

*На правах рукописи*



**Галсанов Нима Лайдапович**

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

Специальность 05.26.03 - Пожарная и промышленная безопасность  
(в горной промышленности)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Кемерово – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор, В.А. Портола, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, нач. научно-исследовательского отдела ФГКУ «Национальный горноспасательный центр»

***Палеев Дмитрий Юрьевич***

кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры горноспасательного дела и взрывобезопасности ФГБОУ «Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы»

***Радионов Владимир Алексеевич***

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

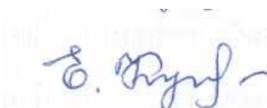
Защита состоится «21» февраля 2017 г. в 14:<sup>30</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.11 при Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС» по адресу: 11999, г. Москва, Ленинский проспект, д. 6, стр. 2, ауд. А-305

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» и на сайте: [http://misis.ru/files/4769/Galsanov\\_disser.pdf](http://misis.ru/files/4769/Galsanov_disser.pdf)

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.132.11,  
доктор технических наук, профессор



Куликова Е.Ю.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **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 скопление 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 активность 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 «Галдинская-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 Mine Disaster Prevention 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 Галдинская-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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Анализ аварийности на горных предприятиях России показывает, что большая часть аварий приходится на пожары, доля которых составляет более 45 %. Большая часть регистрируемых в Кузбассе подземных пожаров (более 77 %) вызвана самовозгоранием угля. Основная часть эндогенных пожаров в Кузбассе воз-

никает в выработанном пространстве угольных шахт, что осложняет как работы по предупреждению самовозгорания, так и тушение возникших пожаров.

Исследованием условий, способствующих развитию процесса самовозгорания угля, занимались А.А. Скочинский, В.М. Огиевский, И.М. Печук, В.С. Веселовский, П.С. Пашковский, В.И. Саранчук и др. Проведенные исследования позволили установить закономерности изменения химической активности угля, условия, способствующие развитию эндогенных пожаров в шахтах.

Особенно остро проблема борьбы с самовозгоранием встала в Кузбассе, где в сложных горно-геологических условиях добывали уголь, обладающий большой химической активностью. Большой вклад в изучение процесса самовозгорания и разработку способов борьбы с эндогенными пожарами в регионе внесли В.М. Маевская, В.Г. Игишев, Л.П. Белавенцев, О.И. Чернов, В.А. Портола, Д.Ю. Палеев и др. Благодаря применению разработанных способов борьбы с самовозгоранием угля в последние годы на шахтах снизилось количество возникающих эндогенных пожаров. Однако увеличение глубины горных работ способствует росту эндогенной пожароопасности из-за повышения температуры угля и количества подаваемого в шахты воздуха. Поэтому необходима разработка новых способов предотвращения и подавления самовозгорания угля.

Одним из наиболее распространенных способов борьбы с эндогенными пожарами в шахтах является изоляция пожарных участков. Однако качество перемычек постепенно падает, что снижает эффективность изоляции. Для профилактики самовозгорания используется подача водных растворов антипирогенов в выработанное пространство в потоке утечек воздуха. Длительное время для борьбы с подземными пожарами применяется метод заиливания. Недостатками способа являются высокая трудоемкость и опасность прорыва глины в действующие выработки. Вспенивание подаваемой воды или глинистой пульпы повышает эффективность борьбы с подземными пожарами за счет объемной обработки скоплений угля, однако из-за распада пены ограничивается дальность ее подачи.

Широко применяется для борьбы с подземными пожарами азот, подача которого приводит к инертизации атмосферы выработанного пространства. В большинстве случаев шахты получают азот в сжиженном состоянии, и для его газификации применяются теплообменники. Однако небольшие плотность и удельная теплоемкость азота не позволяют эффективно использовать его для охлаждения очагов самовозгорания. Проведенный анализ показал, что применяемые способы

борьбы с пожарами малоэффективны для тушения очагов самовозгорания. Так, на 02.11.2015 г. на шахтах Кузбасса действовало 23 подземных пожара.

Для повышения эффективности подавления очагов самовозгорания необходимо использовать составы, способные повысить теплосъем с очага и распространяться в выработанном пространстве на большие расстояния. Легко транспортируемый азот целесообразно использовать в качестве носителя для частиц, способных поглотить большое количество тепла. Увеличить теплосъем позволяют вещества, претерпевающие фазовые переходы, требующие значительное количество тепла.

Наиболее эффективно использовать в качестве частиц замороженную воду. При поступлении в разогретый уголь тепло скопления будет расходоваться на нагрев льда, воды и фазовый переход воды из твердого в жидкое состояние. В случае высокой температуры очага большое количество тепла будет отнимать переход жидкости в парообразное состояние. Поэтому использование инертизирующего состава, состоящего из инертного газа и частиц замороженной жидкости, позволит интенсифицировать теплосъем с очага и сократить время тушения.

Исследования процесса теплообмена между частицами жидкого азота и воды позволили получить следующее соотношение между расходом воды, жидкого азота и параметрами получаемого инертизирующего состава

$$\frac{G_a}{G_w} = \frac{c_w(t_o - t_L) + r_L + c_L(t_L - t_c)}{r_a + c_a(t_c - t_a)}. \quad (1)$$

где  $G_a$  – расход азота, кг/с;  $r_a$  – удельная теплота испарения жидкого азота, кДж/кг;  $G_w$  – расход воды, кг/с;  $c_w$  – удельная теплоемкость подаваемой воды, кДж/(кг·К);  $t_o$  – начальная температура воды, °С;  $t_L$  – температура замерзания воды, °С;  $r_L$  – удельная теплота замерзания воды, кДж/кг;  $c_L$  – удельная теплоемкость льда, кДж/(кг·К);  $t_c$  – температура образуемой смеси из азота и воды, °С;  $c_a$  – удельная теплоемкость газообразного азота, кДж/(кг·К);  $t_a$  – температура кипения жидкого азота, °С.

Анализ уравнения (1) показывает, что изменение соотношения расхода жидкого азота и воды позволяет управлять температурой инертизирующего состава, состоящего из инертного газа и частиц льда. Соответственно в составе изменяется и содержание частиц льда. Влияние начальной температуры воды на со-

отношение расходов жидкого азота и воды для получения инертной смеси с температурой  $-100^{\circ}\text{C}$  приведено на рис. 1.

Анализируя данные, приведенные на рис. 1, 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.

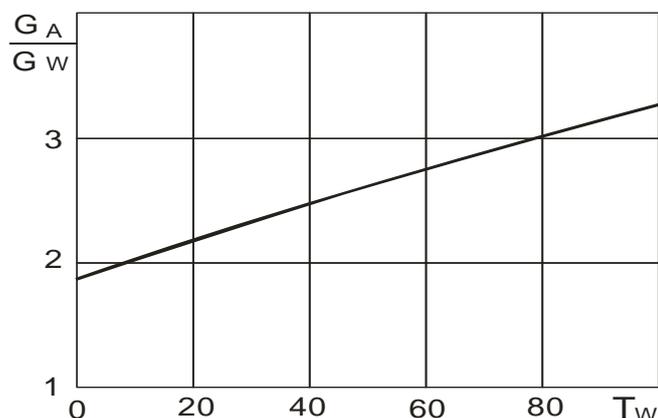


Рисунок 1 – Влияние начальной температуры воды ( $T_w$ ) на соотношение расхода жидкого азота ( $G_A$ ) и воды ( $G_W$ ) для получения инертизирующего состава с температурой  $-100^{\circ}\text{C}$

Исследования возможности использования водяного пара для газификации жидкого азота показали, что замена воды паром сокращает количество теплоносителя, необходимого для испарения жидкого азота. Значительно уменьшается общее содержание частиц льда в азоте. Однако использование водяного пара позволяет существенно уменьшить размеры образующихся частиц льда. Поэтому такой инертизирующий состав способен лучше проникать через скопления угля.

Параметры инертизирующего состава, имеющего температуру  $-100^{\circ}\text{C}$ , полученного из жидкого азота и воды, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры инертизирующего состава с температурой  $-100^{\circ}\text{C}$ , 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

Расчеты показали, 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. Параметры инертизирующего состава, состоящего из азота и частиц льда, можно изменять в широком диапазоне в зависимости от соотношения исходных компонентов, а также температуры подаваемых воды или пара. 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.

Одним из параметров, влияющих на процесс охлаждения очага самовозгорания, является плотность хладагента. Плотность инертизирующего состава, получаемого из жидкого азота и воды, можно определить из выражения

$$\rho_C = \rho_a \left(1 + \frac{1}{G_a / G_B}\right). \quad (2)$$

Приведенные на рис. 2 данные показывают, что плотность инертизирующего состава увеличивается с ростом расхода воды, используемой для распыления с жидким азотом.

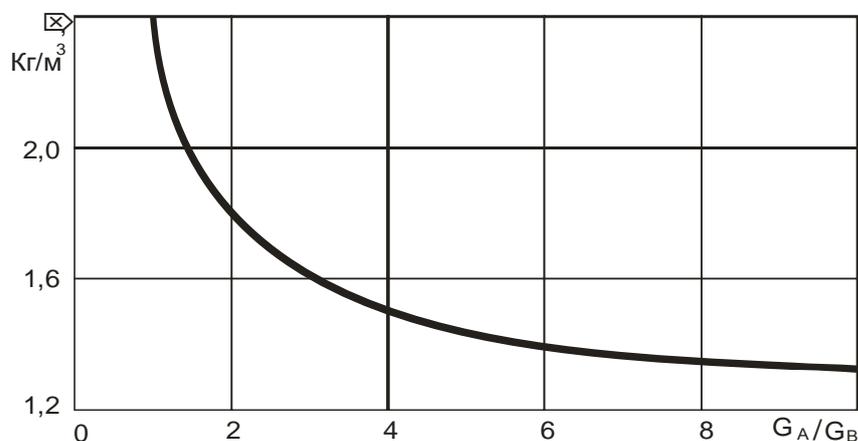


Рисунок 2 – Влияние соотношения расходов жидкого азота (G<sub>A</sub>) и воды (G<sub>B</sub>) на плотность образующегося состава (ρ)

**Таким образом, проведенными исследованиями установлено, что 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.**

Обработка угля инертизирующим составом, содержащим азот и частицы замороженной жидкости, приводит к изменению ряда физических и химических свойств угля и окружающей его газа, оказывающих влияние на развитие процесса самовозгорания. Так, подача состава изменяет температуру угля и состав атмосферы выработанного пространства. Частицы льда, осевшие в порах и трещинах выработанного пространства, начинают таять и увлажняют угольное скопление.

Снижение температуры и увеличение влажности угольного скопления приводит к изменению удельной теплоемкости, коэффициента теплопроводности и плотности угля. Влажность угольного скопления после подачи инертизирующего состава можно определить по выражению

$$W = \frac{\Pi[r_a + c_a(t_C - t_L)]}{c_w(t_o - t_L) + r_L + c_L(t_L - t_C) + [r_a + c_a(t_C - t_L)]} \quad (3)$$

где  $\Pi$  – пористость скопления угля, доли ед.

Зависимость влажности обработанного угольного скопления от температуры поданного инертизирующего состава приведены на рис. 3

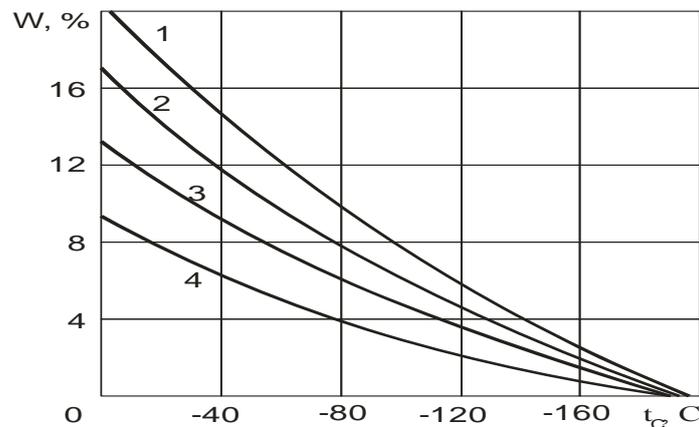


Рисунок 3 – Влияние температуры инертизирующего состава ( $t_c$ ) на влажность угольного скопления ( $W$ ) с пористостью: 1 – пористость 0,5; 2 – пористость 0,4; 3 – пористость 0,3; 4 – пористость 0,2

Анализ полученных данных показывает, что 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.

Для профилактики самовозгорания угля целесообразно использовать инертизирующие составы с температурой выше  $-80^{\circ}\text{C}$ . В этих случаях добавленная влага способна замедлить развитие самовозгорания из-за потерь тепла на нагрев

жидкости. Дополнительная жидкость увеличивает коэффициент теплопроводности угля, что способствует потерям тепла, образующегося при окислении угля.

Исследование химической активности угля проводилось по методике ИГД им. А.А. Скочинского. В экспериментах оценивали изменение химической активности угля при снижении его температуры. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 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

Анализируя приведенные данные можно сделать вывод, что охлаждение 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. 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 охлаждение угля до отрицательных температур также вызвало уменьшение скорости сорбции кислорода.

Исходя из полученных результатов, можно рекомендовать производить профилактику процесса самовозгорания угля путем снижения температуры угольных скоплений.

При тушении очагов самовозгорания также следует снижать температуру обрабатываемого угля не до 25 °С (при которой эндогенный пожар можно списывать в категорию потушенных), а до температуры замерзания воды, что позволит избежать рецидива пожара.

Результаты исследования влияния на химическую активность угля газообразного азота и жидкой фазы инертизирующих составов, образующейся после таяния частиц льда, приведены на рис. 4.

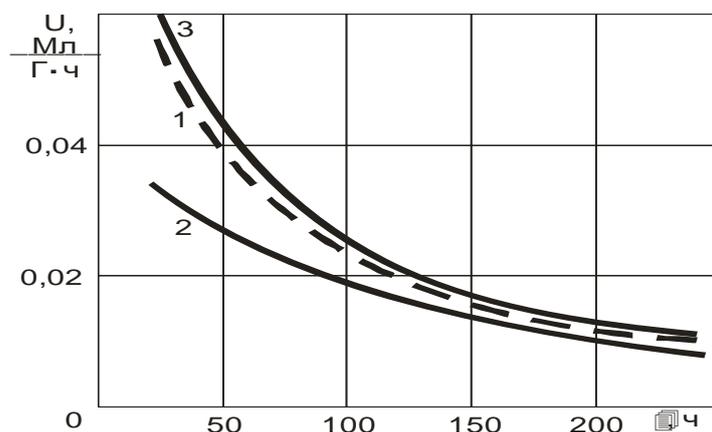


Рисунок 4 – Изменение скорости сорбции углем ( $U$ ) со временем: 1 – не обработанный уголь; 2 – обработан азотом с частицами воды; 3 – обработан азотом

Исследования показали, что частицы воды, осевшие на поверхность угля из 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, что может быть объяснено удалением кислорода, ранее адсорбированного на поверхности угля. Поэтому после восстановления притока воздуха кислород начинает более интенсивно поглощаться углем.

**Таким образом, проведенные исследования 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.**

Исследование процесса охлаждения очага самовозгорания угля при подаче инертизирующих составов осуществлялось с помощью математического моделирования. В процессе исследования оценивались хладагентные свойства инертизирующих составов, подаваемых с различной скоростью через угольное скопление. Также изучалось влияние на процесс охлаждения угля начальной температуры составов и соотношения расходов жидкого азота и воды, используемых для получения хладагента.

На рис. 5 представлено распределение температур в скоплении угля в различные моменты времени при подаче инертизирующего состава с начальной тем-

пературой  $-100^{\circ}\text{C}$ . Скорость движения состава с частицами льда в порах и трещинах угольного скопления равнялась  $0,1\text{ м/с}$ .

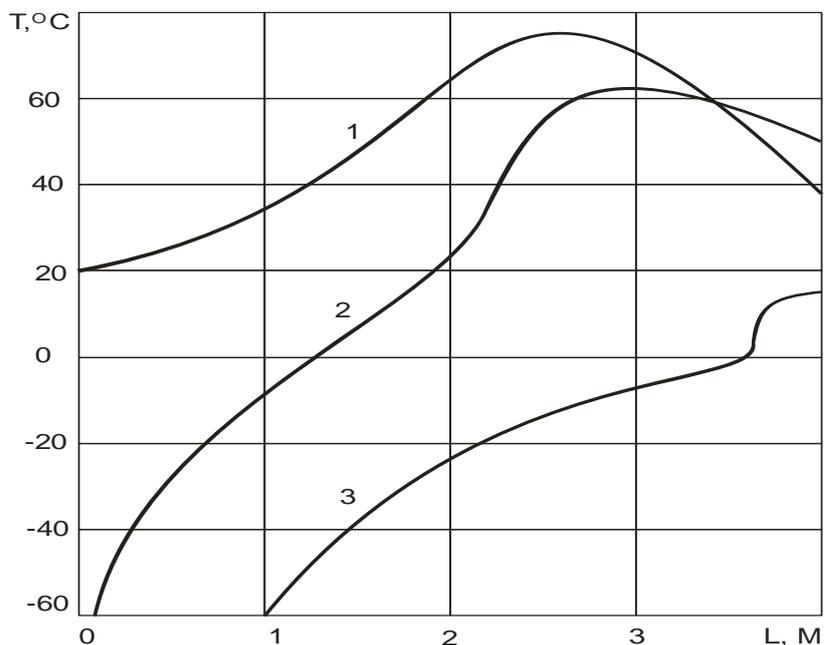


Рисунок 5 – Охлаждение скопления инертизирующим составом из воды и жидкого азота с температурой  $-100^{\circ}\text{C}$ , подаваемого со скоростью  $0,1\text{ м/с}$ :  
1 – начальное состояние; 2 – через 2 часа; 3 – через 6 часов

Аналогичные расчеты проводились при подаче составов, получаемых из жидкого азота и пара. Из результатов следует, что замена воды водяным паром существенно ухудшает хладагентное действие инертизирующего состава.

На рис. 6 показана длительность охлаждения разогретого угольного скопления в зависимости от исходной температуры инертизирующего состава. Анализ данных показывает, 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.

**Таким образом, результаты исследований доказали, что увеличение температуры инертизирующего состава сопровождается ростом доли частиц льда в нем и приводит к повышению эффективности охлаждения очагов самонагревания.**

Поступление инертизирующего состава в очаг самовозгорания угля в выработанном пространстве шахты может быть обеспечено через скважины, пробу-

ренные с земной поверхности или из близлежащих горных выработок. Разработано, изготовлено и испытано устройство для получения инертизирующих составов

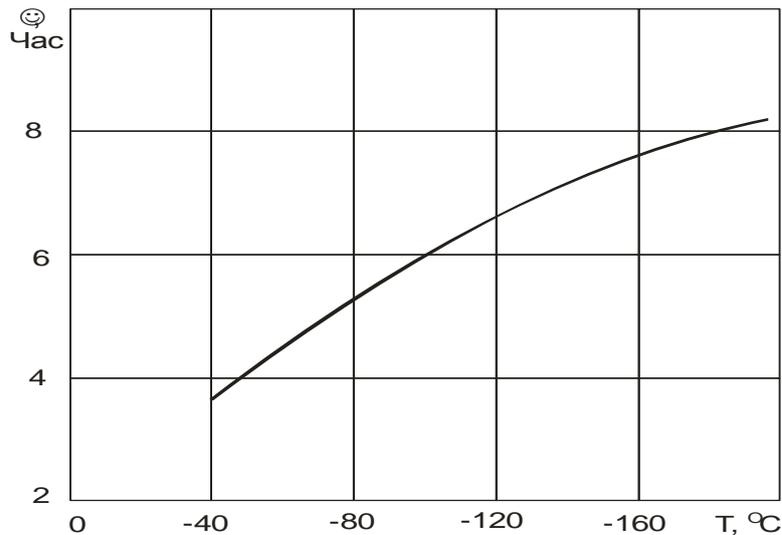


Рисунок 6 – Длительность остывания скопления угля ( $\tau$ ) в зависимости от начальной температуры инертизирующего состава ( $T$ )

Разработаны схемы подачи инертизирующих составов в выработанное пространство через скважины, пробуренные с поверхности и из горных выработок. Выдачу жидкого азота на поверхности можно осуществлять криогенными цистернами, например, резервуаром транспортным вертикальным РТВ-1,8/0,25 или стационарными криогенными емкостями типа РКВ. Для хранения и выдачи жидкого азота в шахтных условиях можно использовать установку УТЖА-2, состоящую из двух цистерн ЦТК-0,5/0,25. Разработанное устройство применено для борьбы с самовозгоранием угля на шахте Талдинская Западная 1.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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).

10. 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).

11. 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.

12. 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.

13. Исследования, проведенные на экспериментальном устройстве для получения инертизирующего состава на основе жидкого азота и воды, показали

удовлетворительную сходимость результатов натуральных и аналитических исследований свойств инертизирующего состава.

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

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах**

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

2. 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.

3. 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.

4. 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.

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

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

7. 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.

8. Галсанов Н.Л. Предотвращение эндогенных пожаров в шахтах / Н.Л. Галсанов, В.А. Портола, Н.Ю. Луговцова // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2012: материалы XIY Межд. науч-практ. конф., 1-2 ноября 2012г./редкол.: В.Ю. Блюменштейн, КузГТУ. – Кемерово, 2012. – С. 46-50.

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

10. 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.

11. 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.

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

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

14. 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.

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

16. Portola V., Galsanov N. Inert compositions for underground fire fighting in mines. Mining 2014. Taishan Academic Forum – Project on Vine 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.

17. 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.

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