

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ИНДИКАТОРНЫХ ГАЗОВ ПРИ РАЗРУШЕНИИ УГЛЯ

© Yu. Gamiy

### INVESTIGATION OF INDICATOR GASES IN THE DESTRUCTION OF COAL

**Цель.** Исследование выделения индикаторных газов при разрушении угля. Обнаружение причин влияющих на выделение индикаторных газов.

**Методика.** В проведении экспериментов использовались угольные пробы различных пластов. Пробы были отобраны согласно методики отбора проб углей в подземных выработках шахт для определения склонности угля к самовозгоранию. Затем уголь подготавливался для дальнейшего разрушения размером фракционного состава 2 мм. Затем эксперимент заключался в разрушении угля с применением специальной установки для его разрушения. Отбирались газовые пробы в резиновые камеры, после чего в газоаналитической лаборатории ГВГСС с помощью газоанализатора «Кристалл 2000-М» определяли содержание газов (%). Также был выполнен замер температуры в момент разрушения угля. В экспериментах использованы пробы угля угольных предприятий шахтоуправление «Покровское», шахта Капитальная ГП Мирноградуголь, шахта Центральная ГП Мирноградуголь, шахта Пионер Добропольеуголь.

**Результаты.** Исследована причина выделения оксида углерода при разрушении угля (изменении фракционного состава) углей. Исследованы результаты лабораторных исследований, которые подтверждают выделение индикаторных газов. Установлены концентрации оксида углерода превышающие предельно допустимые концентрации (ПДК) в период разрушения угля. Сделан вывод о возможности превышения доли индикаторных газов над фоновыми значениями уже на этапе разрушения угля, без наличия очага самонагревания.

Доказано опытным путем, что выделение оксида углерода обнаружено до температуры, превышающей критическую для самовозгорания каменного угля 363-393 К (плюс 90-120 °С).

**Научная новизна.** Установлена концентрация индикаторных газов при разрушении угля экспериментальным путем.

**Практическая значимость.** Возможность использования значений индикаторных газов (ИГ) для прогноза на этапе ведения выемочных работ. Определение фонового содержания оксида углерода и водорода выемочного участка.

**Ключевые слова:** разрушение угля, индикаторные газы, оксид углерода, очаг самовозгорания, фоновое содержание оксида углерода и водорода, пробы угля.

**Вступление.** В настоящее время используется выемка угля на шахтах Украины механическим и ручным способом. На пологом падении применяют комбайны, на крутых пластах – в основном отбойные молотки. На 2018 год из 25 шахт Донбасса комбайны применяются на 45 выемочных участках, пневматические отбойные молотки используются в 8 забоях. К недостаткам комбайнов с шнековыми исполнительными органами можно отнести повышенный выход штыбов 0 – 6 мм [1]. Так сформулированное понятие объясняет, что объемная доля индикаторных газов формируется при конкретных горно-геологических условиях и установившихся технологических режимах отбойки угля, управле-

ния кровлей и проветривания очистного забоя [2]. Вопрос о том, что определяет интенсивность выделения (ИГ) при низких температурах, представляет не только научный, но и прикладной интерес, так как от его правильного решения зависит выбор методов и средств для обнаружения, предупреждения самонагревания угля при ведении выемочных работ.

Процесс изменения фракционного состава угля связан с выделением ранее сорбированных в нем газов, что приводит к механизму разрыву связей в молекулах. Химическая реакция окисления угля кислородом имеет радикально-цепной характер. Образование конечных продуктов реакции (углекислый газ  $\text{CO}_2$ , вода  $\text{H}_2\text{O}$ ) происходит не непосредственным присоединением атомов кислорода к атомам углерода и водорода, из которых в основном состоит органическая часть угля путем образования ряда промежуточных продуктов-радикалов, образующих последовательные и параллельные (разветвляющиеся) цепи. [3]. При выемке угля механическим способом увеличивается концентрация метана, оксида углерода, углекислого газа. Содержание оксида углерода  $\text{CO}$  в рудничной атмосфере также варьируется в зависимости от характеристик угля [2].

**Постановка проблемы.** Исследование процессов самонагревания несомненно показывает, что процесс повышения температуры угля в результате его окисления в естественных условиях в полном объеме не изучен [4]. Так исследования, выполненные НИИГД «Респиратор», показали, что скорость окисления увеличивается лишь при уменьшении размеров частиц до определенных пределов, и дальнейшее уменьшение фракций угля приводит к повышению скорости окисления [4]. Во время проведения газовой съемки, для определения фонового содержания оксида углерода и водорода, в выработках выемочного участка расположение замерных пунктов не предусматривает точку отбора проб непосредственно в выемочном участке.

Доля индикаторных газов в шахтном воздухе при наличии очага самонагревания зависит не только от стадии пожара, но и от подачи в выемочное поле воздуха и его утечек в выработанное пространство. Выделение газов на всей температурной кривой разогревания угля и зависимость их объемной доли в воздухе от вентиляционного режима и его изменения во времени предопределяют присущие газоаналитическому методу ошибки двух родов: первая – при объемной доле, например, оксида углерода менее 0,01% дается заключение «нет пожара» - при его наличии в стадии установившегося горения; вторая – при большой объемной доле индикаторных газов делается вывод о наличии пожара и опасности взрыва горючих газов делается вывод о наличии пожара и опасности взрыва горючих газов при фактической температуре в очаге самонагревания менее критической. Также признаком самонагревания угля является устойчивая объемная доля оксида углерода и водорода, превышающая фоновую в горной выработке. При этом на стадии самонагревания отношение долей  $\text{CO}$  к  $\text{H}_2$  превышает 10, а на стадии горения – менее 10 [5].

Поэтому одной из первостепенных задач будет являться обнаружение места и причин образования индикаторных газов.

**Цель работы.** Обнаружение места и причин выделения индикаторных газов, которые превышают предельно-допустимую концентрацию.

**Изложение основного материала.** Современное определение самонагревания угля – это процесс повышения температуры угля в результате его окисления в естественных условиях. Так, стадия самонагревания угля протекает в интервале температур при значениях 293-323 К (плюс 20-50 °С) до критической, при достижении которой начинается ее дальнейший быстрый рост, приводящий к самовозгоранию угля. Для каменного угля критическая температура самовозгорания каменного угля изменяется от 363 К до 393 К (плюс 90-120 °С). Схема развития процесса выделения индикаторных газов при изменении гранулометрического состава в результате ведения горных работ представлена на (рис. 1).

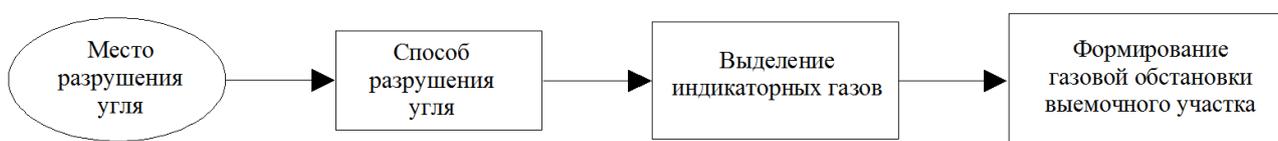


Рис. 1. Выделение индикаторных газов при ведении горных работ

Местом разрушения угля является механическое воздействие комбайна на угольный пласт. Длительное воздействие на уголь ускоряет выделение теплоты и газообразных продуктов: углекислый газ, оксид углерода, метан, водород. Для разрушения полезных ископаемых применяются следующие способы: гидравлический и механогидравлический, отбойным молотком, физико-химический и механический. В настоящее время наиболее широкое распространение получила выемка угля механическим способом. На пологом падении – посредством комбайнов, стругов, бурошнековых установок, на крутых пластах – комбайнов, конвейеростругов [1]. Поэтому для проведения эксперимента было принято решение разрушать уголь наиболее применяемым механическим способом. Способ разрушения угля, изменившиеся прочностные и структурные свойства играют значительную роль в развитии процесса формирования индикаторных компонентов. Определение фонового содержания оксида углерода и водорода выемочного участка производится в соответствии с КД 12.01.401-96 «Методика определения фонового содержания оксида углерода и водорода в горных выработках шахт Донбасса». Поэтому основными информативными газами в проведении эксперимента, при разрушении угля будут являться оксид углерода и водород. Физико-химические свойства этих газов заключаются в том, что они практически не сорбируются разрыхленным углем и боковыми породами в выработанном пространстве, не растворяются в воде, обладают инертностью при низких температурах [2].

Выполненный анализ образования оксида углерода при механической выемке угля подтверждает необходимость исследования данных результатов [6].

Стандартизированная «Методика определения фонового содержания оксида углерода и водорода в горных выработках шахт Донбасса» не позволяет оце-

нить фоновую долю индикаторных газов при разрушении угля [7]. Для обнаружения причины, в исследованиях была использована установка для разрушения угля (рис.2).

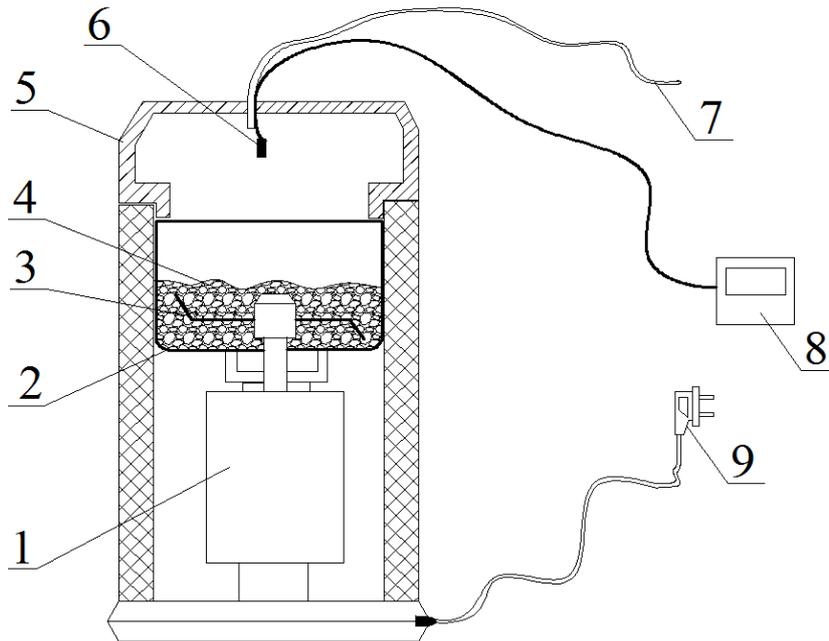


Рис. 2. Схема установки для изменения фракционного состава угля:  
 1 – электропривод; 2 – бункер; 3 – лопасти ножа; 4 – уголь; 5 – крышка;  
 6 – термопара; 7 – трубка для отбора проб; 8 – электронный дисплей температуры; 9 – питание установки

Для выявления особенностей выделения индикаторных газов при изменении гранулометрического состава угля использовались пробы пластов угля  $m_4^2$ ,  $d_4$ ,  $k_5$ ,  $l_1$ . После разрушения угля до фракционного состава 2 мм была определена его влага одноступенчатым методом. Пробы углей не более 2 мм были высушены при температуре  $105\text{ }^{\circ}\text{C} - 110\text{ }^{\circ}\text{C}$  в сушильном шкафу на воздухе с скоростью обмена воздуха – до 5 раз в час. Массовая доля ( $W$ ) влаги проб составила  $2,5 \div 2,9\%$ .

Условия проведения экспериментов сводились к следующему: масса угля – 200 г; фракция – 2 мм; время разрушения проб угля – 30 с. Уголь засыпался в бункер и разрушался лопастями ножа, выполнялся контроль температуры угля и в камере бункера, замер газов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  до и после механического разрушения. Газовые пробы отбирались в резиновые камеры для дальнейшего определения концентраций в газоаналитической лаборатории ГВГСС. Для определения объемных долей, % газов использовался шахтный газоанализатор «Кристалл 2000-М». Время разрушения проб угля составило 30 с.

Концентрации газов проведенного эксперимента по выделению индикаторных газов из углей приведены в таблице 1.

## Концентрация газов, регистрируемых при разрушении угля

№ п/п	Наименование предприятия, уголь, пласт	Концентрация газов, %				
		CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>
1	ЧАО ШУ «Покровское», пласт $d_4$	0,1	20,9	0,2	0,0012	0,0010
2	ОП шахта «Центральная» ГП Мирноградуголь, пласт $k_5$	0,2	20,3	0,5	0,0036	0,0004
2	ОП шахта «Капитальная» ГП Мирноградуголь, пласт $l_1$	0,5	18,1	10,0	0,0012	0,0006
4	ООО Добропольеуголь шаха «Пионер», пласт $m_4^2$	0,2	20,5	0,2	0,0032	0,0028

Выполненные замеры концентрации газов до разрушения проб угля были следующими: CO<sub>2</sub> – 0,0%, O<sub>2</sub> – 21%, CH<sub>4</sub>– 0,0%, CO – 0,0%, H<sub>2</sub> – 0,0%, T – 14,2<sup>0</sup>C.

Выполненный анализ результатов замера газового состава после разрушения угля, приведенных в таблице 1 показывает, что максимальная объемная доля оксида углерода составила 0,0036% пласта  $k_5$ , максимальное содержание водорода составило 0,0028% пласта  $m_4^2$ . Максимальное содержание CH<sub>4</sub> равно 10% пласта  $l_1$ .

Исследованные результаты показали, что температура угольных проб на 1 стадии равна 14,2<sup>0</sup>C. После разрушения температура проб угля по пластам составила  $m_4^2$  – 26,8<sup>0</sup>C,  $d_4$  – 26,4<sup>0</sup>C,  $k_5$  – 31,8<sup>0</sup>C,  $l_1$  – 26,6<sup>0</sup>C. Экспериментально установлено, что резкое увеличение концентрации оксида углерода (0,0% ... 0,0036%) наблюдалось в интервале температур от (26,4<sup>0</sup>C...31,8<sup>0</sup>C). Можно сделать вывод, что для исследованных углей Донецкой области основной причиной выделения оксида углерода при разрушении угля механическим способом является процесс не только окисления угля кислородом, но и ведение выемочных работ с применением механического способа. Из результатов исследований можно отметить зависимость выделения оксида углерода от времени воздействия на угольную пробу, приведенную по следующим пластам угля  $m_4^2$ ,  $d_4$ ,  $k_5$ ,  $l_1$  на рис. 3, 4, 5, 6.

Результаты лабораторных исследований, частично приведенные в таблице 1 иллюстрируют стадийность выделения газов CO. В частности, признаки стадии выделения оксида углерода могут быть обнаружены до температуры, не превышающей критическую для самовозгорания каменного угля 363-393 К (плюс 90-120<sup>0</sup>C).

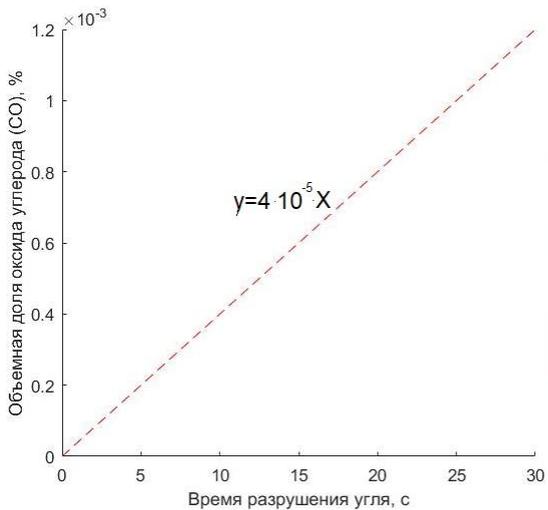


Рис. 3. Зависимость выделения оксида углерода при разрушении угля пл.  $d_4$

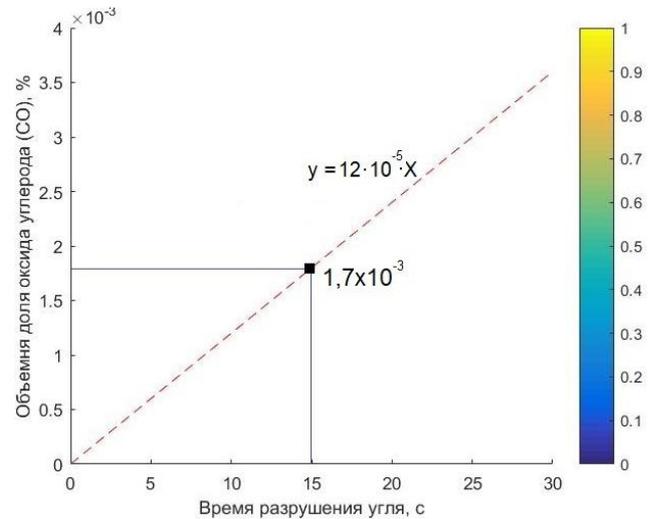


Рис. 4. Зависимость выделения оксида углерода при разрушении угля пл.  $k_5$

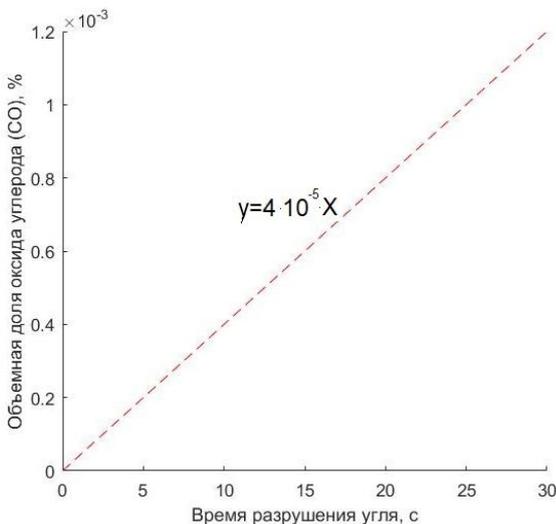


Рис. 5. Зависимость выделения оксида углерода при разрушении угля пл.  $l_1$

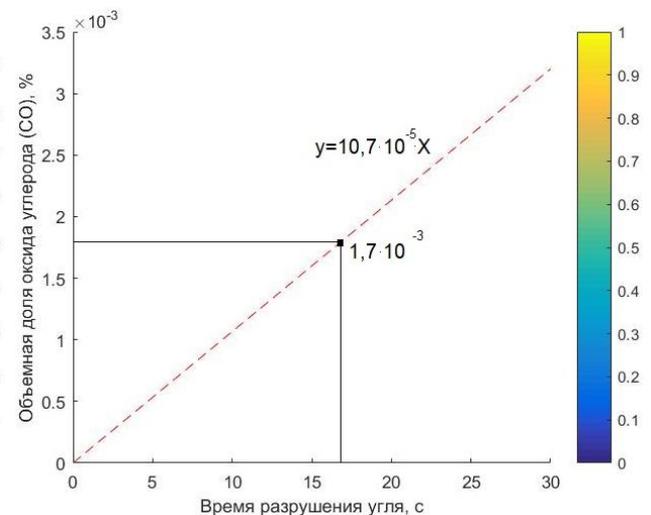


Рис. 6. Зависимость выделения оксида углерода при разрушении угля пл.  $m_4^2$

Экспериментальным путем установлено, что на превышение ПДК (CO) влияет время разрушения угольной пробы. Так например, для пласта время составило  $m_4^2$  – 17 с, для пласта  $k_5$  – 15 с, рисунки 4,6.

Вертикальная шкала палитры рис. 3, 4, 5, 6 отображает текущую цветовую карту и показывает, что значения данных увеличиваются после 0,8.

Сделанный анализ образования оксида углерода на стадии ведения очистных работ при естественной температуре подтверждает, что оксид углерода выделяется при температуре, не превышающей критическую температуру самовозгорания.

Подобный механизм выделения оксида углерода можно объяснить следующим образом. Содержащийся в поровом пространстве газ высвобождается вследствие разрушения структуры угля шнековым исполнительным органом

комбайна. Происходит десорбция газа со свежееобнаженных угольных поверхностей в отдельных от пласта кусках.

Разрушение угля сопровождается интенсивным выделением теплоты и резким ускорением процесса окисления. Экспериментальное определение критических температур самовозгорания углей Донбасса показала, что для различных углей колеблются в широком диапазоне (323...393 К). При этом как правило, низкие критические температуры соответствуют пластам, на которых были частые случаи самовозгорания углей, а высокие – пластам, на которых самовозгорания не было или же пожары произошли в единичных случаях [2].

Согласно «Методики определения фонового содержания оксида углерода и водорода в горных выработках шахт Донбасса» отбор проб рудничного воздуха производится в выемочном участке на поступающей и исходящей из очистного забоя струях. С помощью исследованных результатов определим недостаток методики и объясним причину. Во время проведения газовой съемки, для определения фонового содержания оксида углерода и водорода, в выработках выемочного участка замерным пунктам необходимо добавить точку отбора газовой пробы (точка 2) в лаве выемочного, так как происходит разрушение угля механическим способом и выделяются (ИГ) рис. 7.

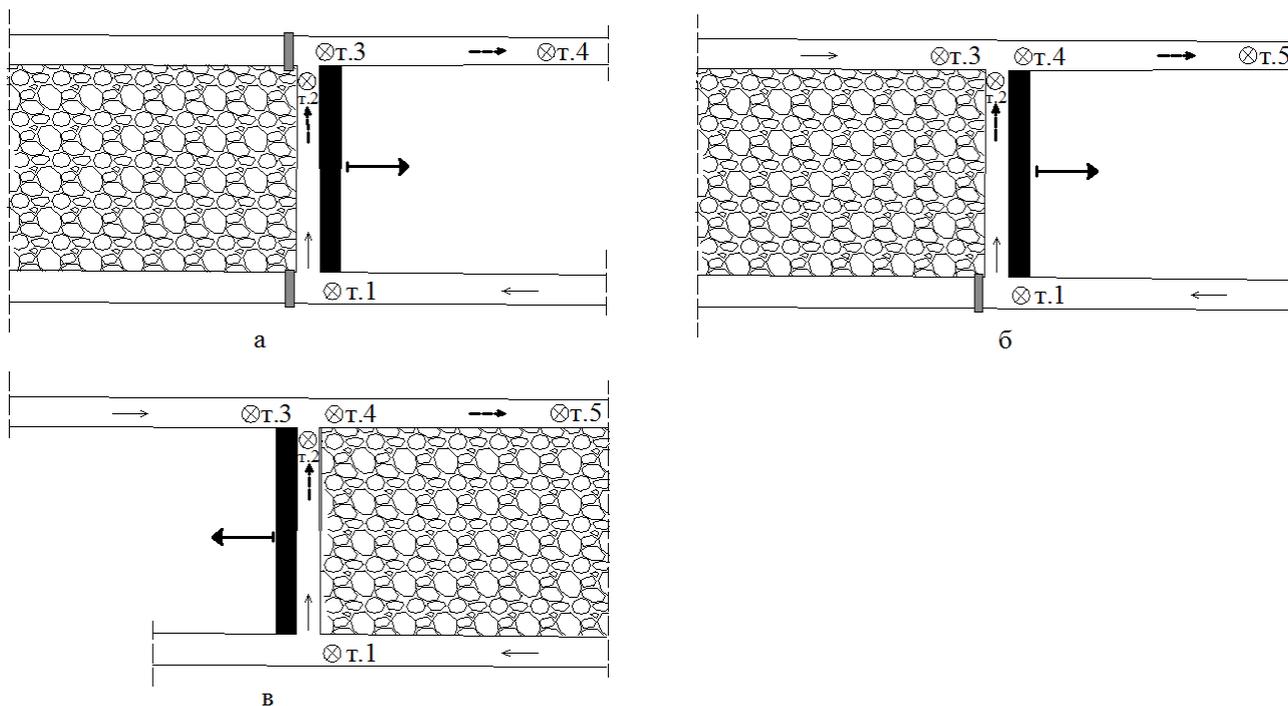


Рис. 7. Схема расположения мест отбора проб газов при возвратноточной схеме проветривания (а) и подсвеживания исходящей струи на массив угля (б) и выработанное пространство (в): ⊗ – место отбора проб газа; → – свежая струя воздуха; ↔ – исходящая струя воздуха

Опыт, связанный с ведением горных работ при возникновении опасности самонагрева и самовозгорания угля, показывает, что для существующей оценки возникновения эндогенного пожара необходимо введение предельного значения окиси углерода [8]. Во многих случаях такое самовозгорание угля яв-

ляется источником инициирования метано-воздушной смеси с трагическими последствиями. Самовозгорание угля и определения температуры, его места на выемочном участке является ключевой частью безопасности подземных угольных шахт.

Уголь разрушается при ведении горных работ, транспортировке и переработке. С появлением механизированных комплексов добычи угля появилось 50% мелкого угля гранулометрическим составом менее 10 мм. Проблема влияния дезинтеграции на сорбцию может иметь большое значение, поскольку оставление в углях частиц не десорбированных газов может привести к взрывоопасной концентрации в угольных шахтах [9]. В результате выполненных лабораторных экспериментов для изучения выделения оксида углерода при самонагревании трех образцов угля США при температуре от 50 до 110 °С было установлено что концентрации СО увеличивались при повышении начальной температуры [10].

Для предотвращения необоснованных расходов, которые будут направлены на ликвидацию не существующих очагов самонагревания угля необходимо определять фоновые значения индикаторных газов также с учетом замера концентраций газов при ведении выемочных работ. Выполнение данных работ будет направлено на повышения эффективности обнаружения достоверного состояния начальной стадии процесса самонагревания угля в шахтах.

**Выводы.** При разрушении угля механическим способом, создаются условия, способствующие десорбции оксида углерода из угля. Интенсивность выделения индикаторных газов (оксида углерода, водорода) при изменении фракционного состава может изменяться в широком диапазоне в зависимости от свойств угля. Стадия выделения индикаторных газов происходит в интервале температур от +14,2 до +31,8°С. Повышенное содержание в рудничной атмосфере таких газов как метан, оксид углерода, водород можно прогнозировать при ведении выемочных работ. Для определения фонового содержания оксида углерода и водорода выемочного участка необходимо добавить место отбора газовой пробы в лаве при ведении очистных работ (разрушении угля) с целью определения концентрации индикаторных газов по соответствующему пласту. Так можно сделать предположение, что при ведении очистных работ, время разрушения угля исполнительным органом должно быть минимальным. Установление закономерностей выделения различных газов при изменении фракционного состава позволит повысить эффективность прогноза при ведении выемочных работ

Выбор при проведении эксперимента установленных показателей индикаторных газов для соответствующих пластов важен и для эффективного использования «Методики определения фонового содержания оксида углерода и водорода в горных выработках шахт Донбасса», что снизит риск и потерю времени на обнаружение мест самонагревания угля при ведении выемочных работ.

### Перечень ссылок

1. Харченко В.В., Овчинников Н.П., Сулаев В.И. Гайдай А.А., Русских В.В. (2014). Процессы очистных работ на пластах угольных шахтах: Учебник. Государственное ВУЗ «НГУ» Днепропетровск, 170 с. <http://ir.nmu.org.ua/xmlui/handle/123456789/146683>
2. Пашковский П.С. (2013). Эндогенные пожары в угольных шахтах.: Монография. Донецк: Ноулидж (донецкое отделение), 611 с.
3. Глузберг Е.И., Гращенков Н.Ф., Шалаев В.С. (1988). Комплексная профилактика газовой и пожарной опасности в угольных шахтах. Недра, 181 с.
4. Игишев В.Г., (1987) Борьба с самовозгоранием угля в шахтах. Недра, 176 с.
5. Руководство по предупреждению и тушению эндогенных пожаров на угольных шахтах Украины (2000), КД 12.01.402-2000, 216 с.
6. Гамий Ю.В. (2019). Применение европейского подхода к прогнозу самонагревания угля на шахтах Украины. Gamiy Y., Liashok Y., Kostenko V., Zavialova O., Kostenko T., Kostyrka O. (2019) *Mining of Mineral Deposits*, 13 (1), 42-50.
7. Эндогенные пожары на угольных шахтах Донбасса. Предупреждение и тушение, (1997), НПО Респиратор, КД 12.01.401-96, 70 с.
8. Trenchek S. (2017) Assessment of methane and spontaneous fire hazards level in the areas ventilated by refreshment of returned air in light of the applicable regulations, Katowice: №10. – P 21–28.
9. Zyla M., Dudzinska A., Cygankiewicz J. (2013) The influence of disintegration of hard coal varieties of different metamorphism grade on the amount of sorbed ethane. *Arch. Min. Sci.*, Vol. 58, No 2, p. 449–463. [https://www.researchgate.net/.../260727794\\_The\\_Influence](https://www.researchgate.net/.../260727794_The_Influence)
10. Cliff, D., Clarkson, F., Davis, R., Bennett, T. (2000). The implications of large scale tests for the detection and monitoring of spontaneous combustion in underground coal. 2000 Queensland Mining Industry Health and Safety Conference, 27–30 August 2000, Queensland, Australia. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4508250/>

### АНОТАЦІЯ

**Мета.** Дослідження виділення індикаторних газів при руйнуванні вугілля. Виявлення причин, що впливають на виділення індикаторних газів.

**Методика.** При проведенні експериментів використовувалися проби вугілля різних пластів. Пробу було відібрано згідно з методиками відбору проб вугілля в підземних виробках шахт для визначення схильності вугілля до самозаймання. Далі вугілля готували для подальшого руйнування розміром фракційного складу 2 мм. Подальший експеримент полягав у руйнуванні вугілля із застосуванням спеціальної установки для його руйнування. Відбиралися газові проби в гумові камери, після чого в газоаналітичній лабораторії ДВГРС за допомогою газоаналізатора «Кристал 2000-М» визначали вміст газів (%). Також було виміряно температуру в момент руйнування вугілля. В експериментах були використані проби вугілля вугільних підприємств шахтоуправління «Покровське», шахти Капітальна ДП «Мирноградвугілля», шахти Центральна ДП «Мирноградвугілля», шахти «Піонер» «Добропіллявугілля».

**Результати.** Досліджено причину виділення СО при руйнуванні вугілля (зміні фракційного складу) вугілля. Досліджено результати лабораторних даних, які підтверджують виділення індикаторних газів. Встановлено концентрації оксиду вуглецю, які перевищують гранично допустимі концентрації (ГДК) в період руйнування вугілля. Зроблено висновок про можливість перевищення частки індикаторних газів над фоновими значеннями вже на етапі руйнування вугілля, без наявності осередку самонагрівання.

Доведено дослідним шляхом, що виділення оксиду вуглецю виявлено до температури, яка перевищує критичну для самозаймання кам'яного вугілля 363-393 К (плюс 90-120 0С).

**Наукова новизна.** Установлено концентрацію індикаторних газів при руйнуванні вугілля експериментальним шляхом.

**Практична значимість.** Можливість використання отриманих значень індикаторних газів (ІГ) для прогнозу на етапі ведення виїмкових робіт. Визначення фонового вмісту оксиду вуглецю та водню виїмкової ділянки.

**Ключові слова:** руйнування вугілля, індикаторні гази, оксид вуглецю, осередок самозаймання, фоновий вміст оксиду вуглецю і водню, проби вугілля.

#### ABSTRACT

**The purpose of the work** is to investigate indicator gas emission in coal destruction, and to discover the factors influencing the indicator gasses' emission.

**Research methods.** Coal samples from various coal seams were used in experiments. The samples were selected in accordance with the methods of coal sampling in underground mine workings designed for determination of coal proneness to spontaneous combustion. Then coal was prepared to further destruction for 2 mm fraction size. The experiment included the coal destruction by means of a special installation. Gas samples were gathered in rubber chambers followed by the gasses percentage detection in the gas-analyzing laboratory of National Mine Rescue Service using Crystal 2000-M gas analyzer. Besides, temperature was measured in the moment of the coal destruction. The coal samples under experiments were gathered at coalmines as follows: Pokrovske Mining Company, Kapitalna Mine and Tsentralna Mine of Myrnodradvugillia Mining Company, Pioneer Mine of Dobropillivugillia Mining Company.

**Results.** The reason of carbon monoxide emission in coal destruction (coal breakup change) was investigated. The results of laboratory findings were studied confirming indicator gases emission. Concentrations of carbon monoxide were established exceeding MPC (maximum permissible concentration) during coal destruction. The conclusion was made on the probable excess of the indicator gasses' figures related to the background values even during coal destruction, and without the seat of spontaneous combustion.

In was proven through the experiment that the carbon monoxide emission was detected for the temperature that was lower than 363-393 OK (plus 90-1200C), the one exceeding the critical value for coal spontaneous combustion.

**Scientific novelty.** Through the experiment indicator gases concentration for coal destruction was established.

**Practical significance.** The opportunity of consideration of the IG in coalmine atmosphere for prediction purposes during mining operations. Determination of the background content of carbon monoxide and hydrogen at mining blocks.

**Key words:** coal destruction, indicator gases, carbon monoxide, the seat of spontaneous combustion, the background content of carbon monoxide and hydrogen, coal samples.