

## **О МЕХАНИЗМЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ ВЗРЫВОВ И ДЕТОНАЦИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ**

*Рассматриваются вопросы самовоспламенения, объемного взрыва и детонации углеводородных газовых смесей в угольных шахтах. Излагается способ обнаружения участков скоплений углеводородных газов с высоким давлением ( $>100$  кГ/см<sup>2</sup>), залегающих под угольными пластами. Сделаны выводы о причинах объемных взрывов. Предлагаются превентивные меры по предотвращению объемных взрывов в угольных шахтах.*

**Ключевые слова:** угольные пласты, процессы самовоспламенения углеводородных газовых смесей, объемные взрывы, детонация

**Введение.** Проблема безопасности на метаноопасных шахтах является очень актуальной. Ежегодно на угольных предприятиях от взрывов газов гибнут горняки, останавливаются работы по добыче угля на длительное время, наносятся значительные материальные ущербы.

В связи с добычей энергетических углей на больших глубинах участились случаи объемных взрывов газа с гибелью большого числа горняков и разрушением шахтного оборудования (Украина, Россия). Не смотря на то, что на предприятиях принимаются серьезные меры по комплексной дегазации шахт, внедряются более совершенные системы по предупреждению взрывов, объемные взрывы не прекращаются. Анализ аварий на угольных шахтах Украины, выполненный под руководством член-корреспондента АГН Украины, д.г.н. Е.Руднева [1] показывает, что основными причинами являются (из анализа 46-ти аварий):

1. Взрывы с гибелью людей из-за внезапного поступления в выработку больших объемов метана и тяжелых углеводородов (40 аварий), либо гибель людей от травм и удушья газом (6 аварий).

Это может происходить только из-за мгновенного вскрытия участков с высоким давлением газа под угольными пластами в период разработки пластов (угольные пласты перед разработкой шпуруются, в них объемов газа с большими давлениями находиться не может). Причем эти взрывы не были инициированы искрой, а происходило самовоспламенение газовой смеси, а затем объемные взрывы и детонация.

2. Наличие очень сложной и разнообразной тектоники – первичной (классическая) и вторичной (гравитационная) по всей площади шахтного по-

ля, по которой возможны поступления газа с высокими давлениями и температурой с больших глубин ( $>1,5\div 3,0$  км).

3. При поступлении углеводородных газов с больших глубин в смесь в которой находятся метан и более тяжелые углеводороды, которые могут привести к самовоспламенению и взрыву смеси при мгновенном попадании ее в воздушную зону выработки (при концентрациях метана намного ниже 5%).

**Цели и задачи научного исследования.** Основными задачами исследования являются:

- Проверка эффективности аппаратуры дистанционного геофизического комплекса по обнаружению скоплений газа, расположенного под угольными пластами и в геологических разломах, характеризующегося большими величинами давления ( $> 10$  КГс/см<sup>2</sup>) и залегающего на глубинах до 3000 м.
- Определение путей миграции газа с больших глубин или от источников, расположенных за границами шахтных полей (шахта им.А.Ф.Засядько – Украина, 2008; шахта Ерунаковская – VIII, – ОАО ОУК «Южкузбасуголь», (2009 г.); шахты – Заречная, Октябрьская, Сибирская, Польшаевская (2011 г, Россия).
- Поиск и оконтуривание источников газа с высокими величинами давления и температуры, расположенных под угольными пластами и за границей шахтных полей;
- Измерение полевой дистанционной аппаратурой «Поиск» величин давления газа и температуры в геологических разломах и в участках скоплений углеводородных газов, а также мощностей газовых горизонтов, расположенных под угольными пластами.
- Определение причин объемных взрывов газа и предложений по предотвращению этих взрывов в шахтах добывающих энергетические ценные угли на больших глубинах.

**Методы исследования.** В работе использовались следующие методы исследований.

1. Для оперативного выполнения поставленных задач использовались методы дистанционной космогеологической разведки и полевая резонанснотестовая аппаратура дистанционного геофизического комплекса зондирования недр «Поиск» (разработка СНУЯЭиП). Аппаратура позволяет дистанционно обнаруживать источники газовых скоплений на глубинах до 5-ти километров, оконтуривать их и определять направление миграции газа, количество газовых горизонтов, давление газа в каждом горизонте, а также идентифицировать типы пород газопроницаемых коллекторов.

Основанием для применения аппаратуры «Поиск» в этих целях послужили успешные работы по обнаружению газовых аномалий с высоким давлением газа в них, расположенных под рудными телами урановой шахты (ш. Новоконстантиновская, Украина), исследование особенностей залегания газовых аномалий в сланцевых породах (штат Техас, США) и дистанционное

обнаружение промышленных месторождений нефти и газа (Австралия, Индонезия, США, Россия, Украина, Монголия).

Работы выполнялись специалистами СНУЯЭиП совместно с коммерческими структурами, которые привлекались для обеспечения работ, а также с головным институтом Минтопэнерго Украины (УкрНИПИПромтехнологии и НИЦ ИГН Национальной академии наук Украины (НАНУ)).

Об успешности этих работ свидетельствует заключение ИГН НАНУ о целесообразности использования аппаратуры дистанционного комплекса «Поиск» для выполнения поисково-геологических работ[9].

2. Использование разведочного бурения скважин для установления газовых скоплений, точного определения глубин залегания газовых горизонтов, величин давлений и температур газа в них. Эти работы выполнялись специалистами горно-геологических структур шахт или специализированными компаниями, привлекаемыми Заказчиками к проведению поискового бурения.

3. Электроразведка и другие традиционные геофизические способы поиска газовых аномалий или анализ имеемых геологических материалов на шахтах (выполнялись НИЦ ИГН НАНУ, г.Киев) для подтверждения (или сравнения) результатов дистанционного обнаружения газовых аномалий до начала поискового бурения.

4. Математическое моделирование процессов самовоспламенения, объемных взрывов и детонации газовых смесей и расчеты по установлению граничных условий самовоспламенения этих смесей с различными углеводородными газами в условиях, приближенных к реальным условиям газовой обстановки в угольных шахтах. Выполнялись под руководством д.т.н., профессора СНУЯЭиП В.А.Пухлий [2-7].

В период этой работы было обследовано шахтное поле угольной шахты им.Засядько (Украина) полевой резонансно-тестовой аппаратурой комплекса «Поиск» специалистами СНУЯЭиП (г.Севастополь) совместно с коммерческим предприятием МГСР (г.Донецк) и НИЦ ИГН НАНУ, а также проведены исследовательские работы на 5 угольных шахтах ОАО ОЦК «Южкузбассуголь» (Кемеровская обл., Россия) – только специалистами СНУЯЭиП [10].

Дистанционная идентификация (распознавание) газовых аномалий в недрах земли (до глубин 5 км) с помощью аппаратуры комплекса «Поиск» выполнялась с использованием резонансных явлений веществ при воздействии радиочастотных излучений на атомы элементов (ЯМР-спектроскопия), входящие в конкретный вид углеводородов (нефть, газ) и пород нефтегазонасыщенных коллекторов [8].

Для посылки радиочастотных резонансных излучений на большие глубины применялись генераторы СВЧ-излучения с вращательным электромагнитным полем. На рабочую частоту СВЧ-генератора модулировались частотные резонансные спектры атомов реперных химических элементов пород-коллекторов (Ni, V, C, P, Si, S и др.) и информационно-энергетические спек-

тры образцов проб нефти, метана и высших углеводородных газов (этан, пропан, бутан).

Резонансные спектры (ЯМР-спектры) атомов металлов, входящие в состав идентифицируемых веществ и выбранные в качестве реперных элементов, записывались на установках ЯМР с частотой 60 МГц и 250 МГц [11, 13], а их информационные энергетические спектры веществ записывались на атомно-абсорбционном спектрофотометре (атомизация веществ в газовой горелке) с чувствительной широкополосной приставкой.

Информационно-энергетические спектры идентифицирующих газов и пород [14] переносились на «рабочие» магнитные носители («рабочие матрицы»), а атомные спектры металлов на «тестовые матрицы» и использовались для резонансного возбуждения этих веществ в недрах земли (до глубин 3 км). Резонансное возбуждение веществ производилось путем воздействия на них сигналов СВЧ-генераторов, модулированных по частоте резонансных (атомных) ЯМР-спектров или по частоте информационно-энергетических спектров искомого вещества.

Для изучения элементного состава пород-коллекторов использовался нейтронно-активационный метод определения концентрации металлов и неметаллов в них. Элементарный состав образцов проб и амплитуды их интегральных спектральных характеристик (информационно-измерительных спектров) вносились в банк данных стационарного комплекса «Поиск» и использовались в качестве распознавательных признаков углеводородов и пород-коллекторов (залегających на глубинах до 5000 м) при обработке результатов полевых работ [15].

Для настройки аппаратуры и подтверждения дистанционного обнаружения (идентификации) типов углеводородов, перед началом полевых работ, проводились испытания в лабораторных условиях стационарной и переносимой аппаратуры комплекса «Поиск» по избирательной регистрации образцов (проб) газа и образцов типов пород-коллекторов с различных расстояний (25 м и 50 м).

В полевых условиях модулированный сигнал с помощью узконаправленной антенны от высокочастотного блока СВЧ-генератора направляется под определенным углом вглубь Земли для дистанционного резонансного возмущения атомов реперного элемента либо всего идентифицируемого вещества. При этом над участком углеводородного месторождения возникает высокочастотное электромагнитное поле, характерное для конкретного типа углеводородов и пород. Данное электромагнитное поле регистрируется чувствительным прибором-приемником, настроенным на резонансную частоту конкретного атома реперного элемента или интегрального спектра вещества (типа пород, углеводородного газа). Это обеспечивало дистанционную избирательную идентификацию конкретного вещества, залегającego на различных глубинах.

По результатам расшифровки космических фотоснимков с применением радиационно-химических технологий [16] определяются на этом фотоснимке границы контуров участков с углеводородными аномалиями. Данные

границы уточняются в полевых условиях с использованием мобильной аппаратуры и приемников GPS, затем наносятся на карту района поиска. Данный способ оконтуривания практически схож с существующими аэрокосмическими способами дистанционного зондирования, однако вероятность практической идентификации типа углеводородов (углеводородных газов) с помощью аппаратуры комплекса «Поиск» резко возрастает (достоверность более 95%).

Резонансно-тестовая полевая аппаратура позволяет рассчитать глубину залегания газовых горизонтов, их мощности и давление газа в них.

**Результаты работ.** При обследовании шахтного поля угольной шахты им.Засядько (рис.1) было установлено, что ее пересекают с запада на восток 3-и геологических разлома «канала» с повышенным давлением газа в них и один с севера на юг [17].



Рис.1. Контурные геоэлектрические аномалии АТЗ и границы газопроницаемых «каналов» на топографической карте участка горного отвода угольной шахты им.А.Ф.Засядько [17].

Вертикальные газопроницаемые участки (столбы) находились за пределами шахтного поля (за 1÷1,5 км до ее границы) и располагались на каждом из 3-х разломов («каналов»). По всем «каналам» происходила миграция газа с запада на восток, что обеспечивало определенное давление газа в каждом канале.

Ширина «каналов» составляла от 40 до 80 м. В каждом «канале» имелось по 4-е газопроницаемых горизонта, представляющих трещиноватый среднезернистый песчаник, залегающий в каждом канале на глубинах от 410 м до 1690 м. Мощности газоносных горизонтов составляли от 20 до 80 м, избыточное давление газа в горизонтах (в зависимости от глубин) составляли от 16 кгс/см<sup>2</sup> (верхний горизонт от 160 кгс/см<sup>2</sup> (нижний горизонт)). Газовые горизонты располагались под угольными пластами. Основным источником газа с высоким давлением находился за пределами шахтного поля (в 5-ти км от него). Газ от него к шахтному полю поступал по 3-ём разломам пересекающим шахтное поле. Причем распределение газа в «канале» под угольные пласты происходило от нижнего горизонта (1690 м) с высоким давлением газа (230 кгс/см<sup>2</sup>) к верхнему горизонту (16 кгс/см<sup>2</sup>) по общему газопроницаемому вертикальному участку «столбу» с глубины 1690 м до глубины 410 м (рис.2).

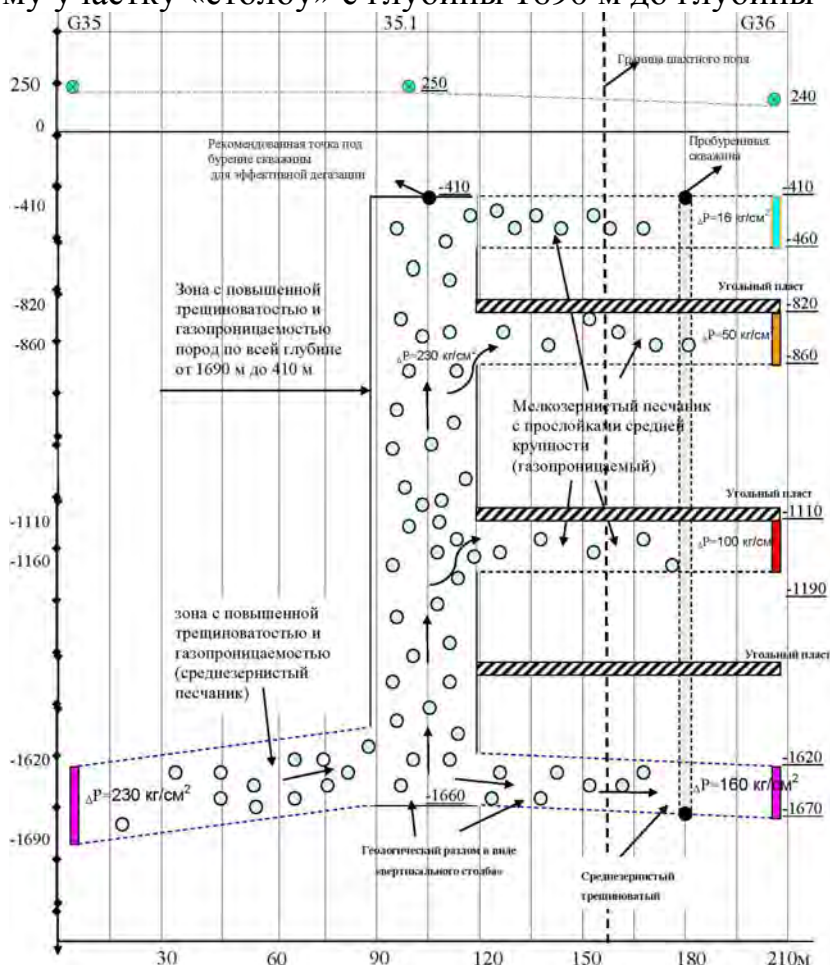


Рис.2. Глубинный разрез 035-036 газоносного канала в шахтном поле угольной шахты.

На расстоянии ~5 км западнее шахтного поля была выявлена крупная газоносная залежь (диаметром ~4 км) с давлением газа в ней 350 кгс/см<sup>2</sup>, от которой брали своё начало «каналы» поступления газа под угольные пласты. По мере приближения к шахтному полю давление газа в газоносных коллекторах снижалось (дресселируется до 230 кгс/см<sup>2</sup>). Анализ мест аварий на шахте с взрывом метана (и гибелью людей) показал, что взрывы происходили

при разработке угольных пластов над газоносными «каналами» (разломами) с высоким давлением газа в них ( $>50$  кгс/см<sup>2</sup>).

Пробуренная скважина в северном газовом «канале-1» во всех 4-х горизонтах подтвердила наличие притоков природного углеводородного (а не «угольного») газа с соответствующими давлениями газа, значительно превышающих ( $P_4 \geq 160$  кгс/см<sup>2</sup>) давления газа в угольных пластах (обычно 5-10 кгс/см<sup>2</sup>). Т.о. данные дистанционного определения параметров газовых «каналов» (коллекторов), глубины их залегания и давление газа в них были подтверждены.

Следовательно, если пробурить дегазирующие скважины непосредственно в вертикальных газопроницаемых «столбах» или в «каналах», то это резко снизит общее давление подходящего газа к шахтному полю, а значит улучшится обстановка под угольными пластами по всему шахтному полю.

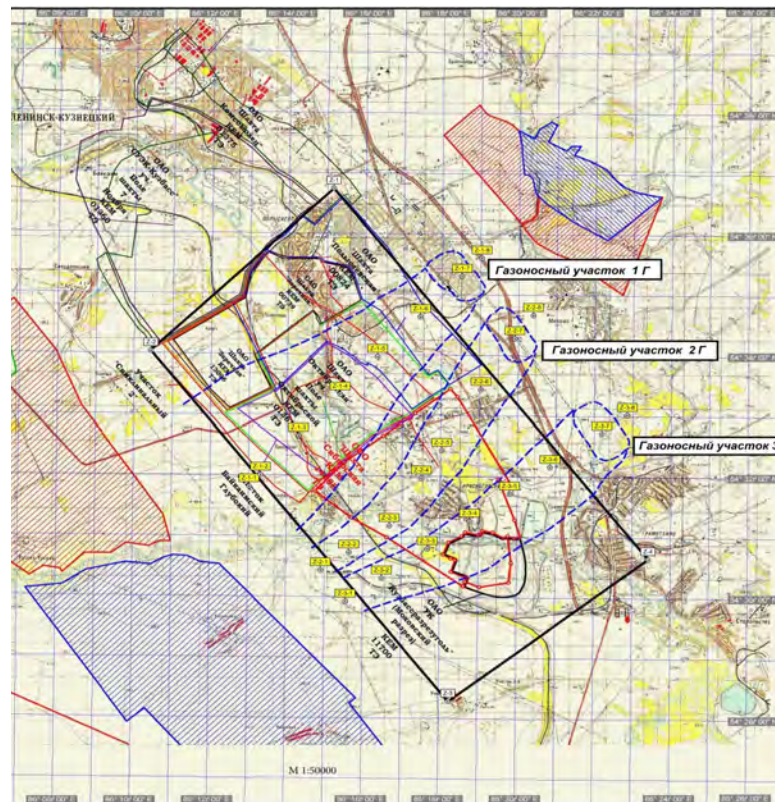


Рис.3. Границы выявленных аномалий газа на территории горных отводов угольных шахт Полысаевская, Заречная, Октябрьская и Сибирская ( $S=99$  км<sup>2</sup>).

Газ из такой скважины с промышленным притоком и давлением 160 кг/см<sup>2</sup> выгодно использовать на технические нужды города, а не дегазировать его в ОС. Аналогичная картина была выявлена на нескольких Российских шахтах (рис.3, рис.4). Были даны рекомендации по бурению дегазационных скважин в газоносных «коллекторах» с высоким давлением газа, позволяющие значительно снизить газовую опасность на всем шахтном поле.

Выполненные аналогичные работы на 5-ти угольных шахтах России подтвердили подобную ситуацию по наличию нескольких «каналов» поступ-

ления газа с высоким давлением газа  $> 350 \text{ кг/см}^2$  под угольные пласты от источников, залегающих на больших глубинах и расположенных за пределами шахтных полей.



Рис.4. Глубинный профиль газового участка №1Г на шахтном поле (шахта «Заречная», Россия).

Высокие давления газа под угольными пластами регистрировались на глубинах  $\geq 500 \text{ м}$ . Скопления газа с высоким давлением ( $> 50 \text{ кг/см}^2$ ) представляет большую опасность при проведении горных работ, т.к. при вскрытии угольных пластов вблизи таких скоплений происходит мгновенный выброс больших объемов газовой смеси в воздушно-кислородную среду штрека, где постоянно находится метано-газовая смесь с концентрацией метана ниже допустимой нормы ( $< 3 \div 4\%$ ). За счет постоянного окисления газовой смеси с такой концентрацией метана в воздушной среде штрека, эта смесь имеет определенную степень готовности «возбуждения» к воспламенению. В момент вброса больших объемов газовой смеси с высоким содержанием метана происходит мгновенное самовоспламенение углеводородных газов и объемный их взрыв даже при концентрациях  $\text{CH}_4$  в рабочем штреке менее 5%. Автоматизированная система предупреждения не успевает даже сработать на повышение концентрации метана в смеси.

Результаты математического моделирования процессов самовоспламенения и взрывов также подтверждают возможность объемных взрывов при резком поступлении газа в больших объемах в рабочий штрек. При этом, дополнительно может формироваться фронт ударной волны со скоростью



$>1000$  м/сек, что является дополнительным инициирующим фактором объемного взрыва.

**Детонация.** Следует отметить, что распространение пламени и быстрое горение углеводородных смесей обуславливаются химическими реакциями, поддерживающими градиенты концентраций, а также процессами молекулярного переноса, которые заставляют эти градиенты перемещаться в пространстве.

В отличие от этих процессов, распространение детонации обуславливается волной давления, которая подпитывается химическими реакциями и сопутствующим выделением тепла. Характерным свойством детонации является скорость распространения детонационной волны порядка  $v_{дет} \geq 1000$  м/с, которая гораздо больше скорости распространения пламени горения углеводородной смеси (обычно 0,5 м/с).

Скорость распространения детонационной волны  $v_{дет}$ , плотность  $\rho_v$  и давление  $p_v$  сгоревших газов вычисляется по теории Чепмена-Жуге [4]. Они зависят от давления  $p_u$  и плотности несгоревших газов, от удельной теплоты реакции  $q$  и от величины  $\gamma$ , определяемой отношением теплоемкостей при постоянных объеме и давлении ( $\gamma = C_p/C_v$ ).

Основные уравнения детонации Чепмена-Жуге:

$$v_{дет} = \sqrt{2(\gamma^2 - 1)q}; \quad \frac{\rho_v}{\rho_u} = \frac{\gamma + 1}{\gamma}; \quad \frac{p_v}{p_u} = 2(\gamma - 1) \frac{q\rho_u}{p_u}.$$

Следует подчеркнуть, что вопрос о переходе от быстрого горения (дефлаграция) к детонации очень важен для многих практических приложений, в частности он весьма важен и для угольных шахт. Математическое моделирование позволяет анализировать такие процессы. На рис.5 показан переход к детонации в водородно-кислородной среде. Дефлаграция ускоряется и переходит в детонацию.

Следует отметить, что, как правило, детонационные волны не плоские, экспериментально наблюдается образование ячеистой структуры детонационного фронта.

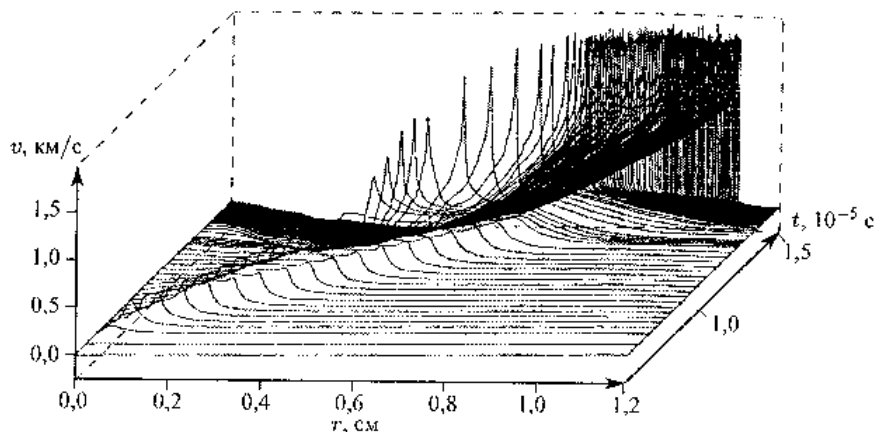


Рис.5. Профили скорости во время формирования детонационной волны в водородно-кислородной смеси  $H_2-O_2$  при начальном давлении  $p = 2$  кГс/см<sup>2</sup> [17].

В заключение отметим, что для кинетического описания процессов горения даже такого простого топлива как водород (суммарная реакция  $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ ) требуется механизм, включающий около 40 элементарных реакций. Для кинетического описания процессов горения, тем более процессов самовоспламенения простейшего углеводородного топлива – метана ( $CH_4$ ), общее количество реакций с учетом поверхностных реакций в химическом механизме включает несколько тысяч элементарных реакций. Все эти вопросы, а именно химическая кинетика, механизмы реакций, упрощение механизмов реакций и др. рассматривались ранее в работах авторов [2-7].

### **Выводы**

1. Под угольными пластами в зонах повышенной трещиноватости находятся участки скоплений углеводородных газов, которые «мгновенно вскрываются» в момент удаления угольных пластов, при этом происходит мгновенный выброс газа с высокими давлениями и температурой в выработку с содержанием в воздухе кислорода и продуктов постоянного окисления метана, хотя его содержание ниже допустимой нормы (2÷3%), где происходит объемный взрыв.
2. Из-за поступления углеводородных газов с тяжелыми фракциями с высоким давлением и температурой происходит мгновенный выброс породы и самовоспламенение смеси при концентрации газа значительно ниже 5% с последующим объемным взрывом и детонацией. Если происходит поступление газа небольших объемов (из-за меньшего давления газа в горизонте), тогда объемного взрыва не происходит, но возможно отравление горняков газом.
3. Наличие участков скопления углеводородных газов с высоким давлением и температурой под угольными пластами создает условия мгновенного поступления газа в выработку с последующими объемными взрывами газа и детонацией.
4. Наиболее опасные (мгновенные) выбросы газа, объемные взрывы и детонация могут происходить при разработке угольных пластов на глубинах залегания энергетических углей от 500 м и более.

### **Предложения**

1. Следует предусмотреть дополнительные мероприятия по обеспечению безопасности работ в угольных шахтах энергетических углей, особенно при их разработке на больших глубинах (>500 м).
2. Аппаратура комплекса «Поиск» может успешно использоваться для обнаружения участков скопления газа с высоким давлением и температурой под угольными пластами и в геологических разломах, обеспечи-

вать выбор точек под бурение скважин для эффективной дегазации газа.

3. Наиболее эффективными мерами по предотвращению мгновенного поступления газа под высоким давлением могут быть своевременное выявление газа в разломах шахтных полей и их дегазация через пробуренные скважины, а также выявление вблизи шахтных полей газовых месторождений. Вблизи шахтных полей с энергетическими углями всегда присутствуют газовые месторождения, залегающие на больших глубинах соединенные разломами с угольными залежами. Перед разработкой угольных пластов на глубинах, близких к 500 м, необходимо вскрыть газовые месторождения вблизи угольных шахт для снижения давления в них и тем самым улучшения газовой опасности на шахтах.

### Список использованной литературы

1. Руднев Е.Н. , доктор геол. Наук (Академия горных наук Украины) К вопросу борьбы с метаном на угольных шахтах Украины // Уголь Украины. -2009. - №1.-с.40-46
2. Пухлий В.А. Горение органической пыли в барабанном фильтре с учетом срабатывания взрывозащитной мембраны. – Химическая физика, РАН, 1997, том 16, №11, с.133-139.
3. Пухлий В.А. Исследование вторичных очагов пожара при взрыве органической пыли. – Физика горения и взрыва, РАН, 2000, том 36, №3, с.60-64.
4. Пухлий В.А. Термодинамика. Дополнительные главы. – Севастополь: Изд-во «Черкасский ЦНТЭИ», 2009. – 523 с.
5. Пухлий В.А., Ковалев Н.И., Софийский И.Ю. О некоторых проблемах химической кинетики в акватории Черного моря. – В сб.: Научные труды СНУЯЭиП, вып.2(38), 2011, с.137-144.
6. Пухлий В.А., Ковалев Н.И., Софийский И.Ю. Математическое моделирование процессов воспламенения и самовоспламенения углеводородов в химической кинетике. – В сб.: Научные труды СНУЯЭиП, вып.4(40), 2011, с.153-162.
7. Пухлий В.А., Ковалев Н.И. Механизмы и пути процессов горения углеводородов в химической кинетике. – В сб.: Научные труды СНУЯЭиП, вып.1(41), 2012, с.144-153.
8. Ковалев Н.И., Пухлий В.А. и др. Ядерно-магнитный резонанс. Теория и приложения. Севастополь, 2010 г. Гл. IX.-С. 610.
9. Заключение на методику поиска и разведки полезных ископаемых аппаратурным комплексом ЯМР «Поиск». НАНУ 2009 год.
10. Ковалев Н.И., Филиппов Е.М., Солдатова С.В. «Опытнo-методическое обеспечение дистанционного способа определения разломов угольного пласта в шахтном поле на шахтах ОАО ОУК «Южкzubассуголь»», Отчет о НИР, СНУЯЭиП.-Новокузнецк, 2009 г., 60 стрн
11. Белявский Г.А., Ковалев Н.И., Лаврентьева О.Н. Технология применения аппаратуры ЯМР для дистанционного обнаружения объектов под землей и

- под водой. – Доклад на 4 Международной конференции спасателей. НТСБ МЧС Украины.-Киев, 2003, с 32-35.
12. Ковалев Н.И., Гох В.А., Солдатова С.В. и др. Использование дистанционного геологического комплекса "Поиск" для обнаружения и оконтуривания углеводородных месторождений // Геоинформатика. — 2009. — № 3. — С. 83—87.
  13. Бакай З.А., Иващенко П.Н., Ковалев Н.И. Способ поиска залежей полезных ископаемых // Пат. 35122 Украина. От 26.08.2008 г.
  14. Пат. РФ, № 227-2305 от 20.03.06 г. Ки. Гох В.А., Акимов А.М., Ковалев Н.И., заявители и патентообладатели, "Способ разведки полезных ископаемых", заявка № 2004 132 154 от 05.11.2004 г., зарегистрирована в госреестре изобретений РФ 20.04.2006 г. Срок действия до 05.11.2024 г.
  15. Ковалев Н.И., Белявский Г.А., Филиппов Е.М., Солдатова С.В. и др. Определение аномалий природного газа в шахтном поле шахты Ерунаковская-8: Отчет о НИР, СНУЯЭиП. — Новокузнецк, 2010. — 36 с.
  16. Радиационно-химическая технология в 1-25.М, 1979-1989 г.
  17. Ковалев Н.И., Гох В.А., Котелянец И.И. и др. Выбор точек под бурение газоносных скважин газа с помощью дистанционной аппаратуры комплекса "Поиск" на шахтном поле угольной шахты Засядько: Отчет о НИР, ш. Засядько / СНУЯЭиП., ГГН. — Донецк, 2009. — 48 с.
  18. Goyal G., Warnatz J., Maas U. Numerical studies of hot spot ignition in H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> – air mixtures. – 23<sup>rd</sup> Symp. Comb.-Pittsburgh, 1990, p.1767-1776.

Опубликовано: Сборник статей Международной научно-практической конференции «Инновационное развитие современной науки», г. Уфа, 2014г, стр. 153-162.