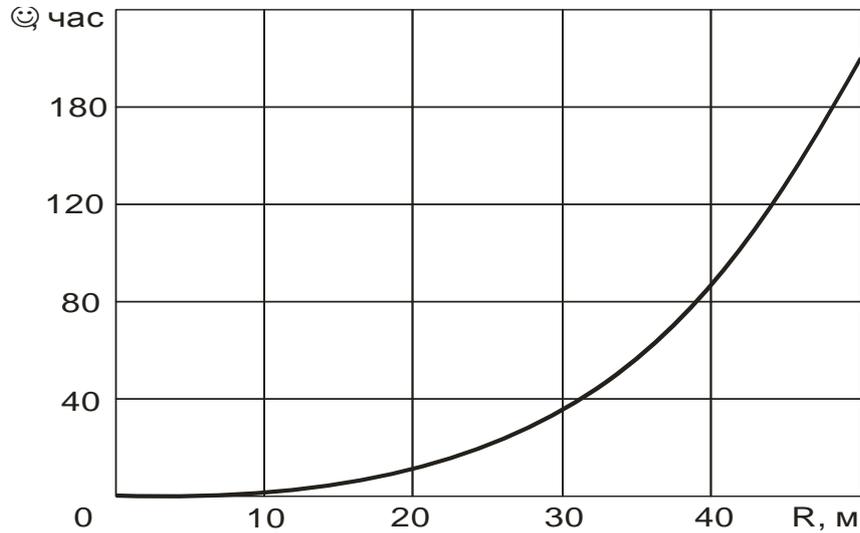


Рис. 5.2 Длительность движения инертизирующего состава ( $\tau$ ) по выработанному пространству в зависимости от расстояния от точки подачи ( $R$ )

В реальных шахтных условиях трубопровод для подачи инертизирующего состава может находиться на почве отработанного пласта. Ненарушенная горная порода в почве пласта не имеет пустот для движения инертизирующего состава. В этом случае инертизирующий состав будет распространяться от точки подачи в полусфере (рис. 5.3), а формулы для расчета скорости движения инертизирующего состава и время достижения расстояния  $R$  принимают следующий вид

$$v_{\Pi} = \frac{Q}{2\pi R^2 \Pi} \quad (5.6)$$

$$\tau_{\Pi} = \frac{2\pi R^3 \Pi}{Q} \quad (5.7)$$

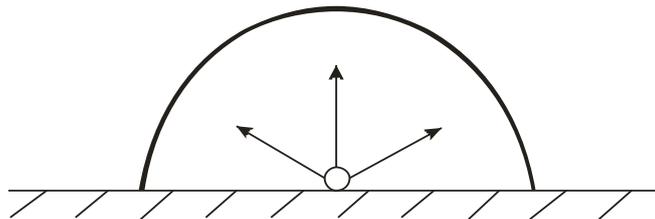


Рис. 5.3. Движение инертизирующего состава в полусфере в случае его подачи на почву отработанного пласта

Одним из вариантов распространения инертизирующего состава в скоплении угля и пород является четверть сферы. Такой вариант реализуется в случае расположения подающего трубопровода на почве пласта у целика, ограничивающего выработанное пространство (рис. 5.4). В этом случае уравнения для расчета скорости движения инертизирующего состава и продолжительность движения принимают вид

$$v_{\text{ч}} = \frac{Q}{\pi R^2 \Pi} \quad (5.8)$$

$$\tau_{\text{ч}} = \frac{\pi R^3 \Pi}{Q} \quad (5.9)$$

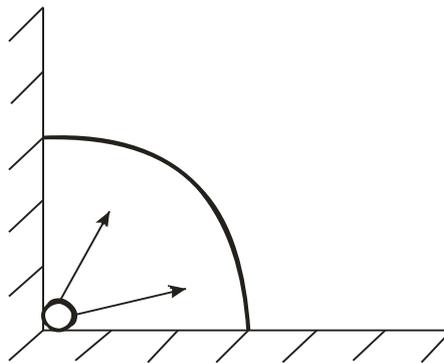


Рис. 5.4. Подача инертизирующего состава из точки, располагаемой на почве отработанного пласта у сохраненного целика

Изменение скорости движения инертизирующего состава в зависимости от расстояния от точки подачи в выработанном пространстве различной конфигурации, приведено на рис. 5.5.

Приведенные на рис. 5.5 данные показывают, что скорости инертизирующих составов в пористой среде существенно изменяются в зависимости от конфигурации выработанного пространства на расстоянии до 5–7 м от точки выхода в разрыхленное скопление. Для объема в четверть сферы скорость потока существенно больше, чем для полусферы, особенно вблизи от точки выхода из трубопровода. При дальнейшем удалении от места выхода в выработанное простран-

ство различной конфигурации разница в скоростях инертизирующего состава постепенно сглаживается, и на расстоянии около 40 м практически исчезает.

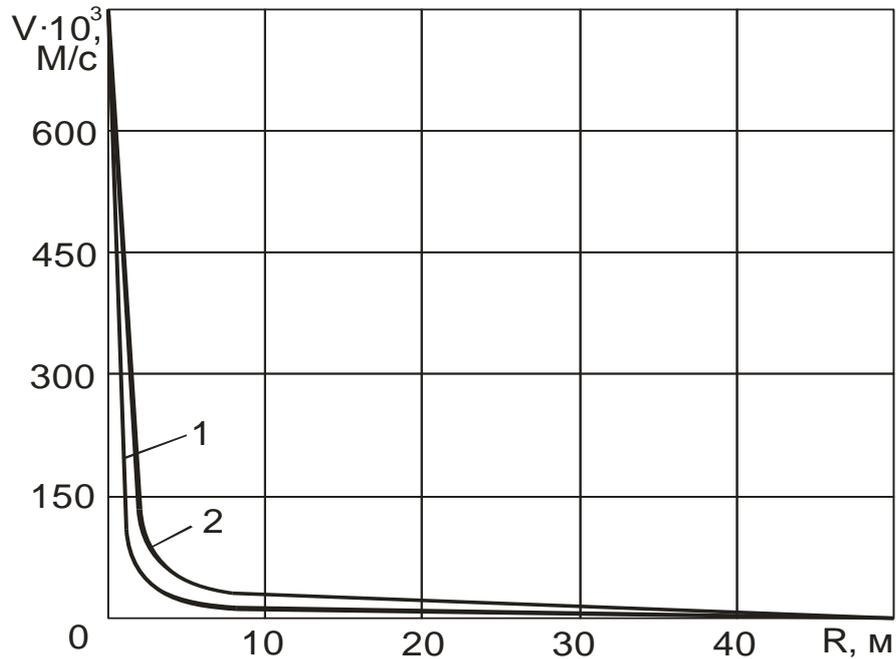


Рис. 5.5. Скорость движения инертизирующего состава ( $V$ ) в зависимости от расстояния ( $R$ ) от точки подачи в выработанном пространстве различной конфигурации: 1 – в виде полусферы; 2 – в виде четверти сферы

Длительность движения инертизирующего состава в выработанном пространстве на различные расстояния от точки подачи при различной конфигурации выработанного пространства, приведена на рис. 5.6. Пористость выработанного пространства принята равной 0,4.

Рассмотренные варианты движения инертизирующего состава в выработанном пространстве реализуются в случае отсутствия потоков фильтрующегося воздуха в скоплении угля и пород. В реальных случаях в выработанном пространстве могут быть сформированы потоки газа, возникающие из-за низкого качества изолирующих сооружений при сохраняющейся разности давлений газа в горных выработках, в случае подачи воздуха, инертного газа. Нагнетание инертизирующего состава в перемещающиеся в выработанном пространстве утечки воздуха приведет к возмущению этого движения. В результате возникнут радиальные потоки подаваемого азота с частицами льда от

точки его выхода, в том числе навстречу фильтрующемуся газу и перпендикулярно вектору его движения (рис. 5.7).

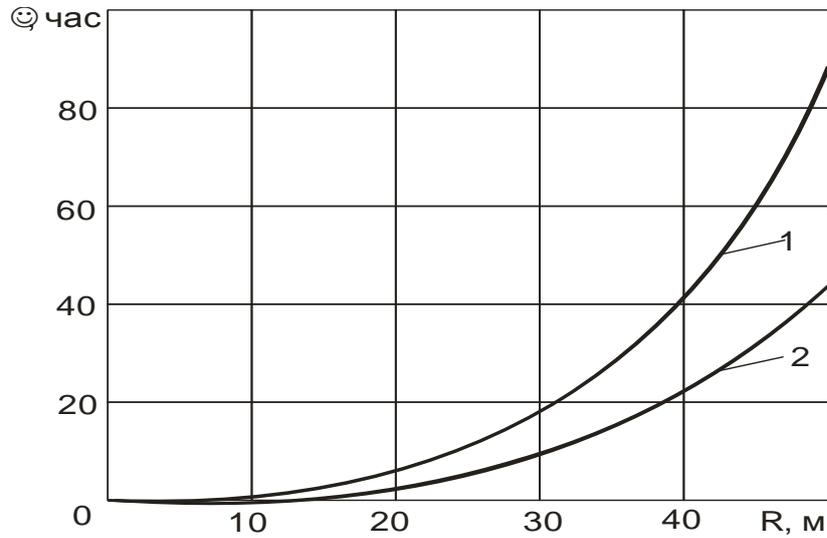
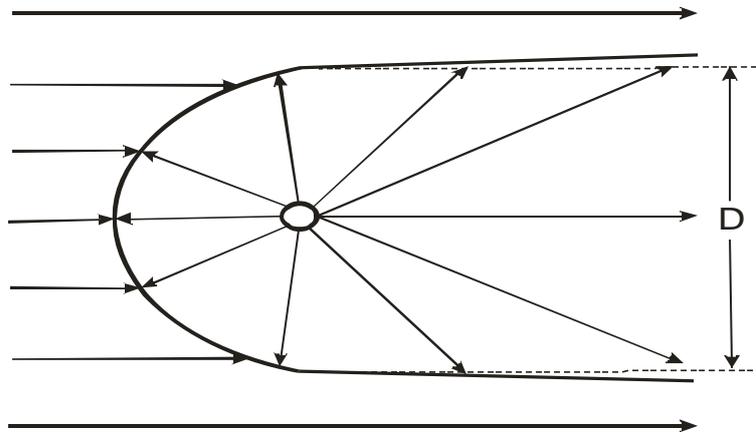


Рис. 5.6. Длительность движения инертизирующего состава ( $\tau$ ) в зависимости от расстояния ( $R$ ) от точки подачи в выработанном пространстве различной конфигурации: 1 – в виде полусферы; 2 – в виде четверти сферы



5.7. Схема движения инертизирующего состава при входе в выработанное пространство с фильтрующимся потоком газовой смеси

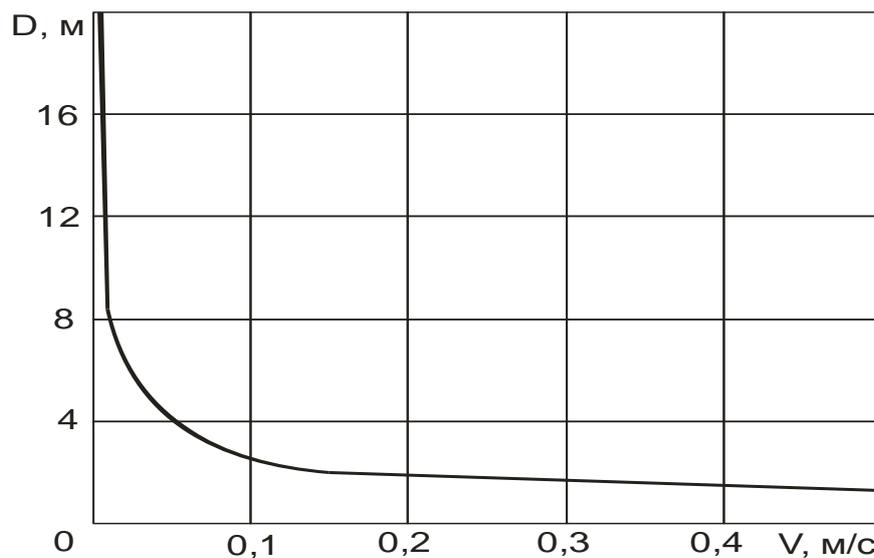
Размер области возмущения будет определяться интенсивностью подачи инертного состава. Движение инертной смеси навстречу потоку воздуха будет происходить с постепенным снижением скорости подаваемого азота и прекратится в зоне уравнивания скоростей подаваемой смеси и движущегося воздуха. В зоне соприкосновения встречные потоки воздуха и инертного газа гасят свою скорость.

Приравнивая уравнение (5.3) к скорости движущегося в выработанном пространстве потока воздуха можно получить выражение для описания радиуса распространения инертного состава в скоплении разрыхленного угля и пород навстречу и перпендикулярно вектору движения потока воздуха выражением

$$R = \frac{D}{2} = \sqrt{\frac{Q}{4\pi v_B \Pi}}, \quad (5.12)$$

где  $R$  – радиус распространения подаваемого инертизирующего состава навстречу и перпендикулярно потоку движущегося воздуха, м;  $D$  – диаметр потока подаваемого инертизирующего состава в месте его выхода в выработанное пространство, м;  $v_B$  – скорость движения потока воздуха в выработанном пространстве, м/с.

По мере движения по выработанному пространству диаметр потока инертизирующего состава будет увеличиваться за счет его переноса возникающими конвективными потоками и молекулярной диффузии подаваемого инертного газа. На рис. 5.8 приведена зависимость диаметра потока инертизирующего состава в выработанном пространстве, образуемого у подающей скважины, в зависимости от скорости движения утечек воздуха. Этот размер будет минимальным у подающей скважины. Постепенно, по мере удаления инертизирующего состава от точки подачи, этот параметр будет возрастать.



5.8. Диаметр потока инертизирующего состава (D) в зависимости от скорости потока воздуха (V) в выработанном пространстве

Учитывая, что площадь круга цилиндра, по которому в этом случае движется инертизирующий состав, равен

$$S_K = \pi R^2,$$

с учетом пористости скопления угля и пород получаем следующее уравнение для определения скорости движения инертизирующего состава в выработанном пространстве с потоком фильтрующегося воздуха у подающей скважины

$$v_{Ц} = \frac{Q}{\pi R^2 \Pi}. \quad (5.13)$$

Подставляя уравнение (5.12) в (5.13) окончательно имеем

$$v_{Ц} = 4v_B. \quad (5.14)$$

Анализ уравнения (5.14) показывает, что скорость движения инертизирующего состава у скважины в случае его подачи в выработанное пространство с потоками фильтрующегося воздуха не будет зависеть от производительности подачи установки, а определяется только скоростью движения воздуха. Однако размер движущегося потока пропорционален производительности подачи с состава. Поэтому увеличение расхода инертизирующего состава только повысит вероятность попадания состава в очаг пожара, но не изменит времени подачи, необходимого для охлаждения разогретого скопления. Длительность движения инертизирующего состава от места выхода до заданной точки на расстоянии  $L$ , в случае сохранения скорости потока инертизирующего состава как у места выхода из скважины, можно описать уравнением

$$\tau_{Ц} = \frac{L}{v_{Ц}} = \frac{L}{4v_B}. \quad (5.15)$$

На рис. 5.9 приведено изменение времени движения инертизирующего состава в зависимости от расстояния точки подачи до очага пожара при различных скоростях фильтрации воздуха в выработанном пространстве.

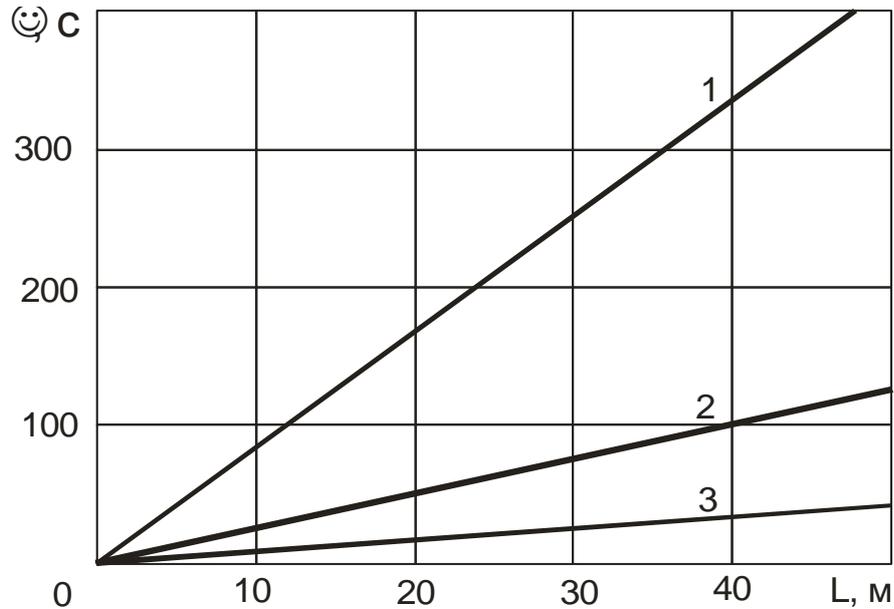


Рис. 5.9. Время движения инертизирующего состава ( $\tau$ ) до очага пожара в зависимости от расстояния ( $L$ ): 1 – скорость фильтрующегося воздуха равна 0,03 м/с; 2 – скорость воздуха 0,1 м/с; 3 – скорость воздуха 0,3 м/с

Однако постепенно, по мере удаления от подающей скважины, скорость инертизирующего состава снижается, пока не станет равной скорости движения утечек воздуха в выработанном пространстве. Окончательный размер радиуса сечения потока инертизирующего состава в выработанном пространстве можно определить из соотношения

$$v_{\Pi} = \frac{Q}{\pi R^2 \Pi} = v_B. \quad (5.16)$$

Из уравнения (5.16) имеем максимальный радиус потока инертизирующего состава в выработанном пространстве

$$R_{\Pi} = \sqrt{\frac{Q}{\pi v_B \Pi}}. \quad (5.17)$$

Снижение скорости потока инертизирующего состава по мере удаления от точки подачи соответственно приведет к увеличению длительности движения хладагента до очага самовозгорания. Максимальная продолжительность движения состава можно определить из выражения.

$$\tau_{\Pi M} = \frac{L}{v_B}. \quad (5.18)$$

Реальная длительность движения инертизирующего состава лежит в интервале между минимальным значением, определенным по формуле (5.15) и максимальным значением, подсчитанным по выражению (5.18).

Подача инертизирующего состава в выработанное пространство с очагом эндогенного пожара, изолированное от притока свежего воздуха, приведет к снижению концентрации кислорода в рудничной атмосфере. Для оценки содержания кислорода в изолированном пространстве сделаем допущения, что подаваемый со смесью азот постепенно и равномерно распределяется в подаваемой атмосфере. Начальный объем кислорода в изолированном выработанном пространстве можно определить по формуле

$$v_K = C_0 v_0. \quad (5.19)$$

где  $C_0$  – начальная концентрация кислорода в выработанном пространстве, доли ед.;  $v_0$  – объем воздуха в выработанном пространстве, м<sup>3</sup>.

После подачи в выработанное пространство инертизирующего состава с объемом азота  $V_A$  концентрация кислорода снизится и примет значение

$$C_K = \frac{V_0 C_0}{V_A + V_0}. \quad (5.20)$$

Изменение концентрации кислорода в атмосфере выработанного пространства, в зависимости от отношения поданного объема азота к объему воздуха в пустотах отработанного участка, можно определить из соотношения

$$\frac{V_A}{V_0} = \frac{C_0 - C_K}{C_K}. \quad (5.21)$$

На рис. 5.10 приведена зависимость концентрации кислорода в атмосфере выработанного пространства при подаче инертизирующего состава от соотношения объема поданного азота к объему воздуха в пустотах отработанного участка. Начальная концентрация кислорода в атмосфере выработанного пространства равнялась 20 %.

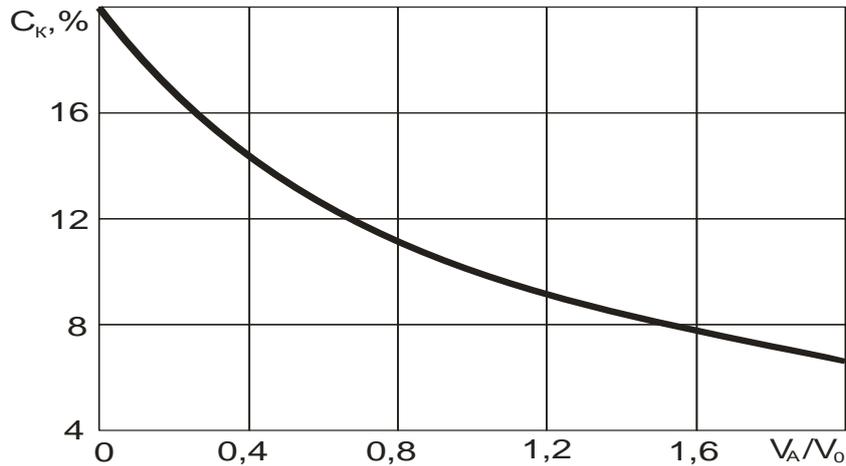


Рис. 5.10. Изменение концентрации кислорода ( $C_K$ ) в выработанном пространстве в зависимости от соотношения поданного объема азота ( $V_A$ ) к объему воздуха ( $V_O$ ) в обрушенном пространстве

Пользуясь соотношением (5.21) можно определить, сколько необходимо подать в выработанное пространство инертизирующего состава для прекращения процесса горения, предотвращения взрыва горючих газов.

Таким образом, проведенное исследование подачи инертизирующих составов, получаемых при совместном распылении жидкого азота и воды, в разрыхленную массу угля и пород через скважину, пробуренную в выработанное пространство, позволяет сделать следующие выводы.

1. При отсутствии потоков воздуха в выработанном пространстве, что реализуется после изоляции участка, поток инертизирующего состава может распространяться по объему, форма которого зависит от расположения зон, непроницаемых для инертного состава. Так, в зависимости от места выхода состава в выработанном пространстве инертный газ с частицами льда может распространяться по сфере, полусфере, четверти сферы и объемах другой формы.

2. Скорость движения инертизирующего состава в выработанном пространстве зависит от пористости скопления, расхода подаваемого состава и расстояния от точки его подачи. В изолированном пространстве скорость инертизирующего состава быстро снижается по мере удаления от точки его подачи. Поэтому на определенном расстоянии от места ввода состава частицы льда начнут оседать в пустотах и трещинах. В случае присутствия в составе частиц

льда различных размеров, их оседание может растянуться на значительное расстояние.

3. Подача инертизирующего состава в выработанное пространство с утечками воздуха приводит к возникновению потока хладагента, перемещающегося по направлению движения воздуха. Размер этого потока определяется производительностью подачи инертизирующего состава, скоростью движения утечек воздуха и пористостью скопления пород и угля. Диаметр потока инертизирующего состава постепенно увеличивается по мере удаления от подающей скважины, а его скорость снижается, достигая значений скорости утечек воздуха в выработанном пространстве.

## **5.2. Устройства для получения инертизирующих составов**

Инкубационный период процесса самовозгорания занимает длительное время (от 30 до 100 суток). За такое время очистной забой шахты способен пройти большое расстояние, удаляясь от скопления окисляющегося угля. Поэтому основная доля эндогенных пожаров в шахтах возникает в выработанном пространстве на значительном удалении от действующих горных выработок, что осложняет борьбу с ними [157]. С учетом сложившейся ситуации в большинстве случаев тушение подземных эндогенных пожаров различными составами [158] возможно только через скважины, пробуренные с поверхности или из действующих горных выработок. Такие скважины могут быть расположены на большом расстоянии от источников электроэнергии, поэтому необходимо предусмотреть возможность автономной работы оборудования для подачи инертизирующих составов.

Существует различное оборудование, пригодное для получения инертизирующих составов [159]. Так, необходимы емкость с водой и насос для подачи жидкости. Работа насоса может осуществляться от двигателя автомобиля или автономного двигателя. Источником воды могут быть также трубопроводы, например пожарно-оросительные в шахте. Перемешивать жидкий азот можно также с водяным паром, получаемым из передвижных установок. Жидкий азот может храниться, транспортироваться и выдаваться под давлением в специальных уста-

новках. Перемешивание жидкого азота с распыляемыми частицами воды или паром должно осуществляться в теплообменной камере.

Для получения пара целесообразно использовать передвижную паровую промышленную установку ППУА-1600/10. Эта установка предназначена для депарафинизации призабойной зоны скважин, промысловых и магистральных трубопроводов, резервуаров, арматуры и прогрева нефтепромыслового оборудования. Установка состоит из парового котла, питательных насосов, вентилятора высокого давления, трансмиссии, контрольно-измерительных приборов, устройств автоматического регулирования, емкостей для воды и топлива, вспомогательных трубопроводов, запорной, регулирующей и предохранительной арматуры.

Все агрегаты установки для получения пара расположены на общей раме, прикрепленной к лонжеронам автомобиля, и закрыты кузовом. Агрегаты паровой установки приводятся в действие от тягового двигателя базового автомобиля. Управление рабочим процессом получения пара и контроль работы установки осуществляется из кабины водителя. При запуске установки вода подается питательным насосом из емкости в змеевики парового котла. Нагрев котла происходит при сжигании дизельного топлива. Вода в змеевиках нагревается и переводится в пар с требуемыми параметрами.

Паровая промышленная установка отличается быстротой передвижения, собственным запасом воды и топлива, возможностью получения пара через 15–20 минут после начала работы, высоким коэффициентом полезного действия парового котла. Вместимость водяной цистерны обеспечивает непрерывную работу установки без пополнения водой в течение 3–3,5 часов. Давление пара на выходе из установки достигает значений 30–100 кгс/см<sup>2</sup>. Производительность установки по пару составляет 1600 кг/ч.

Для транспортировки к скважинам и выдачи жидкого инертного газа можно использовать ряд выпускаемых промышленностью криогенных цистерн. Так, резервуар транспортный вертикальный РТВ-1,8/0,25 имеет емкость 1,8 м<sup>3</sup>. Для создания и поддержания избыточного давления газа в резервуаре, необходимого для выдачи жидкого азота, устройство имеет испаритель, в котором азот испаряется за

счет теплообмена с окружающими воздухом. Резервуар может комплектоваться криогенным погружным насосом для создания высокого давления.

На базе емкости РТВ-1,8/0,25 созданы стационарная газификационная установка СГУ-7КМ-У и транспортабельная установка ГУ-7. Установленные на этих установках насосы позволяют газифицировать жидкий азот и выдавать его с избыточным давлением до 40 МПа.

Стационарными криогенными емкостями для хранения и выдачи жидкого азота являются установки типа РКВ, имеющие емкость от 2 до 10 м<sup>3</sup>. Выпускаемые емкости РКВ имеют характеристики, приведенные в табл. 5.1.

Таблица 5.1

## Характеристика емкостей для хранения жидкого азота

Характеристика	Тип резервуара				
	РКВ-2/1,6	РКВ-3/1,6	РКВ-5/1,6	РКВ-8/1,6	РКВ-10/1,6
Емкость, м <sup>3</sup>	2	3	5	8	10
Давление, МПа	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Потери от испарения, % в сутки	0,24	0,20	0,14	0,13	0,12
Масса порожнего резервуара, кг	1900	2300	3100	4300	6100
Габариты, мм					
Диаметр	1800	1800	1800	1800	1800
Ширина	2200	2200	2200	2200	2200
Высота	2500	3000	4000	5500	6500

Одним из приемлемых вариантов хранения и выдачи жидкого азота является цистерна транспортная ЦТК-8/0,25. Для снижения потерь азота установка состоит из двух емкостей, пространство между которыми заполнено теплоизоляционным материалом. Эффективность теплоизоляции повышают путем создания вакуума между корпусами с помощью адсорбента. С целью предотвращения разрушения криогенных сосудов от избыточного давления газа в сосудах и коммуникациях устройства предусмотрены предохранительные клапаны, а в случае их несрабатывания избыточный газ сбрасывается при разрыве предохранительной мембраны, установленной в корпусе цистерны.

Общее количество газообразного азота, получаемого из цистерны ЦТК-8/0,25, равно 4700 м<sup>3</sup>. Для выдачи жидкого азота под давлением цистерна имеет внешнюю теплообменную камеру. При поступлении жидкого азота в теплообменник происходит обмен тепла криогенной жидкости с окружающим воздухом. В результате образования газа давление в цистерне повышается, что используется для выдачи жидкого азота под давлением 0,25 МПа.

#### Техническая характеристика цистерны ЦТК-8/0,25

Емкость, м <sup>3</sup>	8,0
Рабочее давление, МПа	0,25
Максимальное количество азота, кг	5670
Масса порожней цистерны, кг	3200
Потери жидкого азота при хранении, кг/ч	1,38
Длина цистерны, мм	5000
Ширина, мм	1930
Высота, мм	2000

Пригодна для получения инертизирующего состава и автомобильная газификационная установка АГУ-8К. Установка предназначена для транспортирования, хранения жидкого азота, газификации на месте потребления и наполнения баллонов и других емкостей газообразным азотом до давления 19,6 МПа. Для выдачи жидкого азота под высоким давлением предусмотрен насосный агрегат. Газификация откачиваемого газа происходит в специальном испарителе, снабженном тепловыделяющими элементами. В качестве теплоносителя между жидким азотом и источником тепла используется вода. Для работы насоса и тепловыделяющих элементов требуется электрическая энергия общей мощностью около 110 кВт.

#### Техническая характеристика установки АГУ-8К

Производительность по газообразному азоту, м <sup>3</sup> /ч	345
Максимальное давление газообразного азота, МПа	21,6
Количество заливаемого азота, кг	4200
Потери жидкого азота при хранении, кг/ч	1,74

Длина, мм	9820
Ширина, мм	2650
Высота, мм	3770

Из технической характеристики установки АГУ-8К видно, что ее производительность по жидкому азоту недостаточна для получения больших расходов инертнизирующего состава. Значительно увеличить производительность по жидкому азоту возможно только при работе холодного испарителя, получающего тепло от окружающего воздуха. В этом случае максимальное давление исходящего из установки жидкого азота значительно меньше и составляет не более 0,25 МПа.

Предназначен для перевозки, хранения и выдачи жидкого азота транспортный резервуар РК-2. Емкость резервуара  $2 \text{ м}^3$ , максимальное давление выдаваемого жидкого азота 0,25 МПа. Потери азота от испарения составляют 0,83 кг/ч. Масса порожнего резервуара равна 1350 кг, длина 3780 мм, ширина 1280, высота 1350 мм. Емкость РК-2 может быть использована в составе газификационной установки ГУ-2, имеющей криогенный насос для получения высокого давления.

Важным элементом для получения инертизирующего состава является теплообменное устройство, в котором перемешиваются частицы распыляемого жидкого азота с каплями воды или водяным паром. В ходе выполнения работы было предложено несколько устройств для получения инертизирующего состава. Условием надежной работы устройства является предотвращение контакта частиц воды с поверхностью теплообменной камеры, что может вызвать появление слоя льда на корпусе внутри устройства. Поэтому жидкий азот должен подаваться вдоль стенок теплообменной камеры и частично испаряться при контакте с поверхностью, создавая при испарении зону повышенного давления газа, препятствующего попаданию частиц воды на поверхность теплообменной камеры.

Приведенное на рис. 5.11 устройство для получения инертизирующего состава состоит из теплообменной камеры цилиндрической формы, трубопроводов для подвода жидкого азота и воды или пара к кольцевым распылителям, а также форсунок для распыления подводимых компонентов [160].

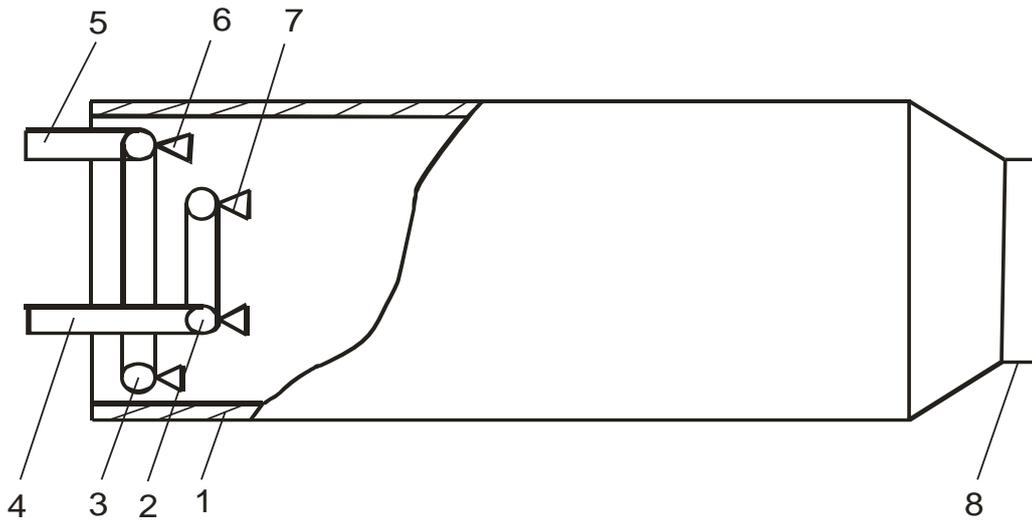


Рис. 5.11. Устройство для получения инертизирующих составов: 1 – цилиндрический корпус с теплоизолирующим слоем; 2 – кольцевой распылитель воды (пара); 3 – кольцевой распылитель жидкого азота; 4 – трубопровод подачи воды (пара) к кольцевому распылителю; 5 – трубопровод подвода жидкого азота; 6 – форсунки для распыления жидкого азота; 7 – форсунки для распыления воды (пара); 8 – патрубок для выдачи инертизирующего состава

Работает устройство следующим образом. Жидкий азот поступает по трубопроводу 5 в кольцевой распылитель 3, расположенный у внутренней поверхности теплообменной камеры, откуда распыляется форсунками 6 вдоль корпуса 1 с теплоизоляционным слоем. Затем по трубопроводу 4 подается вода в кольцевой распылитель 2, расположенный ближе к оси теплообменной камеры, откуда распыляется форсунками 7 в поток частиц жидкого азота. Взаимодействие частиц воды и жидкого азота приводит к интенсивному теплообмену, в результате которого жидкий азот испаряется, а частицы воды замерзают, превращаясь в кристаллы льда. По трубопроводу 4 может также подаваться водяной пар. Контактируя в теплообменной камере с частицами жидкого азота, пар конденсируется с последующим образованием мелкодисперсных частиц льда.

Образующийся состав, состоящий из газообразного азота и взвешенных частиц льда, выдается через патрубок 8 в трубопровод, через который поступает в обрабатываемое скопление угля. При движении через выработанное пространство происходит интенсивное охлаждение угля, что снижает его химическую активность. Поэтому инертизирующие составы можно использовать для предупрежде-

ния самовозгорания угля. В случае попадания инертизирующего состава в очаг пожара происходит его быстрое охлаждение. Для регулирования параметров инертизирующего состава можно изменять расходы жидкого азота и воды (или пара), а также исходную температуру подаваемой воды или пара.

Для проверки результатов расчета теплофизических параметров инертизирующей смеси в зависимости от соотношения исходных компонентов была изготовлена экспериментальная устройство [161] (рис. 5.12).



Рис. 5.12. Работа устройства для получения инертизирующего состава.

Подача воды на форсунки осуществлялась насосом. Жидкий азот получали от установки АГУ 8К и под давлением также разбрызгивали в устройстве через форсунки. На выходе из устройства измеряли температуру инертизирующего состава в зависимости от соотношения подаваемого азота и воды. Температура исходной воды равнялась  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Проведенные исследования показали, что при соотношении расходов жидкого азота к воде, равного 2, температура образующегося инертизирующего состава составляла  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При увеличении подачи жидкого азота температура инертизирующего состава снижалась и при соотношении  $G_A/G_W = 4$  достигала значения  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Полученные результаты свидетельствуют о удовлетворительной

сходимости результатов натуральных и аналитических исследований свойств инертизирующего состава.

### **5.3. Схемы подачи инертизирующих составов для борьбы с самовозгоранием угля в шахтах**

Очаги самовозгорания угля могут возникать в различных местах выработанного пространства шахт. Поэтому подача инертизирующих составов для предупреждения самовозгорания угля, а также тушения возникших очагов пожаров может производиться через скважины, пробуренные с земной поверхности или из действующих подземных горных выработок [161]. Для подачи инертизирующего состава с земной поверхности необходимы емкости для хранения и выдачи жидкого азота (желательно передвижные), насос для подачи воды, емкость для воды и устройство для получения инертизирующего состава. Вместо насоса и емкости с водой для получения инертизирующих составов можно использовать передвижную паровую промышленную установку, предназначенную для получения водяного пара. Схема подачи инертизирующего состава по скважине с поверхности приведена на рис. 5.13.

Для предупреждения самовозгорания или подавления возникшего подземного пожара с земной поверхности бурят скважину 1 в выработанное пространство с очагом пожара или скоплением угля. Диаметр скважины выбирается в зависимости от необходимой производительности по инертизирующему составу и может варьироваться в пределах 50–150 мм. На скважину устанавливают устройство для получения инертизирующего состава 2, к которому с помощью трубопроводов подключают установку для выдачи жидкого азота 3, а также насос 4, нагнетающий воду из емкости 5. Совместное распыление жидкого азота и воды приводит к интенсивному теплообмену между компонентами с переходом жидкого азота в газообразное состояние, а частиц воды в кристаллы льда. Подаваемый низкотемпературный инертизирующий состав распространяется в выработанном пространстве и поступает в скопление угля для профилактики самовозгорания или в очаг пожара, где охлаждает разогретый уголь.

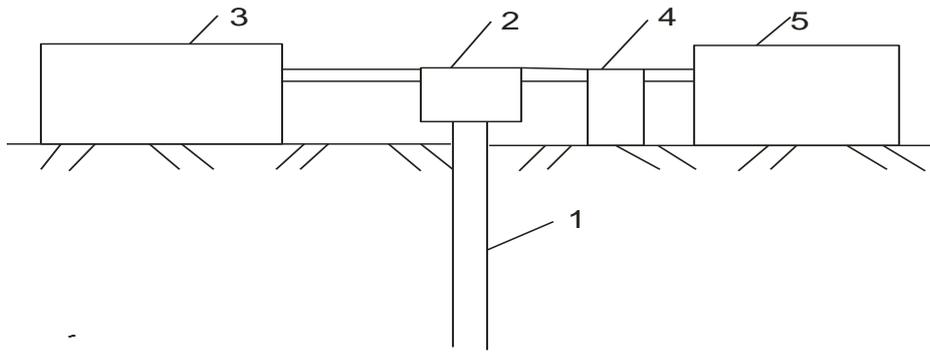


Рис. 5.13. Схема подачи инертизирующего состава с земной поверхности: 1 - скважина; 2 – устройство для получения инертизирующего состава; 3 – установка для хранения и выдачи жидкого азота; 4 – насос для подачи воды; 5 – емкость для хранения воды

В случае, если необходимо получение мелкодисперсных частиц льда в составе с целью увеличения дальности проникновения таких частиц через выработанное пространство, воду заменяют водяным паром. Схема подачи инертизирующего состава, получаемого при совместном распылении жидкого азота и водяного пара, приведена на рис. 5.14. Предупреждение самовозгорания скопления угля или тушение возникшего очага эндогенного пожара происходит аналогично ранее рассмотренной схеме.

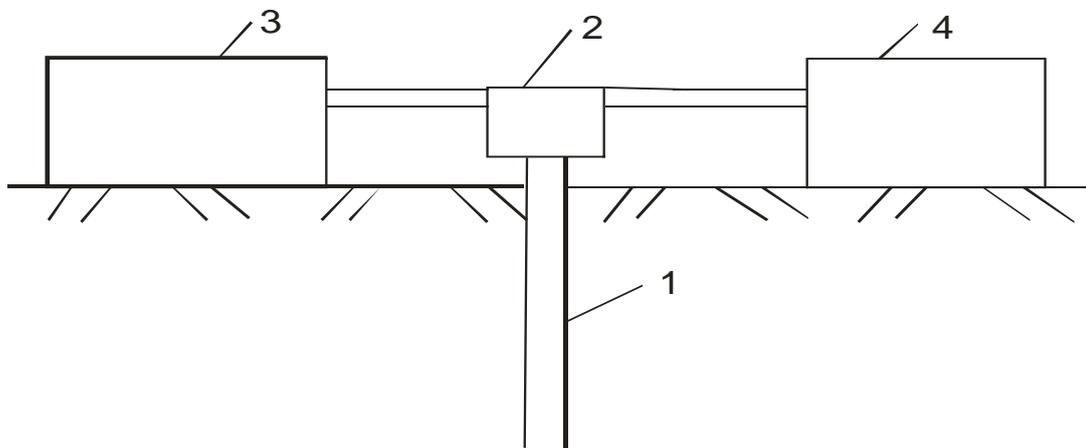


Рис. 5.14. Схема подачи инертизирующего состава на основе жидкого азота и водяного пара с земной поверхности: 1 - скважина; 2 – устройство для получения инертизирующего состава; 3 – установка для хранения и выдачи жидкого азота; 4 – установка для получения водяного пара

Иногда особенности поверхности или большая глубина залегания очага подземного пожара не позволяют бурить скважину с земной поверхности или она

оказывается экономически невыгодной. В таких случаях целесообразно бурить скважину из действующих горных выработок и оборудование располагать непосредственно в шахте (рис. 5.15). Диаметр скважины также выбирается в зависимости от необходимой производительности инертного состава. Для удобства работ по предупреждению и тушению эндогенных пожаров в горной выработке можно делать выемку, в которой располагается необходимое оборудование.

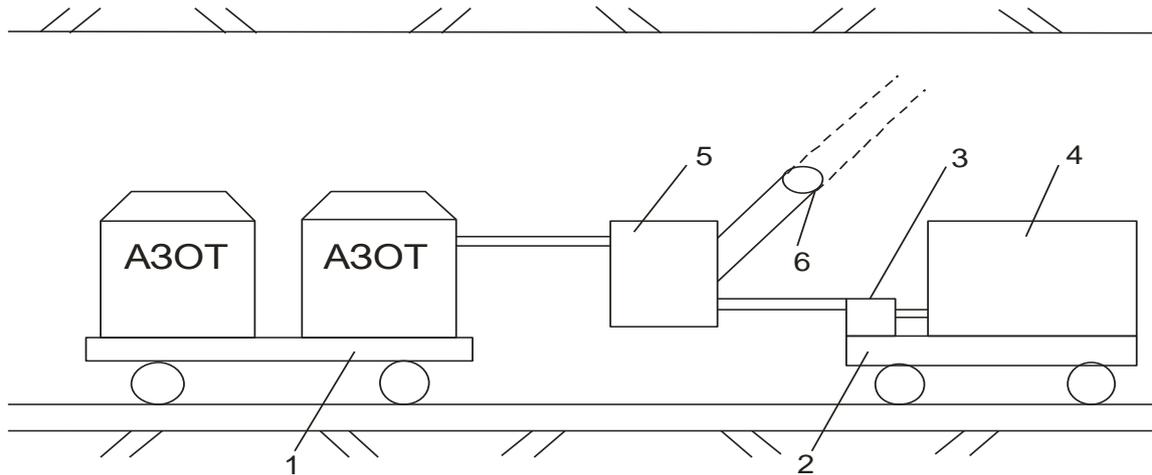


Рис. 5.15. Схема подачи инертизирующего состава в горных выработках:

- 1 - платформа вагонетки с цистернами для жидкого азота;
- 2 – платформа вагонетки для подачи воды; 3 – насос для подачи воды;
- 4 – емкость для хранения воды; 5 - устройство для получения инертизирующего состава; 6 – скважина для подачи инертизирующего состава

Для хранения и выдачи жидкого азота в шахтных условиях можно использовать установку УТЖА-2, состоящую из двух цистерн ЦТК-0,5/0,25, закрепленных на платформе вагонетки ВГ-3,3. Емкость двух цистерн  $1 \text{ м}^3$ , рабочее давление жидкого азота 0,25 МПа. Масса заливаемого азота 760 кг. Потери азота на испарение при хранении 0,366 кг/ч. Габаритные размеры установки: длина 3,45 м; ширина 1,25 м; высота 1,7 м. Масса установки в сборе 1350 кг, в заправленном состоянии 2110 кг. Выдача жидкого азота происходит под давлением газа, создаваемым холодным газификатором, входящим в состав цистерн ЦТК-0,5/0,25.

Использовать в шахтных условиях можно и передвижную шахтную установку «Азот», предназначенную для хранения, транспортировки и выдачи жидкого азота в подземных выработках. Установка состоит из цистерны ЦТК-1/0,25,

укрепленной на переоборудованной платформе шахтной вагонетки. Цистерна имеет ограждение для предохранения ее от возможных механических повреждений. Емкость цистерны  $1 \text{ м}^3$ , рабочее давление 0,25 МПа. Масса заливаемого жидкого азота 900 кг. Масса установки в сборе 1650 кг, в заправленном состоянии 2550 кг.

Для подачи воды в установку можно использовать платформу вагонетки, на которой установлены насос и емкость с водой. Получать воду под повышенным давлением можно и из шахтного пожарно-оросительного трубопровода. Образующийся в установке инертизирующий состав подается по скважине в обрабатываемую зону со скоплением угля для предупреждения самовозгорания или в очаг подземного пожара для его подавления.

Подача инертизирующих составов для профилактики и подавления очагов пожаров может осуществляться по схемам, применяемых для нагнетания глинистой пульпы, пены или воды. Так, для обработки теряемых в выработанном пространстве пачек угля, а также бортов угольных целиков, инертизирующий состав можно подавать вдоль конвейерного, вентиляционного или одновременно обоих штреков в течение всего периода отработки столба. Подачу инертизирующего состава осуществляют из установки 2, помещенной в горной выработке 1. Инертизирующий состав транспортируется в выработанное пространство по трубопроводам 5, укладываемым на почве пласта вдоль целика (рис. 5.16).

Для обработки угольного целика по всей длине выемочного столба трубопровод 5 разбивают на отдельные части. Длина каждого оставляемого в выработанном пространстве (4) трубопровода (5) должна подбираться из условия предотвращения выхода подаваемого азота в действующие выработки. Диаметр трубопровода не менее 50 мм, на конце каждого отрезка имеется перфорация (6), что улучшает выход инертизирующего состава в выработанное пространство.

Обработку обрушенных пород проводят после посадки кровли и отхода комплекса (3) от перфорированного участка на безопасное расстояние, что предотвращает выход инертизирующего состава в действующие выработки. В случае необходимости трубопровод укладывают в выемку, сделанную в почве

угольного пласта. После подачи необходимого количества инертизирующего состава устройство для его получения отключается от трубопровода и на почву укладывается новый участок трубопровода, к которому подключают устройство для генерации инертизирующего состава.

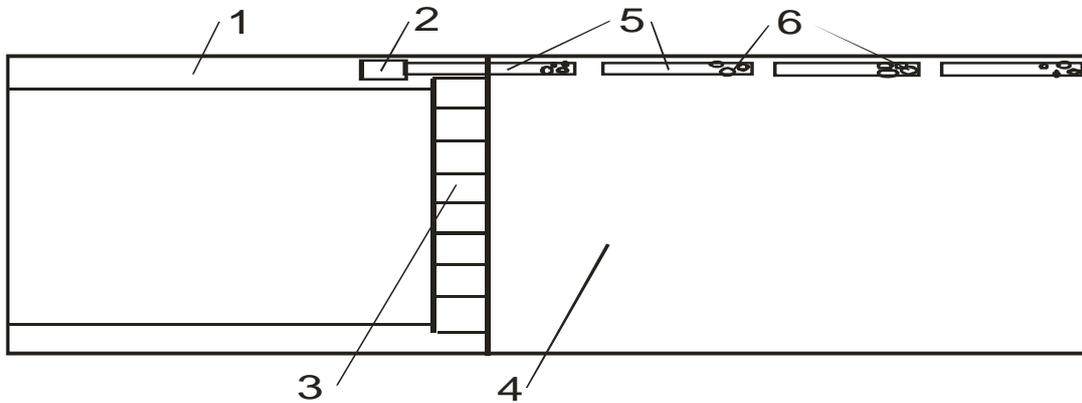


Рис. 5.16. Технологическая схема подачи инертизирующего состава в выработанное пространство на пластах пологого падения:  
 1 – вентиляционный штрек; 2 – устройство для получения инертизирующего состава; 3 – секции механизированного комплекса; 4 – выработанное пространство; 5 – остающиеся в выработанном пространстве трубопроводы; 6 – перфорированные участки

Ликвидация очагов самовозгорания, возникших в выработанном пространстве, должна проводиться после проведения работ по определению местонахождения очага пожара. При выборе места выхода инертизирующего состава в выработанное пространство учитывается направление движения утечек воздуха. Подача инертизирующего состава осуществляется со стороны поступления потока воздуха в очаг пожара. Схема тушения очага эндогенного пожара, возникшего в выработанном пространстве на пластах пологого и наклонного падения, приведена на рис. 5.6.

Использование схемы (рис.5.17) предусматривает предварительное проведение работ по определению местонахождения в выработанном пространстве 1 очага эндогенного пожара 2. Затем в выработанное пространство бурят скважину 3 для подачи инертизирующего состава, расположенную со стороны поступления утечек воздуха 4 в очаг пожара. Скважины обсаживаются трубами диаметром 50–150 мм на величину наносов, горелых пород и перебуриваемых пластов. После

подачи инертизирующего состава в выработанное пространство вновь проводят работы по локации очага пожара и оценке его параметров. В случае необходимости подачу инертизирующего состава повторяют до полной ликвидации очага эндогенного пожара.

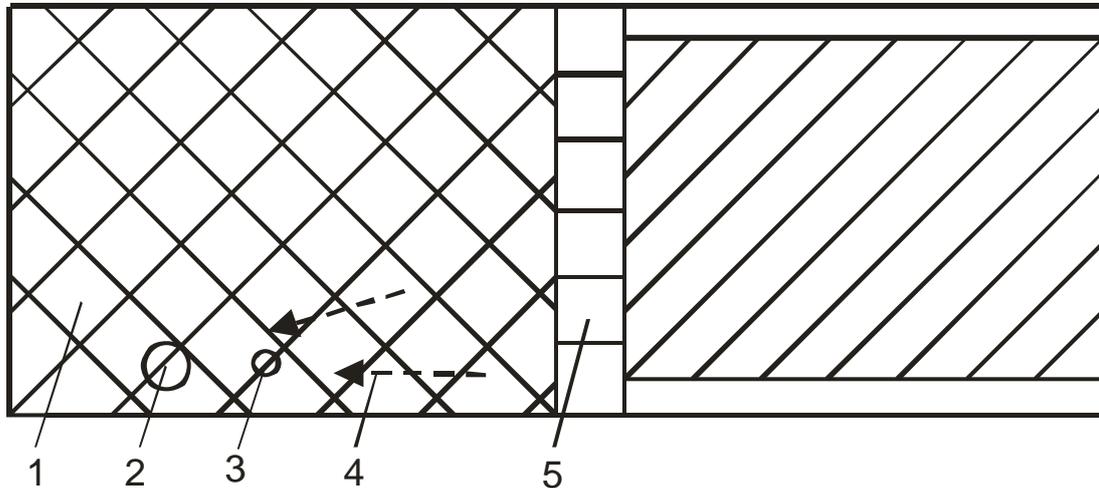


Рис. 5.17. Схема подачи инертизирующего состава для тушения пожара в выработанном пространстве пласта пологого и наклонного падения:  
 1 – выработанное пространство; 2 – очаг эндогенного пожара;  
 3 – скважина для подачи инертизирующего состава; 4 – потоки воздуха в выработанном пространстве; 5 – угольдобывающий комплекс

На пластах крутого падения тушение очагов самовозгорания осуществляют по скважинам, пробуренным с земной поверхности или сближенных горных выработок. Для оценки местонахождения очага пожара в выработанном пространстве предварительно проводятся работы по локации очага. Выход скважины в выработанное пространство должен осуществляться со стороны поступления утечек воздуха к очагу подземного пожара. Так, при нагнетательном способе проветривания утечки воздуха обычно направлены к земной поверхности, поэтому место выхода скважины в выработанное пространство производится ниже очага пожара. При всасывающем способе проветривания утечки в выработанное пространство направлены с земной поверхности и скважина должна располагаться над очагом пожара. Схема подачи инертизирующего состава для тушения пожара на пластах крутого падения приведена на рис. 5.18.

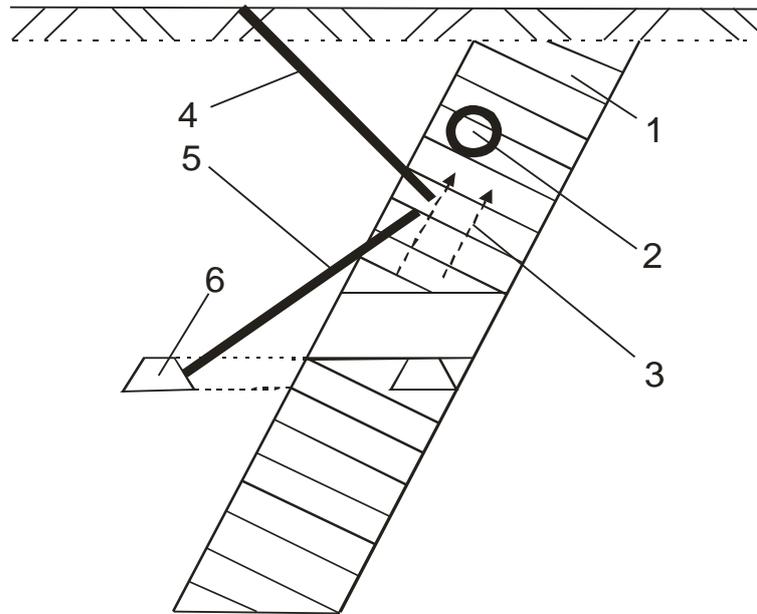


Рис. 5.18. Схема подачи инертизирующего состава для тушения очага пожара в выработанном пространстве пласта крутого падения:

1 – выработанное пространство; 2 – очаг пожара; 3 – утечки воздуха в выработанном пространстве; 4 – скважина, пробуренная с земной поверхности; 5 – подземная скважина; 6 – горная выработка

#### 5.4. Перспективы применения инертизирующих составов для борьбы с самовозгоранием угольной пыли

Увеличение мощности угледобывающей техники приводит к повышению количества угольной пыли, образующейся при добыче полезного ископаемого. Часть образующейся угольной пыли оказывается в выработанном пространстве за счет выноса частиц угля утечками воздуха в отработанную часть пласта. Часть угольной пыли оседает на почве пласта в штреках и лаве и по мере продвижения очистных работ также оказывается в выработанном пространстве.

Проведенные ранее исследования [15–18] показали, что по мере уменьшения размеров угольных частиц увеличивается их химическая активность по отношению к кислороду, что способствует развитию процесса самовозгорания при создании благоприятных условий по теплообмену с окружающей средой. При движении частиц угольной пыли по выработанному пространству возникают зоны, в которых происходит интенсивное выпадение частиц с образованием скоплений, опасных по самовозгоранию. Обычно такие зоны приурочены к местам расширения каналов, по которым фильтруются утечки воздуха. В местах расширения ка-

налов скорость потока воздуха существенно падает, что способствует осаждению частиц угольной пыли.

Вероятность развития процесса самовозгорания в скоплении пыли существенно больше, чем в скоплении угля. Этому способствует не только увеличение выделения тепла за счет высокой химической активности угольной пыли. Высокие темпы повышения температуры окисляющейся угольной пыли обусловлены также снижением потерь тепла из скопления пыли за счет меньшего коэффициента теплопроводности пыли.

Наиболее распространенный существующий способ объемной обработки выработанного пространства включает подачу инертного газа. Однако при подавлении очагов самовозгорания в осевшей угольной пыли данный способ обладает существенным недостатком. Так, в зонах расширения каналов, в которых и концентрируется угольная пыль, инертный газ также замедляет свою скорость, что уменьшает теплоотдачу от поверхности скопления угольной пыли к подаваемому хладагенту.

Существенно повысить эффективность охлаждения разогретых скоплений угольной пыли позволяет применение инертизирующих составов, получаемых при совместном распылении жидкого азота с водой или водяным паром [148]. Указанный технический результат может достигаться тем, что при подаче в выработанное пространство частиц замороженной жидкости в потоке газообразного азота дополнительно определяют распределение по фракциям частиц угольной пыли, уносимой в выработанное пространство утечками воздуха. Полученную информацию используют для создания инертизирующего состава, имеющего распределение получаемых частиц замороженной жидкости по фракциям равным распределению по фракциям частиц угольной пыли [162].

В случае подачи инертизирующего состава с нерегулируемым размером частиц замороженной жидкости, оседание количества частиц угольной пыли и замороженной жидкости могут не совпадать, поэтому некоторые скопления угольной пыли будут иметь массу осевшей замороженной жидкости в количестве, недостаточном для предотвращения самовозгорания угля или для охлаждения уже

возникших очагов. Регулировка размера частиц замороженной жидкости позволит распределить эти количество осевших частиц в каналах выработанного пространства пропорционально оседающему количеству угольной пыли. Для достижения этого эффекта необходимо определить распределение частиц угольной пыли по фракциям. Такое же распределение по фракциям создают у образующихся частиц замороженной жидкости. Поэтому движущиеся частицы замороженной жидкости оседают в выработанном пространстве пропорционально отложившейся угольной пыли, равномерно обрабатывая угольные частицы при таянии частиц льда, снижая их химическую активность и температуру.

С целью эффективного предотвращения новых случаев самовозгорания угольной пыли, в поток воздуха, поступающий в выработанное пространство, целесообразно подавать инертизирующий состав, состоящий из газа азота и частиц замороженного жидкого антипирогена, например, водного раствора карбамида. Для пропорционального заполнения скоплений осаждающейся угольной пыли частицами замороженного антипирогена подбирают форсунки, в которых образуются жидкие частицы, а также соотношение расхода жидкости через соответствующие форсунки, что позволяет получить нужное распределение замороженных частиц жидкости по фракциям.

## **Выводы**

1. При отсутствии потоков воздуха в выработанном пространстве, что обычно реализуется после изоляции участка, поток инертного состава может распространяться по объему, форма которого зависит от расположения зон, непроницаемых для инертного состава. Так, в зависимости от места выхода состава в выработанном пространстве инертный газ с частицами льда может распространяться по сфере, полусфере, четверти сферы и объемах другой формы.

2. Скорость движения инертизирующего состава в выработанном пространстве зависит от пористости скопления, расхода подаваемого состава и расстояния от точки его подачи. В изолированном пространстве скорость инертизирующего состава быстро снижается по мере удаления от точки его подачи.

Поэтому на определенном расстоянии от места ввода состава частицы льда начнут оседать в пустотах и трещинах. В случае, если в составе присутствовали частицы льда различных размеров, их оседание может растянуться на значительное расстояние.

3. Продолжительность движения инертизирующего состава в изолированном выработанном пространстве от точки подачи до предполагаемого очага пожара существенно возрастает с увеличением расстояния между ними и может достигать десятков часов. Поэтому для повышения эффективности тушения пожаров необходимо максимально приближать точку подачи инертизирующего состава к очагу.

4. Подача инертизирующего состава в выработанное пространство с утечками воздуха приводит к возникновению потока хладагента, перемещающегося по направлению движения воздуха. Размер этого потока определяется производительностью подачи инертизирующего состава, скоростью движения утечек воздуха и пористостью скопления пород и угля. Диаметр потока инертизирующего состава постепенно увеличивается по мере удаления от подающей скважины, а его скорость снижается, достигая значений скорости утечек воздуха в выработанном пространстве. Для попадания хладагента в очаг пожара точка подачи инертизирующего состава должна располагаться со стороны поступления утечек воздуха в очаг.

5. Подача инертизирующего состава в выработанное пространство позволяет снизить концентрацию кислорода в рудничной атмосфере. Благодаря эффекту инертизации появляется возможность предотвратить взрывы горючих газов в выработанном пространстве и прекратить процесс горения.

6. Для подавления очагов самовозгорания в шахтах разработано устройство, позволяющее получать инертизирующие составы путем совместного распыления жидкого азота и воды, а также технологические схемы подачи инертизирующих составов в выработанное пространство.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основе исследований свойств инертизирующих составов и их воздействия на уголь решена актуальная для угольной промышленности научно-техническая задача повышения эффективности предупреждения и подавления очагов самовозгорания угля в шахтах путем использования инертизирующих составов с замораживанием частиц жидкости, что позволяет повысить безопасность горных работ и снизить экономический ущерб от возникновения эндогенных пожаров.

Основные научные результаты исследований позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Большая часть подземных пожаров, возникающих на угольных шахтах Кузбасса, имеет эндогенное происхождение. Количество ежегодно возникающих на шахтах пожаров в последние годы остается на одном уровне. Процессы самовозгорания наносят угольным предприятиям большой экономический ущерб, угрожают здоровью и жизни шахтеров из-за выделения токсичных продуктов горения, опасности воспламенения горючих газов и угольной пыли.

2. Процесс самовозгорания угля зависит от множества факторов, в первую очередь от свойств угля, горно-геологических и горнотехнических условий залегания пластов и их отработки. Из-за изменения свойств угля в широких пределах и отсутствия стандартов на методики исследования отсутствуют четкие рекомендации по степени влияния основных факторов на процесс самовозгорания, что подтверждает актуальность темы исследований.

3. Борьба с подземными эндогенными пожарами ведется с применением способов изоляции, подачи в выработанное пространство воды, глинистой пульпы, пены, инертных газов. О низкой эффективности применяемых способов борьбы свидетельствует большое количество действующих пожаров, длительность их тушения.

4. Повышение эффективности подавления очагов самовозгорания в шахтах предложено обеспечивать подачей инертизирующего состава, получаемого при

совместном распылении воды и жидкого азота, и состоящего из инертного газа и частиц замерзшей жидкости.

5. Исследованиями установлено, что варьируя соотношением исходных компонентов можно регулировать температуру получаемого инертизирующего состава и содержание в нем частиц замерзшей жидкости. Применение пара вместо воды расширяет температурные пределы получаемого состава и долю частиц льда в нем.

5. Инертизирующие составы, получаемые при совместном распылении жидкого азота и воды, обладают лучшим хладагентным действием на разогретый уголь, чем используемые в настоящее время инертные газы и пена высокой кратности. Поэтому применение инертизирующих составов позволит сократить длительность тушения подземных пожаров, возникающих в выработанном пространстве шахт.

6. Обработка угля инертизирующими составами резко уменьшает химическую активность угля по отношению к кислороду за счет снижения температуры и образования пленки жидкости на поверхности угля. Поэтому инертизирующие составы можно использовать для профилактики процессов самовозгорания угля.

7. Увеличение скорости фильтрации инертизирующего состава через разрыхленный уголь существенно интенсифицирует процесс охлаждения угля, значительно сокращая длительность ликвидации повышенной температуры. Однако расход инертизирующего состава, необходимый для охлаждения угольного скопления, при изменении скорости хладагента практически остается постоянным.

8. Снижение начальной температуры инертизирующего состава за счет сокращения доли частиц льда в единице объема состава увеличивает продолжительность охлаждения разогретого угольного скопления. Так, рост доли инертного газа в составе в 2,96 раза (с 1,4 до 4,15) приводит к повышению длительности охлаждения в 1,78 раза (с 4,5 до 8,0 суток).

9. Применение водяного пара вместо жидкости для совместного распыления с жидким азотом для получения инертизирующего состава существенно снижает хладагентное действие состава. Причиной является сокращение доли частиц льда в составе при одинаковой начальной температуре. Например, в инертном составе с температурой  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  доля азота увеличивается в 5,2 раза при замене воды на водяной пар (с 2,1 для состава на основе жидкости до 10,94 для состава с использованием водяного пара).

10. Снижение температуры исходной воды, используемой для совместного распыления с жидким азотом, увеличивает долю частиц льда в хладагенте при одинаковой температуре состава и повышает эффективность тушения, сокращая длительность охлаждения.

11. Расчеты показали высокую эффективность использования инертизирующих составов, получаемых при совместном распылении жидкого азота и воды, для охлаждения очагов самовозгорания угля. Подача такого состава приводит к существенному снижению температуры ранее разогретого угольного скопления, что значительно снижает опасность развития процесса самовозгорания угля после прекращения подачи хладагента и восстановления утечек воздуха.

12. Исследования, проведенные на экспериментальном устройстве для получения инертизирующего состава на основе жидкого азота и воды, показали удовлетворительную сходимостью результатов натуральных и аналитических исследований свойств инертизирующего состава.

13. Испытания предложенного метода, проведенные в условиях ш. «Талдинская-Западная 1», подтвердили эффективность реализации предложенных решений по подавлению возникшего очага самовозгорания угля путем подачи в скважину №8Д жидкого азота и воды через форсунки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарзанов И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2014 г. / Уголь. – 2015. – № 3. – С. 56–71.
2. Тарзанов И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за 2013 г. / Уголь. – 2014. – № 3. – С. 53–72.
3. Состояние и перспективы развития угольной промышленности Кузбасса / Уголь. – 2012. – № 5. – С. 13–14.
4. Тарзанов И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за 2009г. / Уголь. – 2010. – № 3. – С. 34–42.
5. Тарзанов И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за 2011г. / Уголь. – 2012. – № 3. – С. 40–51.
6. Скочинский А.А., Огиевский В.М. Рудничные пожары. – М.: Углетехиздат, 1954. – 387 с.
7. Скочинский А.А., Макаров С.З. Исследования о применении антипирогенов при борьбе с рудничными пожарами. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1947. – 237 с.
8. Печук И.М. Установление значений факторов, влияющих на самовозгораемость угля // Тр. горно-геол. ин-та. – 1950. – Вып. 7. – С. 19-33.
9. Быков Л. Рудничные пожары. – М.: Госгортехиздат, 1963. – 160 с.
10. Печук И.М., Маевская В.М. Эндогенные пожары в Донецком бассейне. – М.: Углетехиздат, 1954. – 275 с.
11. Маевская В.М. Прогноз эндогенной пожароопасности при разработке угольных пластов: Дис. ... докт. техн. наук. – Кемерово, 1969. – 384 с.
12. Линденау Н.И., Маевская В.М., Крылов В.Ф. Происхождение, профилактика и тушение эндогенных пожаров. – М.: Недра, 1977. – 319 с.
13. Стадников Г.Л. Самовозгорающиеся угли и породы, их геохимическая характеристика и методы опознавания. – М.: Углетехиздат, 1956. – 476 с.
14. Орешко В.Ф. Об окислении и самовозгорании каменных углей: Дис. ... докт. техн. наук. – М, 1953. – 475 с.

15. Самовозгорания промышленных материалов / В.С.Веселовский, Н.Д.Алексеева, Л.Н.Виноградова и др. – М.: Наука, 1964. – 246 с.
16. Физические основы самовозгорания угля и руд / В.С. Веселовский, Л.Н. Виноградова, Г.Н. Орлеанская и др. – М.: Наука, 1972. – 148 с.
17. Научные основы борьбы с самовозгоранием углей / В.С.Веселовский, Г.А.Орлеанская, Е.А.Терпогосова и др. – М.: Наука, 1964. – 52 с.
18. Прогноз и профилактика эндогенных пожаров / В.С. Веселовский, Л.Н. Виноградова, Г.Н. Орлеанская и др. – М.: Наука, 1975. – 159 с.
19. Исследование кинетики сорбции кислорода углями / Панферова И.В. // Изв. Вузов. Горный журнал. – 1994. – № 4. – С. 67–69.
20. Зборщик М.П., Осокин В.В. Причины и механизм самовозгорания углей и углисто-глинистых пород // Уголь Украины. – 1989. – № 10. – С. 31–34.
21. Каравайко Г.И., Кузнецов С.И., Голомзик А.И. Роль микроорганизмов в выщелачивании металлов из руд. – М.: Наука, 1972. – 248 с.
22. Камнева А.И., Александров И.В., Бурков П.А. О механизме самовозгорания твердых горючих ископаемых / Уголь. – 1986. – № 11. – С.14–16.
23. Глузберг Е.И. Теоретические основы прогноза и профилактики шахтных эндогенных пожаров. – М.: Недра, 1986. – 161 с.
24. Саранчук В.И., Баев Х.А. Теоретические основы самовозгорания угля. – М.: Недра, 1976. – 151 с.
25. Саранчук В.И. Окисление и самовозгорание угля. – Киев: Наукова думка, 1982. – 166 с.
26. Кузьминский С.П. Научные основы профилактики эндогенных пожаров на угольных шахтах Средней Азии. – Фрунзе: Илим, 1977. – 219 с.
27. Дмитрюк Н.Ф. Борьба с подземными пожарами от самовозгорания угля / Н.Ф. Дмитрюк, Ф.Ф. Эйнер, К.М. Ремезов, З.Л. Рыкова. – Москва, 1962. – 128 с.
28. Игишев В. Г. Борьба с самовозгоранием угля в шахтах / В. Г. Игишев. – М. : Недра, 1987. – 176 с.

29. Белавенцев Л. П. Аэрозольная профилактика эндогенных пожаров в угольных шахтах : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.11 / Белавенцев Лев Петрович. – Кемерово, 1988. – 47 с.

30. Портола В. А. Обоснование и разработка способов обнаружения, локации и контроля за ходом тушения очагов самовозгорания угля в шахтах: Дис. ... докт. техн. наук. – Кемерово, 2002. – 317 с.

31. Чернов О. И. Скорость поглощения кислорода сухим и увлажненным углем // Уголь. – 1968. – № 5. – С. 66–67.

32. Чернов О. И. Влияние увлажнения угля при заиливании на процессы, приводящие к эндогенным пожарам // Вопросы безопасности в угольных шахтах. – М., 1970. – С. 39–46. – (Труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти ; т. 2).

33. Горбатов В.А., Игишев В.Г., Попов В.Б., Портола В.А., Син А.Ф. Защита угольных шахт от самовозгорания угля. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2001. – 132 с.

34. Разработка и внедрение новых способов профилактики, локации и локализации очагов самовозгорания угля в действующих выемочных полях шахт Кузбасса / В.Г. Игишев, Л.П. Белавенцев, В.А. Портола и др. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2006. – 98 с.

35. Технологические схемы профилактики, локализации и тушения эндогенных пожаров в угольных шахтах / В.А. Горбатов, В.Г. Игишев, В.Б. Попов и др. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2002. – 177 с.

36. Портола В.А. Локация очагов подземных пожаров с поверхности: Монография / Под ред. В.А. Колмакова; Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2001. – 176 с.

37. Портола В.А. Обнаружение ранней стадии процесса самовозгорания угля в шахтах: монография / В.А. Портола, С.Н. Лабукин; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 133 с.

38.34. Белавенцев Л.П. Возникновение очагов самовозгорания угля в шахтах / Л.П. Белавенцев // Уголь. – 1986. – № 2. – С. 43-45.

39. Портола В.А. Пожарная безопасность горных предприятий. Учебное пособие / В.А. Портола. КузГТУ. – Кемерово, 2008. – 158 с.

40. Portola V.A., Krol G.V. IMPLEMENTATION OF THE METHOD OF LOCALIZATION OF THE ENDOGENOUS FIRES FROM THE SURFACE. ADVANCES IN GEOTECHNICAL FND STRUCTURAL ENGINEERING – Proceedings of the Fifth China-Russia Symposium on Underground and Building Engineering of City and Mint. 2008, Qindao, China. – p. 398–400.

41. Портола В.А., Галсанов Н.Л., Шевченко М.В., Луговцова Н.Ю. Эндогенная пожароопасность шахт Кузбасса. Вестник КузГТУ. – 2012. – № 2. – С. 44–47.

42. Тронов В.В. Фенольная теория окисления углей / Журнал прикладной химии. – 1940. – Т. 13. – с. 18-24.

43. Харитонов Г.В. Влияние отдельных структурных элементов на свойства углей. Фрунзе, Изд-во АН КиргССР, 1960. – 420 с.

44. А. с. 877068 СССР, МКИ<sup>3</sup> E21 F 5/02. Способ снижения эндогенной пожароопасности выработанного пространства / В.С. Евсеев, Л. П. Белавенцев, В. А. Скрицкий, Ю. И. Досков, Ю. А. Миллер, В. Е. Зайденварг, В. Ф. Сазонов. – № 2888765/22-03 ; заявл. 29.02.80 ; опубл. 30.01.81, Бюл. № 40. – 5 с. : ил.

45. Селезнев А. А. Результаты исследования влияния увлажнения на процесс поглощения кислорода дегазированным углем // Вопросы безопасности в угольных шахтах. – М., 1966. – С. 152–157. – (Труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти ; т. 7).

46. Маевская В.М. Современное состояние предупреждения и тушения эндогенных пожаров в Донецкой области. – М.: Углетехиздат, 1947. – С. 48–68.

47. Скочинский А.А., Макаров С.З. Исследование о применении антипирогенов при борьбе с рудничными пожарами. – М.: Изд-во АН СССР, 1947. – 235 с.

48. A conceptual approach to prevention of fire in coal benches / Sharma A., Banerjee D.D. // Mining. Sci. And Technol. – 1989. – 8, № 2. – С. 133–143.

49. Luvoda zvybene predispozice k samovznecovani oxidacne alterovanych uhli / Taraba V., Martinec Petr, Pavlikova Helena, Sebestova Eva, Klika Zdenek // Uhlirudygeol. Pruzk. –1995. – 2, 12. – С. 371–374.

50. Веселовский В.С., Терпогосова Е.А., Алексеева Н.Д. Изучение скорости окисления углей и сульфидных руд. В кн.: Проблемы рудничной аэрологии. – Изд. АН СССР. – 1963. – С. 261–271.

51. Чернов О.И., Пузырев В.Н. Изучение возможности использования профилактических жидкостей для снижения самовозгораемости угля // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. – 1968. – № 9. – С. 39–45.

52. Чернов О.И., Белавенцев Л.П., Скрицкий В.А., Эйнер Ф.Ф. Влияние влаги на развитие самовозгорания угля // Безопасность труда в промышленности. – 1982. – № 5. – С. 34–36.

53. Хавова В.И., Аксенова Э.М., Селезнев А.А. Результаты изыскания профилактических жидкостей для обработки с целью предотвращения самовозгорания угля // Нагнетание воды в угольные пласты. – М.: 1965. – С. 103–109.

54. Портола В.А. Влияние профилактического увлажнения на процесс самовозгорания угля // ФТПРПИ. – 1984. – № 3. – С. 108–110.

55. Ярцев В. А. Роль влагообмена в тепловом балансе самовозгорающегося угля // Изв. вузов. Горный журнал. – 1970. – № 7. – С. 75–78.

56. Белавенцев Л. П. Влияние теплофизических параметров рудничного воздуха на процесс окисления угля / Л. П. Белавенцев, В. А. Болдин, А. Г. Степанов // Борьба с газом, внезапными выбросами и пожарами в угольных шахтах. – Кемерово, 1975. – С. 210–214. – (Труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти ; т. 24).

57. Белавенцев Л. П. Возникновение очагов самовозгорания угля в шахтах / Л.П. Белавенцев // Уголь. – 1986. – № 2. – С. 43–45.

58. Скрицкий В. А. Эндогенные пожары в угольных шахтах, природа их возникновения, способы предотвращения и тушения / В. А. Скрицкий, А. П. Федорович, В. И. Храмцов. – Кемерово : Кузбассвуиздат, 2006. – 171с.

59. Портола В.А. Оценка влияния некоторых факторов на процесс самовозгорания угля // ФТПРПИ. – 1996. – № 3. – С. 61–68.

60. Портола В.А. Эндогенная пожароопасность шахт в условиях управления газовыделением средствами вентиляции // Безопасность труда в промышленности. – 2006. – № 9. – С. 32–35.

61. Маевская В.М., Белавенцев Л.П., Рапоцевич А.П. О допустимой депрессии щитовых выемочных участков // Уголь. – 1968. – № 10. – С. 57–59.

62. Маевская В.М., Рапоцевич А.П., Белавенцев Л.П., Парахин П.А. Влияние режима проветривания щитовых выемочных участков на их пожароопасность // Вопросы безопасности в угольных шахтах. – М.: Недра, 1969. Т II. – С. 147–162.

63. Игишев В. Г. Роль молекулярной диффузии кислорода в возникновении эндогенных пожаров / В. Г. Игишев, В. А. Портола // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело : реф. сб. / ЦНИЭИуголь. – 1981. – № 3. – С. 24–25.

64. Мурашев В. И. Научные исследования в области предупреждения эндогенных пожаров в шахтах / В. И. Мурашев, В. Б. Попов // Уголь. – 1985. – № 3. – С. 25–26.

65. Бессолицина Г. Г. Изменение эндогенной пожароопасности с переходом на глубокие горизонты // Безопасность труда в промышленности. – 1973. – № 7. – С. 41–42.

66. Чубаров Б. В. Технологическая схема профилактики и тушения эндогенных пожаров сухим инертным аэрозолем / Б. В. Чубаров, А. Е. Чуприков, А. А. Игишева // Борьба с авариями в шахтах. – Кемерово, 2003. – С. 17–22. – (Сб. науч. тр. / Рос. науч.-исслед. ин-т горноспасательного дела ; вып. 16).

67. Горбатов В. А. Изменение температуры угля в зоне повышенного горного давления / В. А. Горбатов, А. П. Федорович, В. А. Скрицкий // Борьба с авариями в шахтах. – Кемерово, 2003. – С. 72–74. – (Сб. науч. тр. / Рос. науч.-исслед. ин-т горноспасательного дела ; вып. 16).

68. Хорольский В. Т. Оценка эндогенной пожарной опасности выемочных полей пластов пологого и наклонного падений / В. Т. Хорольский, И. А. Шайтан //

Горноспасательное дело. – Донецк, 1976. – С. 25–30. – (Сб. науч. тр. / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т по горноспасательному делу ; вып. 12).

69. Хорольский В. Т. О влиянии свойств вмещающих пород на эндогенную пожароопасность выемочных полей шахт / В. Т. Хорольский, И. А. Шайтан // Горноспасательное дело. – Донецк, 1976. – С. 30–34. – (Сб. науч. тр. / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т по горноспасательному делу ; вып. 12).

70. Линденау Н. И. Роль горно-технологических параметров отработки пластов в предупреждении эндогенных пожаров // Уголь. – 1977. – № 10. – С. 65–68.

71. Потери угля и эндогенная пожароопасность шахт / В. В. Егшин [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 1973. – № 2. – С. 30–32.

72. Портола В. А. Влияние угольной пыли на состав газов и эндогенную пожароопасность // Безопасность труда в промышленности. – 2003. – № 6. – С. 42–44.

73. Маевская В. М. Снижение эндогенной пожароопасности щитовых участков // Вопросы безопасности в угольных шахтах : сб. ст. / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти. – М., 1973. – С. 48–50.

74. Миллер Ю.А., Хващевский В.С., Демидова А.С. Изменение воздухопроницаемости изолирующих перемычек в процессе эксплуатации. Борьба с газом, внезапными выбросами и пожарами в угольных шахтах // Труды ВостНИИ. Том 24. – Кемерово, 1975. – С. 200–205.

75. Александров В.А., Югай А.И., Кожухарь Б.Н. Лабораторные испытания новых материалов для повышения эффективности изоляционных работ на шахтах Карагандинского бассейна. Предупреждение эндогенных пожаров в шахтах. Труды ВостНИИ. – Кемерово, 1986. – С. 25–33.

76. Лагутин В.И., Портола В.А., Пробст И.И. Тушение подземных пожаров затоплением горных выработок // Безопасность труда в промышленности. – 1993. – № 12. – С. 10–12.

77. Иванов Ю. И. Повышение эффективности заилочных работ при профилактике эндогенных пожаров / Ю. И. Иванов, Ю. А. Миллер // Предупреждение

эндогенных пожаров в шахтах : труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти. – Кемерово, 1986. – С. 13–22.

78. Миллер Ю. А. Совершенствование технологии приготовления и транспортировки заилоочной пульпы / Ю. А. Миллер, Ю. И. Иванов, Р. Г. Храпунова // Борьба с газом, внезапными выбросами и пожарами в угольных шахтах. – Кемерово, 1975. – С. 188–196. – (Труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти ; т. 24).

79. Иванов Ю.И. Повышение эффективности заиливания при профилактике эндогенных пожаров на крутопадающих пластах: Автореф. Дис...канд. техн. наук. – Кемерово, 1980. – 22 с.

80. Технологические схемы заилоочных работ для предупреждения и тушения эндогенных пожаров в шахтах восточных районов СССР / Н.И. Линденау, Ю.А. Миллер, Ю.И. Иванов, Л.П. Гуцин. – Кемерово, 1979. – 191 с.

81. Миллер Ю.А., Иванов Ю.И., Чеглаков В.А. Исследование режима эжектирования воздуха в заилоочных скважинах // Борьба с газом, внезапными выбросами и пожарами в угольных шахтах. – Кемерово, 1975. – С. 183–187. – (Труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти ; т. 24).

82. Зубарева В. А. Применение гелеобразующих составов при локализации и тушении эндогенных пожаров // Борьба с авариями в шахтах. – Кемерово, 2003. – С. 30–33. – (Сб. науч. тр. / Рос. науч.-исслед. ин-т горноспасательного дела ; вып. 16).

83. Хавова В. И. Термохимические эффекты гелеобразующих составов / В. И. Хавова, Э. М. Аксенова // Предупреждение эндогенных пожаров в шахтах : труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти. – Кемерово, 1986. – С. 42–45.

84. Шестых В. В. Совершенствование изоляции выработанного пространства с применением гелеобразующих составов // Способы и средства предупреждения самовозгорания угля в шахтах : труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти. – Кемерово, 1988. – С. 40–48.

85. Шестых В. В. Применение гелеобразующих составов для предупреждения самовозгорания угля на пластах пологого падения // Технология отработки пожароопасных пластов : сб. науч. тр. / В. В. Шестых, В. А. Чеглаков, Н. В. Суханов ; Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти. – Кемерово, 1987. – С. 30–38.

86. Альхимович В. П. Совершенствование оборудования для приготовления гелеобразующих составов / В. П. Альхимович, А. А. Бабаянц // Профилактика эндогенных пожаров в угольных шахтах : труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти. – Кемерово, 1989. – С. 16–21.

87. Миллер Ю. А. Теоретические основы применения гелеобразующих составов для предупреждения самовозгорания угля в шахтах // Профилактика эндогенных пожаров в угольных шахтах : труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти. – Кемерово, 1989. – С. 21–30.

88. Миллер Ю. А. Область применения гелеобразующих составов для предупреждения самовозгорания угля на пластах пологого и наклонного падения / Ю. А. Миллер, Э. И. Кузьменков // Профилактика эндогенных пожаров в угольных шахтах : труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти. – Кемерово, 1989. – С. 30–47.

89. Чеглаков В. А. О применении гелеобразующих составов для борьбы с пожарами от самовозгорания угля на мощных крутых пластах / В. А. Чеглаков, Г. И. Кудрявцев // Профилактика эндогенных пожаров в угольных шахтах : труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти. – Кемерово, 1989. – С. 40–48.

90. Верхотуров А. Я. Технология приготовления гелеобразующих составов и схемы их подачи в выработанное пространство / А. Я. Верхотуров, Н. Н. Петин, Г. М. Михальцова // Профилактика эндогенных пожаров в угольных шахтах : труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти. – Кемерово, 1989. – С. 48–55.

91. Александров В. А. Применение составов, образующих гель, для тампонажа целиков угля в условиях Карагандинского бассейна / В. А. Александров, А. И.

Югай, Я. Д. Витебский // Профилактика эндогенных пожаров в угольных шахтах : труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти. – Кемерово, 1989. – С. 55–61.

92. Аксенова Э. М. Адгезионные свойства гелеобразующих составов к углю и породе при изоляции выработанного пространства / Э. М. Аксенова, Л. Г. Рябченко // Способы и средства предупреждения самовозгорания угля в шахтах : труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти. – Кемерово, 1988. – С. 40–48.

93. Шестых В. В. Локализация очагов самовозгорания угля в выработанном пространстве действующих лав / В. В. Шестых, Е. Д. Фофанов, В. Н. Чжу // Способы и средства предупреждения самовозгорания угля в шахтах : труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти. – Кемерово, 1988. – С. 48–54.

94. Хавова В. И. Методика оперативного контроля свойств и выбора составов гелеобразующих композиций / В. И. Хавова, Н. Ф. Борщина // Комплексные способы борьбы с эндогенными пожарами : труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти. – Кемерово, 1985. – С. 13–16.

95. Евсеев В. С. Схемы подачи гелеобразующих составов в выработанное пространство для предупреждения эндогенных пожаров / В. С. Евсеев, В. Б. Попов, В. В. Шестых // Комплексные способы борьбы с эндогенными пожарами : труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти. – Кемерово, 1985. – С. 9–13.

96. Аксенова Э. М. Влияние свойств пород и угля на гелеобразующие составы / Э. М. Аксенова, В. А. Калиниченко // Комплексные способы борьбы с эндогенными пожарами : труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти. – Кемерово, 1985. – С. 20–24.

97. Игишев В. Г. Особенности тушения эндогенного пожара инертной пеной / В. Г. Игишев, В. Л. Лагутин // Локализация и тушение подземных пожаров. – Кемерово, 1989. – С. 15–20. – (Сб. науч. ст. / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т по горноспасательному делу, Вост. отд-ние ; вып. 11).

98. Портола В. А. Параметры пенного способа борьбы с самовозгоранием угля // Локализация и тушение подземных пожаров. – Кемерово, 1989. – С. 21–27. – (Сб. науч. ст. / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т по горноспасательному делу, Вост. отд-ние ; вып. 11).

99. Игишев В. Г. О предупреждении и тушении эндогенных пожаров пеной // Уголь. – 1977. – № 3. – С. 60–63.

100. Игишев В. Г. Исследование самонагревания угля после обработки вспененными составами / В. Г. Игишев, В. А. Портола // Локализация и тушение подземных пожаров : сб. науч. тр. / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т по горноспасательному делу, Вост. отд-ние. – Кемерово : Кн. изд-во, 1983. – С. 83–86.

101. Игишев В. Г. Кратность пен, используемых при локализации и тушении эндогенных пожаров / В. Г. Игишев, В. А. Портола // Безопасность труда в промышленности. – 1983. – № 7. – С. 32.

102. Игишев В. Г. Опыт применения водовоздушной пены для предупреждения и тушения эндогенных пожаров / В. Г. Игишев, Г. В. Суханов, А. Г. Кравцов // Уголь. – 1976. – № 8. – С. 59–62.

103. Игишев В. Г. Ликвидация эндогенного пожара в лаве без остановки очистных работ / В. Г. Игишев, А. А. Манко, Э. М. Кузьменков // Уголь. – 1978. – № 8. – С. 70–72.

104. Белавенцев Л. П. Применение антипирогенов в виде аэрозолей для профилактики эндогенных пожаров // Борьба с эндогенными пожарами в шахтах : труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти. – Кемерово, 1984. – С. 36–45.

105. Евсеев В. С. Об эффективности профилактики эндогенных пожаров / В. С. Евсеев, Л. П. Белавенцев, Ю. И. Донсков // Уголь. – 1981. – № 8. – С. 44–46.

106. Болдин, В. А. Профилактика эндогенных пожаров порошкообразными антипирогенами // Предупреждение эндогенных пожаров в шахтах : труды / Вост. науч.-исслед. ин-т по безопасности работ в горной пром-сти. – Кемерово, 1986. – С. 22–25.

107. Портола В.А. Влияние скорости фильтрации и примеси кислорода в инертном газе на динамику охлаждения угольного скопления // Локализация и тушение подземных пожаров : сб. науч. тр. / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т по горноспасательному делу, Вост. отд-ние. – Кемерово : Кн. изд-во, 1989. – № 11. – С. 27–31.
108. Колыщенко М. В. Применение генераторов инертного газа для борьбы с пожарами в шахтах / М. В. Колыщенко. – М. : Недра, 1974. – 52 с.
109. Привалов Н. И. Совершенствование газогенераторной техники для тушения подземных пожаров / Н. И. Привалов, А. А. Купко, Б. С. Любарский // Уголь Украины. – 1991. – № 2. – С. 26–27.
110. Takeshi K. Underground fire-fighting system by a rapid evaporation method of liquid nitrogen / Komal Takeshi, Isel Takehiro // Mining Sci. and Technol. – 1989. – 8, № 2. – С. 145–152.
111. Manasil O. Kvaralny dusfkromocnik pri zdolavani poziarov // Bezpec. Pr. – 1988. – 19, № 1. – С. 36–37.
112. Амельчугов С. П. Применение диоксида углерода для ликвидации самовозгорания бурых углей / С. П. Амельчугов, В. Я. Киселев // Пожаротушение : сб. науч. тр. / ВНИИПО. – М., 1993. – С. 22–26.
113. Белик И.П., Кондратенко И.И., Горбатенко А.И. и др. Тушение пожара в тупиковых выработках / Безопасность труда в промышленности. – 1979. – № 3. – С.40–41.
114. Белик И.П., Горбатенко А.Е., Клименко В.В. Установка «Иней» для интенсивного выпуска углекислого газа при тушении пожара / Сб. науч. тр. Макеев. ин-т по безоп. в горн. пром. – 1979 № 16. – С.85–88.
115. Goward H.F., Jones G.W. Limits of flammability of gases and vapors / Bulletin bureau of mines. № 2952. – 503.
116. Осипов С.Н. Применение инертных газов при ликвидации подземных пожаров. – Киев: Техника. – 1973. – 51 с.
117. Kock F.J., Linberg B. Strategie der Brandbekämpfung mit Stickstoff / Gluckauf. – 1985. – № 18. – S. 20–25.

118. Клещев П.Е., Дмитриук Н.Ф. Предупреждение и ликвидация пожаров на зарубежных шахтах / Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. – 1986. – Выпуск 8. – С. 36.

119. Осипов С. Н. Применение азота для тушения подземного пожара / С. Н. Осипов, Н. В. Орлов // Уголь. – 1970. – № 8. – С. 60–62.

120. Чубаров. Опыт применения криогенной техники для локализации и подавления подземных пожаров / Б.В. Чубаров, А.Е. Чуприков // Уголь. – 2001. - № 10. – С. 66–67.

121. Портола В.А. Перспектива применения азота для борьбы с пожарами и взрывами в шахтах // Вестник КузГТУ, 2006. № 3, – С. 57–59.

122. Портола В.А., Син С.А., Полуэктов А.А. Использование воздухоразделительных установок для борьбы с авариями в шахтах. Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах : Материалы VIII Межд. научно-практ. конф. (Том 1). Кемерово, 12 нояб. 2009г. /отв. Ред. В.Ю.Блюменштейн; Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2009. – С. 90–92

123. Портола В.А. Патент № 2482278 от 16 марта 2011; опубл. 20.05.2013 Бюл. № 14. Способ борьбы с пожарами в шахтах.

124. Инструкция по предупреждению и тушению подземных эндогенных пожаров в шахтах Кузбасса. – Кемерово, 2007. – 79 с.

125. Агроскин А.А. Физика угля. – М.: Недра, 1965. – 352 с.

126. Агроскин А.А., Глейбман В.Б. Теплофизика твердого топлива. – М.: Недра, 1980. – 256 с.

127. Портола В.А., Галсанов Н.Л. Повышение эффективности применения азота для подавления самовозгорания угля// Вестник КузГТУ. – 2011. – № 5. – С. 59–63.

128. Портола В.А., Галсанов Н.Л. Эффективность использования инертных составов для тушения пожаров в выработанном пространстве шахт// Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 6. – С. 34–37.

129. Эфрос Д.А. Исследование фильтрации неоднородных систем. М.:Недра, 1963. – 351 с.

130. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Госгортехиздат, 1957.
131. Маевская В.М., Белавенцев Л.П. Теплообмен в скоплении разрыхленного угля // Тр. ВостНИИ / Вопросы безопасности в угольных шахтах. – М.: Недра. – 1967. – Т. УШ. – С. 193.
132. Маевская В.М., Белавенцев Л.П., Рапоцевич А.П. Исследование механизма процесса самовозгорания угля // Тр. ВостНИИ / Вопросы безопасности в угольных шахтах. – М.: Недра. – 1969. – Т. X. – С. 209–225.
133. Бонецкий В.А., Фофанов Е.Д., Джексембинова А.И., Гришаков А.Ф. Теплокинетические параметры при низкотемпературном окислении угольного скопления // Тр. ВостНИИ / Проблемы аэрогазодинамики угольных шахт. – Кемерово. – 1982. – С. 121–130.
134. Badania laboratoryjne procesu samozagrzewania sie wegla przy zmiennokierunkowym przeplywie powietrza. Struminski Andrzej, Rosiek Franciszek. – Wiad. Gorn. – 1986, 37. – № 8. – 173–176.
135. Глузберг Е.И., Кузьминский С.П., Сикора Ф.Ф. Аналитическое и экспериментальное исследования самонагрева угольных целиков // Известия академии наук Киргизской ССР. – 1974. – № 1. – С. 18–24.
136. Глузберг Е.И. Математические модели самовозгорания медленно окисляющихся материалов // Тр. ВНИИПО / Применение математических методов в вопросах пожарной охраны. – М. – 1982. – С. 5–13.
137. Баев Х.А. Теоретическое исследование кинетики тепловых и термохимических процессов самовозгорания угля // Сб. тр. МакНИИ / Вопросы безопасности в угольных шахтах. – 1968. – Т. ХУШ. – С. 356–363.
138. Богуславский В.М., Качура Н.И., Фрейдман С.Л. Динамика самонагрева угля в выработанном пространстве выемочного участка // Сб. тр. Донуги / Совершенствование технологии очистных и подготовительных работ на шахтах Донбасса. – Донецк. – 1983. – С. 194–206.
139. Фрейдман С.Л. Самонагревание угольного скопления в выработанном пространстве выемочного участка // ФТПРПИ. – 1982. – № 4. – С. 91–96.

140. Глузберг Е.И. Математическая модель процесса самовозгорания угля // Изв. вузов. Горный журнал. – 1971. – № 4. – С. 62–66.

141. Лапко В.В., Дранный В.А., Штерн Ю.М., Вороной С.М. Влияние вмещающих пород на распределение тепла при самонагревании угольных скоплений в выработанном пространстве // Изв. вузов. Горный журнал. – 1985. – № 1. – С. 37–40.

142. Бонецкий В.А., Богатырева А.С., Егошин В.В. О математической модели низкотемпературного окисления угольного скопления // ФТПРПИ. – 1976. – № 6. – С. 106–111.

143. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. Госэнергоиздат, 1963. – 348 с.

144. Саульев В.К. Интегрирование уравнений параболического типа методом сеток. – М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1960. – 324 с.

145. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 656 с.

146. Годунов С.К., Рябенький В.С. Разностные схемы. – М.: Наука, 1977. – 439 с.

147. Берковский Б.М., Ноготов Е.Ф. Разностные методы исследования задач теплообмена. – Минск: Наука и техника, 1976. – 144 с.

148. Галсанов Н.Л. Изменение химической активности угля после обработки / Н.Л. Галсанов, В.А. Портола, Н.Ю. Луговцова // Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сб. трудов III Междун. науч.-практ. конф. с элементами научной школы для молодых ученых: в 2-х т. Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – Т.2. – С. 220-221.

149. Портола В.А. Развитие процесса самовозгорания в скоплении предварительно охлажденного угля / В.А. Портола, Н.Л. Галсанов, Н.Ю. Луговцова // Вестник КузГТУ. – 2013. – № 1. – С. 49–52.

150. Галсанов Н.Л. Предотвращение эндогенных пожаров в шахтах / Н.Л. Галсанов, В.А. Портола, Н.Ю. Луговцова // Природные и интеллектуальные ре-

сурсы Сибири. Сибресурс 2012: материалы XIV Межд. науч-практ. конф., 1-2 ноября 2012г./редкол.: В.Ю. Блюменштейн, КузГТУ. – Кемерово, 2012. – С. 46-50.

151. Портола В.А. Подавление очагов самовозгорания угля инертными составами на основе жидкого азота: монография / В.А. Портола, Н.Л. Галсанов; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 157 с.

152. Portola V., Galsanov N. Inert compositions for underground fire fighting in mines. Mining 2014. Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control. Chinese Coal in the XXI Century: Mining, Green and Safety, October 17-20, 2014. Qingdao, China, Atlantis press, Amsterdam – Paris – Beijing, 2014. – P. 356-360.

153. Портола В.А. Расчет процесса охлаждения очага самовозгорания угля инертными составами / В.А. Портола, Н.Л. Галсанов // Вестник КузГТУ. – 2013. – № 3. – С. 58-62.

154. Галсанов Н.Л. Тушение самовозгорания угля инертными составами / Н.Л. Галсанов, В.А. Портола // Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сб. трудов IV Междун. науч.-практ. конф. с элементами научной школы для молодых ученых: в 2-х т./ Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 467-468.

155. Портола В.А. Оценка эффективности тушения скоплений угля различными хладагентами / Портола В.А., Галсанов Н.Л. // Вестник КузГТУ. – 2014. – № 2. С. – 181-185.

156. Галсанов Н.Л. Распространение инертных составов в выработанном пространстве шахт /Н.Л. Галсанов, В.А. Портола // Вестник КузГТУ. – 2013. – № 6. – С. 80-83.

157. Портола В.А. Проблемы самовозгорания угля в шахтах / В.А. Портола, Н.Л. Галсанов, М.В. Шевченко, Н.Ю. Луговцова // Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XV111 международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-17 сентября 2011 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2011. Т.3. – С. 46-49.

158. Галсанов Н.Л. Составы для борьбы с подземными пожарами / Н.Л. Галсанов, В.А. Портола // Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. Кемерово, 22, 23 нояб. 2011г. ФГБОУ ВПО Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева. – Кемерово, 2011. – С. 79-81.

159. Галсанов Н.Л. Оборудование для борьбы с подземными пожарами инертными составами / Н.Л. Галсанов, В.А. Портола // Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах: Материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. Кемерово, 22, 23 нояб. 2011г. ФГБОУ ВПО Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева. – Кемерово, 2011. – С. 82-84.

160. Галсанов Н.Л. Использование жидкого азота для борьбы с эндогенными пожарами в шахтах // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: Материалы X Междунар. науч.-практ. конф. [Электронный ресурс] / Под ред.: О.В. Тайлаков. – Кемерово : КузГТУ, 2015.

161. Галсанов Н.Л. Получение инертизирующих составов с замораживанием частиц жидкости для борьбы с пожарами /Н.Л. Галсанов // Вестник КузГТУ. – 2016. – № 5. – С. 132-137.

162. Патент № 2472938 РФ. Способ предупреждения самовозгорания угля в шахтах / В.А. Портола, Н.Л. Галсанов Н.Л. – Заявл. 28 июля 2011; опубл. 20.01.2013. Бюл. № 2.

## ПРИЛОЖЕНИЕ



**СУЭК**

АКЦИОНЕРНОЕ  
ОБЩЕСТВО  
«СУЭК-КУЗБАСС»



Утверждаю:  
Главный инженер  
И.И. Шестаков  
М.А. Логинов

## АКТ

**Внедрения метода подавления очага самовозгорания угля инертизирующим составом с замораживанием частиц жидкости в условиях ш. «Галдинская-Западная-1»**

Прокопьевский район

07.02.2015 года был зафиксирован выход теплой воды с перемычки №141 и теплое состояние замерной трубы, в теле перемычки №122 - превышение предельно допустимой концентрации оксида углерода. Проведенный анализ состояния горных выработок позволил определить очаг возможного самонагрева угля, связанный с технологией отработки лавы 6804 в ноябре 1999 года. Пласт 68 залегает на глубине до 87м., на уровне лавы 6804 имеет мощность пласта 5,5-6,5м.

После проведения комплекса геофизических исследований с поверхности шахтного поля было предварительно определено место очага самовозгорания угля.

Было проведено техническое совещание с участием:

- инженерно-технических работников шахты,
- технического директора АО «СУЭК-Кузбасс»,
- представителя ОАО НЦ «ВостНИИ»,
- командира Прокопьевского ВГСО.

Решение технического совета:

- пробурить скважину  $\varnothing 210$ мм. L=83м. с поверхности в предварительный очаг самовозгорания угля для уточнения места очага самовозгорания угля.

С выбуренной скважины были взяты пробы газовой обстановки и определена температура в выработанном пространстве лавы 6804 которая составляла на уровне 150-200 °С.

Было проведено второе техническое совещание, на котором принято решение снижения температурного состояния провести испытания «Метода подавления самовозгорания угля инертизирующим составом с замораживанием частиц жидкости» путем подачи в скважину №8Д жидкого азота и воды через форсунки.

Для реализации решения был привлечен Прокопьевский ВГСО. После истечения 14 суток подачи инертизирующего состава температурное состояние очага самовозгорания снизилось до 90 °С, 30 суток - до 21 °С.

Таким образом, испытания подтвердили эффективность использования данного метода.

В дальнейшем, для предотвращения рецидива самовозгорания угля повторно было произведено заиливание выработанного пространства лавы 6804 глиняной пульпой.

Командир Прокопьевского ВГСО

Нач. участка АБ

