

УДК 622.822:622.271.45

Л.П. ВОГМАН, гл. науч. сотр., д-р техн. наук; А.В. ИЛЬИЧЕВ, зам. нач. отд. – нач. сектора; Н.В. КОНДРАТЮК, ст. науч. сотр. (ФГБУ ВНИИПО МЧС России)

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Горные, геологоразведочные и другие работы приводят к нарушению земель и угодий, восстановление и возвращение которых для использования в народном хозяйстве является важной задачей. Добыча угля сопровождается образованием значительного количества пустых пород, из которых формируются отвалы (терриконы), опасные тем, что в случае содержания в них большого количества угля в условиях хорошей теплоизоляции могут зарождаться очаги самонагревания, а затем и самовозгорания. В статье рассмотрены следующие способы предотвращения образования очагов горения в слое отвала: использование воды в проложенных внутри отвала трубопроводах; утилизация горючих газов в отвалах твердых бытовых отходов по трубопроводам с выходом на факел или на переработку газов. Наиболее эффективным способом тушения очагов горения в отвалах шахт может быть комбинированный способ, суть которого заключается в подаче на разогретые области хладагента (воды) с последующей изоляцией прогретых углеродсодержащих пород, например, глиной.

**Ключевые слова:** *углеродсодержащие отвалы, терриконы, пожаровзрывоопасность, предотвращение и тушение пожаров, предотвращение взрывов*

### Введение

Рекультивация отработанных угольных месторождений – это комплекс мероприятий экологического и экономического плана, направленных на восстановление земли и водных ресурсов, утративших свои плодородные свойства вследствие деятельности людей. Следовательно, важной народно-хозяйственной проблемой является восстановление и возвращение для использования в народном хозяйстве земель и угодий, нарушенных горными, геологоразведочными и другими работами.

Известно, что добыча угля, так же как и иных веществ и материалов, сопровождается образованием значительного количества пустых пород. Например, отходы углеобогащения образуются в количестве 3 т на 1 т угля с постоянным ростом соотношения в сторону их увеличения к добываемому углю. Дисперсность отвалов составляет 1,9–3,0 мм в верхних ярусах и более 50 мм в нижних ярусах. Одновременно возникает проблема с их размещением в специально отведенных для этого местах. С течением времени такие отвалы (терриконы) достигают размеров, не позволяющих в дальнейшем их использовать по назначению. Опасность терриконов заключается в том, что при наличии большого содержания угля в условиях хорошей теплоизоляции могут появляться очаги самонагревания, а затем и самовозгорания. В силу малой активности (температура тления не превышает 350–400 °С) и незначительного содержания в среде кислорода воздуха (концентрация кислорода не достигает 1 % (об.) в массе породы) эти очаги приводят к выделению продуктов термической и термоокисли-

тельной деструкции, содержащих токсичные и горючие вещества: метан, аммиак, сероводород, углерод и его оксиды (например, оксид углерода), оксиды азота, продукты окисления металлов, в том числе и тяжелых. Со временем в отвалах породы при выгорании ее внутри образуются каверны, пустоты, температура в которых достигает 400 °С. Эти каверны, пустоты представляют опасность для людей и техники. В свою очередь выделяющийся в виде аэрозоля углерод провоцирует образование смога, горючие продукты – дымление, а иногда и открытый огонь (свечение), загрязнение воздушной среды.

Отвалы горнодобывающих производств подразделяются на две основные группы – отвалы открытых разработок и отвалы глубинных выемочных работ. Природа образующихся отвалов по вышеуказанным способам значительно отличается. Отличия заключаются в происхождении осадочных пород, включающих горную руду, а также естественную временную дифференциацию сопутствующих руде микроорганизмов [1].

Отвалы горных разработок открытого типа, сформированные вблизи дневной поверхности земной коры, будут мало отличаться от состава вмещающих осадочных пород. Такие отвалы, как и материнские породы близлежащего ландшафтного окружения, будут служить основой почвообразовательных пород и на них почвенный слой мощностью 1,5–2,0 см будет сформирован за период 15–20 лет и на нем возобновляются естественные процессы воспроизводства растительности.

Отвалы второй группы, извлеченные из глубины в анаэробных условиях горных руд, в связанной форме будут обогащены породами и элементами в восстановленной форме: железо, сера, марганец, медь, другими элементами и соединениями, а в адсорбированном виде также и рудничными газами (метан, оксид углерода, аммиак, сероводород). После выхода на дневную поверхность такие отвалы в воздушной среде окисляются, зачастую дымят, тлеют и даже горят при выходе внутренних очагов самонагрева и самовозгорания на поверхность. В ареоле второй группы отвалов формируются кислые (сернокислотные) потоки и железо и марганцевосодержащие и другие скопления. Их можно использовать в качестве вторичных минерально-сырьевых ресурсов. Например, химический состав терриконов шахт Подмосковья содержит ориентировочно такой: кремнезем до 83 %, оксид алюминия до 16,4 %, оксид алюминия до 5 %, а также оксиды титана, магния, кальция, марганца, калия фосфора в небольших количествах (до 2,5 %). Пириты ( $FS_2$ ) могут быть использованы в качестве эффективных восстановителей хромсодержащих стоков, а также в производстве комплексных железосеросодержащих препаратов (или удобрений). Золошлаковые отходы от сжигания углей Подмосковья содержат до 40 % оксида алюминия, до 58 % оксида кремния, до 11 % оксида железа, а также скандий, титан, иттрий, галлий и другие металлы. Получение алюминиевых и других продуктов – алюминиево-кремниевый сплав для раскисления сталей вместо алюминия, алюмохлоридных и алюмофосфатных коагулянтов и квасцов из минеральной части золошлаковых углей может возродить его добычу.

Как отмечалось выше, наибольшую опасность в отношении самовозгорания и открытого дымления и горения представляют природные отвалы, содержащие уголь, пирит, древесные отходы и серу. Например, природные отвалы Донбасса состоят преимущественно из глинистых (до 90 %), песчаных сланцев (до 30 %), песчаников (до 10 %) и известняков (до 6 %). Эти отвалы содержат также пирит (до 10 %), уголь (до 20 %), древесину и серу и именно в таких отвалах происходит самовозгорание угля и других горючих материалов. При горении угля

в отвалах порода подвергается воздействию высоких температур (до 1500 °С), ее физические и химические свойства изменяются, при этом в терриконах выделяются горючие и токсичные газы (сероводород, оксид углерода, сернистый газ, образующийся при разложении пирита). При взаимодействии сернистого газа с водой образуется серная кислота, а от кислоты образуются соли калия, натрия и др. Токсичные и горючие газы могут распространяться на 1,5 км от интенсивно горящих и на 1 км от слабо горящих терриконов.

Химическое выветривание горной породы усиливает ее термическое разложение. Процессы выветривания наиболее интенсивно протекают в поверхностных слоях отвала, где вскоре после завершения эксплуатации шахты преобладают мелкие частицы. Кислотность пород резко возрастает (рН 1,5–2,0). Поверхностный слой заплывает, образуется плотная водонепроницаемая корка, препятствующая проникновению сточных вод вглубь отвала. Высокая кислотность и плотная корка препятствуют появлению растительности на поверхности отвала.

После затухания очагов горения и вымывания атмосферными осадками солей и остатков серной кислоты начинается естественное зарастание породных отвалов сорняками. Зарастание наблюдается также на горящих отвалах и в местах, где породу отсыпают послойно.

По скорости естественного зарастания шахтные породные отвалы можно разделить на следующие перечисленные ниже группы [1].

Отвалы, образованные из неметаморфизированных осадочных пород, содержащих в незначительных количествах уголь, выдаваемых при проходке стволов, полевых штреков и других горных выработок неглубокого залегания. Такие отвалы образуются редко, они небольшие по объему и массе, самовозгорание угля в них происходит редко и процесс тления идет в короткие промежутки времени. В течение десяти лет после завершения эксплуатации горных выработок они зарастают.

В отвалах угольных (неантрацитовых) шахт содержится большой процент горючих частиц, горение их слабое, но продолжительное.

Отвалы антрацитовых шахт состоят из метаморфизированных сланцев, которые при разработке измельчаются незначительно. Самовозгорание таких пород происходит в большие периоды, но горят они интенсивно с высокой температурой. Продукты горения вымываются, внутри отвалов образуются каверны и пустоты. Зарастание отвалов неантрацитовых и антрацитовых шахт начинается только через 15–30 лет.

Особенностью отвалов обогатительных фабрик является то, что при дроблении угля и породы образуются комья размеров, не превышающих 150 мм, и сопутствующие дроблению в больших количествах мелкодисперсные фракции. Порода укладывается в отвал при влажности ~ 40 %, поэтому разделения на фракции не происходит. Их кислотность высокая, количество горючей массы, в частности, пирита в отвалах обогатительных фабрик на 30 % больше, чем в отвалах шахт. Зарастание породных отвалов обогатительных фабрик начинается только через 30–50 лет.

Из краткого обзора пожарной опасности отвалов шахт и обогатительных фабрик следует, что наиболее опасными по возможности возникновения очагов самонагревания, самовозгорания, тления и последующего горения на поверхности являются отвалы неантрацитовых, антрацитовых шахт и обогатительных фабрик. Для этих отвалов характерным является и период до зарастания, который исчисляется десятками лет. Следовательно, именно этим отвалам при

культивации следует обратить самое пристальное внимание с точки зрения обеспечения пожарной безопасности.

Представляется целесообразным понять, какие условия и факторы являются наиболее важными при самонагревании, самовозгорании и тлении (горении) отвалов углесодержащих пород.

### **1. Влияние физических и химических факторов на процесс самонагревания и самовозгорания веществ и материалов**

Процессы самонагревания, самовозгорания и тления различных веществ и материалов органической природы исследованы достаточно подробно [2–10]. Решение практических задач по обеспечению пожарной безопасности объектов защиты, на которых обращаются мелкодисперсные горючие материалы, представлено, в частности, в работах [8, 9, 11, 12].

Самовозгорание – физико-химический процесс, скорость которого зависит от скорости химической реакции, поступления кислорода к реагирующей поверхности и от интенсивности теплообмена самонагревающегося материала с внешней средой.

К самовозгоранию склонны, как правило, пористые или измельченные целлюлозные материалы: бумага, опилки, растительное сырье, уголь, торф, бытовые отходы больших свалок, а также слоистые древесные плиты, резины, натуральные, кожи, пенополиуретаны, некоторые композиционные материалы, термореактивные пластики и др. Пенопласты с открытой структурой ячеек в большей мере склонны к самовозгоранию и тлению, чем пенопласты с замкнутой структурой ячеек.

Древесина, хлопок, зерно, корма, бытовые отходы и другие материалы являются природными или искусственными органическими соединениями и содержат в своем составе целлюлозу, гемицеллюлозу, лигнин и другие высокомолекулярные вещества: пентозаны, гексозаны. Элементный состав материалов включает углерод, водород, кислород.

Процесс самовозгорания достаточно глубоко исследован в отношении сыпучих мелкодисперсных и волокнистых веществ и материалов [2–10]. Особенностью самовозгорания является то, что оно для своего появления и развития не требует внешнего источника, инициирующего горение, а возникает за счет реакции гетерогенного окисления в объеме продукта при относительно низких температурах окружающей среды.

Самовозгорание наблюдается при резком увеличении скорости экзотермических химических реакций, когда скорость выделения тепла превышает скорость его рассеяния. Резкое увеличение скорости экзотермических реакций может происходить под воздействием теплового, микробиологического или химического импульса.

Тепловое самовозгорание возникает при нагревании вещества до температуры, обеспечивающей его термическое разложение и дальнейший процесс спонтанного самонагревания за счет тепла экзотермических реакций в объеме. При этом большую роль играют реакции окисления продуктов термического разложения. Горение в объеме твердого дисперсного или волокнистого материала протекает в виде тления [2–10], которое при доступе кислорода воздуха может переходить в пламенное горение.

Химическое самовозгорание возникает в месте контакта химически активных веществ, реагирующих с выделением большого количества тепла. В этом случае самовозгорание обычно начинается на поверхности, а затем распространяется вглубь горючей массы материала.



Микробиологическое самовозгорание характерно для органических дисперсных и волокнистых материалов, например, материалов растительного происхождения [5, 8], в объеме которых возможна жизнедеятельность микроорганизмов. В этом случае самонагревание дисперсной горючей среды происходит в условиях, благоприятных для жизнедеятельности микроорганизмов (повышенная влажность) за счет выделяемого ими тепла, которое в конечном счете при благоприятных условиях аккумуляции тепла может приводить к самовозгоранию.

Как отмечалось выше, самовозгорание, как и горение, – это сложный физико-химический процесс, который обусловлен, прежде всего, химическими реакциями окисления, инициируемыми ростом температуры и сопровождающимися выделением тепла. Химические условия самовозгорания вещества (материала) определяются концентрациями исходных и конечных продуктов реакции, энергией активации молекул и свободных радикалов, тепловым эффектом реакции, зависимостью скорости реакции от температуры.

Не менее важны и физические факторы, сопровождающие самовозгорание. Физическое состояние реагирующих веществ, состояние окружающей среды и протекающие при этом физические процессы составляют физическую основу самовозгорания. Она определяется такими факторами, как величина и геометрическая форма слоя, дисперсность, пористость (порозность) материала и связанные с ними величина удельной поверхности частиц, величина воздушного пространства в слое (доступность для кислорода воздуха поверхности твердого вещества), плотность, влажность. Важным фактором физической составляющей самовозгорания является состояние окружающей среды: состав, температура гидродинамические и газодинамические условия тепло- и массообмена на границе объема с окружающей средой.

Рассмотрим подробнее влияние химических и физических факторов на процесс самовозгорания.

Медленное окисление кислородом воздуха твердой волокнистой или дисперсной фазы происходит на границе раздела фаз, величина которой зависит от степени развития поверхности межфазного контакта. Исходя из этого, экзотермическую реакцию окисления дисперсной или волокнистой массы можно назвать гетерогенным процессом. Скорость такой реакции  $V$  пропорциональна величине поверхности межфазного контакта  $S$ , на которой происходит химическое превращение в единице объема массы продукта  $V$  или отношения  $S/V$ . Иначе говоря, скорость экзотермической гетерогенной реакции (или интенсивность генерации тепла в объеме реагирующего материала) находится в зависимости от величины эффективной удельной поверхности и ее химической активности. При этом наиболее важным фактором, влияющим на скорость реакции окисления, который может быть описан законом Аррениуса, является температура.

Физические факторы, определяющие протекание гетерогенной экзотермической реакции, можно разделить на внутренние и внешние.

К внутренним факторам относятся физические характеристики отдельных частиц и всего объема. Этими факторами являются дисперсность, геометрическая форма, пористость, порозность, способность к адсорбции кислорода, плотность, теплопроводность – для частиц; кажущаяся плотность, объемная пористость, газопроницаемость, влажность, теплоемкость, теплопроводность и др. – для объема в целом.

К внешним факторам следует отнести температуру, давление, скорость среды, геометрические параметры объема реагирующего продукта, а также со-

стояние его наружной поверхности и условия, определяющие тепло- и массообмен на границе фаз. Все факторы вместе и каждый в отдельности существенным образом влияют на процесс самовозгорания.

В технологическом процессе твердые материалы находятся в полидисперсном состоянии. С увеличением дисперсности частиц резко возрастает их общая поверхность в объеме и соответственно увеличивается контакт их с кислородом воздуха. При этом тепловой эффект гетерогенной окислительной реакции возрастает и явление самовозгорания возникает при более низких температурах окружающей среды.

Важное значение для химических процессов имеет чистота поверхности. В присутствии примесей активность поверхности может изменяться. Свежеобразованная поверхность более реакционно активна, чем поверхность, образованная ранее.

Пористость частиц и пористость слоя также оказывают влияние на протекание гетерогенной экзотермической реакции. Пористость отдельной частицы, как и степень дисперсности, определяет величину ее поверхности и общую поверхность частиц в слое. С увеличением пористости слоя в нем возрастает содержание кислорода воздуха и улучшается дальнейшее поступление его к межфазной поверхности в зону реакции окисления. Поскольку с увеличением пористости возрастает доля воздуха в слое, его теплоемкость и теплопроводность снижаются. Это способствует более интенсивному самонагреванию материала в объеме: при малой теплопроводности слоя теплоотвод из зоны реакции затруднен, а малая теплоемкость способствует быстрому нагреванию даже при слабом тепловыделении.

Пористость дисперсного слоя тесно связана с плотностью. Изменение плотности может происходить не только за счет уменьшения пор, но и благодаря изменению этого параметра в результате реакции. С увеличением плотности возрастает теплопроводность, а, следовательно, тепло от объема материала будет отводиться быстрее и критические условия самовозгорания возможны при более высокой температуре. Плотность материала влияет также на состояние его наружной поверхности. С увеличением плотности уменьшается проницаемость поверхности для окружающего воздуха, что снижает диффузию кислорода в массу материала и одновременно затрудняет выход газообразных продуктов термического разложения газообразных продуктов в окружающую среду. Таким образом, с увеличением плотности опасность самовозгорания снижается.

Существенную роль в процессе самонагревания реагирующей массы играют геометрическая форма слоя и его удельная поверхность. От величины поверхности при определенных объеме и форме слоя зависит интенсивность теплообмена с окружающей средой. Для одной и той же массы материала одинаковой внутренней структуры при идентичности условий окружающей среды самонагревание материала будет более интенсивным в объеме с минимальным отношением площади поверхности к объему  $S/V$ .

В производственных условиях тепловое самовозгорание в объеме дисперсного вещества чаще всего возникает тогда, когда материал находится в неподвижном или малоподвижном состоянии. При этом окружающий воздух также малоподвижен. Движение воздуха у границ объема оказывает влияние на величину термического сопротивления его поверхности. С увеличением скорости движения и степени турбулентности возрастает коэффициент теплоотдачи от поверхности в воздушную среду, но при этом увеличивается и приток кислорода к поверхности. С одной стороны, это способствует интенсивности отвода теп-

ла, а с другой – интенсивности окислительных процессов в объеме материала. Отсюда следует, что гидродинамические условия на поверхности слоя существенным образом влияют на вектор химических и теплофизических процессов в объеме материала.

В присутствии некоторого количества влаги самонагревание таких материалов, как торф, каменный уголь, шерсть, зерно, ускоряется. Металлические порошки в присутствии влаги вступают в химическую реакцию, сопровождаемую выделением водорода. Эти вещества и материалы обладают гигроскопичностью и способностью адсорбировать влагу на поверхности. Процессы увлажнения сопровождаются выделением тепла и способствуют ускорению реакций окисления. С другой стороны, при увеличении содержания влаги уже в процессе самонагревания расход тепла на испарение также растет, а это может затормозить или прекратить повышение температуры до температуры самовозгорания.

Источником воспламенения горючих материалов, склонных к самонагреванию и самовозгоранию, может послужить статическое электричество [9].

Возникновение зарядов статического электричества происходит при деформации, дроблении (разбрызгивании) веществ, относительном перемещении двух находящихся в контакте тел, слоев жидких или сыпучих материалов, при интенсивном перемешивании, кристаллизации, испарении веществ.

Возможность накопления зарядов статического электричества определяется как интенсивностью возникновения, так и условиями стекания зарядов.

Интенсивность возникновения зарядов в технологическом оборудовании определяется физико-химическими свойствами перерабатываемых веществ и материалов, из которых изготовлено оборудование, а также параметрами технологического процесса.

Процесс стекания зарядов определяется в основном электрическими свойствами перерабатываемых веществ, окружающей среды и материалов, из которых изготовлено оборудование.

Вещества и материалы, имеющие удельное объемное электрическое сопротивление ниже  $105 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  при отсутствии их разбрызгивания или распыления, не электризуются.

### **2. Самовозгорание углей**

Как сказано выше, угли различных марок склонны к самовозгоранию [11]. Основной причиной самовозгорания углей в кучах или штабелях является их способность окисляться и адсорбировать пары и газы даже при низких температурах. При этом окисление идет медленно и тепла выделяется мало ( $12,5 \text{ Дж}$  на  $1 \text{ мл}$  присоединенного кислорода). В больших скоплениях угля, где теплоотдача в окружающую среду затруднена, происходит самовозгорание.

Возникающее в штабелях самонагревание первоначально бывает общим, т. е. по всему объему штабеля, включая поверхностный слой толщиной  $0,3\text{--}0,5 \text{ м}$ , но по мере повышения температуры очаг уходит внутрь насыпи, где аккумулируется тепло. Рост температуры в очаге самовозгорания происходит очень медленно и может быть законсервирован или даже снизиться, например, при растаскивании угля из штабеля или при его проветривании. При температуре выше  $50\text{--}60 \text{ }^\circ\text{C}$  скорость самонагревания угля в штабеле может увеличиваться. Эту температуру называют критической.

Возникновение очага самовозгорания в кучах и штабелях связано, прежде всего, с возможностью контакта очага горения с воздушными потоками, а также с благоприятными условиями аккумуляции тепла внутри залежей угля. Напри-

мер, для каменного угля приводятся наблюдения о зарождении очагов на откосах штабеля преимущественно на высоте 0,5–1,0 м от основания и на глубине 0,5 м от поверхности. Если штабель неоднороден по плотности и размерам кусков, то очаги самовозгорания могут зарождаться и в других местах, где сосредоточены более мелкие фракции угля с наименьшей плотностью. Отвод тепла от очагов самовозгорания обусловлен в основном размерами штабеля (насыпи) и выносом тепла потоками воздуха. Потоки воздуха могут возникать в результате градиента температур и плотностей материала, а также движения воздушных масс.

Склонность углей к самовозгоранию в штабелях и насыпях различна. Она тем выше, чем больше выход горючих газов и паров, образующихся при термоокислительной деструкции угля, чем выше дисперсность (удельная поверхность), тем ниже плотность внутри массива материала и больше в нем содержание влаги и пирита [12, 13].

Для предотвращения самовозгорания углей при хранении следует, во-первых, ограничить высоту штабеля (залежи) для уменьшения аккумуляции тепла в нем и усиления теплоотдачи, во-вторых, максимально уплотнить его с целью снижения проникновения воздуха внутрь материала. При уплотнении штабеля, т.е. при увеличении отношения площади штабеля к его объему ( $S/V$ ), значительно уменьшается количество пустот и затрудняется проникновение в него воздуха. Это сводит к минимуму скорость процессов окисления и адсорбции в угле, что исключает возможность повышения температуры в штабеле. Кроме того, уплотнение угля препятствует проникновению в штабель атмосферных осадков, которые способствуют самовозгоранию угля.

### **3. Профилактика пожаров при самовозгорании**

Как отмечалось выше, заметная экзотермическая реакция, сопровождаемая самонагреванием твердых веществ, наблюдается, как правило, в том случае, когда эти вещества образуют развитую поверхность окисления и находятся в дисперсном или волокнистом состоянии. Самонагревание окисляющихся материалов происходит и при низких температурах, но с повышением температуры этот процесс активизируется. Одновременно с этим усиливается и диссипация (рассеяние) тепла. При некоторых условиях, определяемых свойствами вещества, материала, удельной поверхностью контакта с окислителем, линейными размерами горючей системы, нарушается и тепловое равновесие. Время установления теплового равновесия может составлять часы, дни и более. В течение этого времени (периода индукции) температура вещества непрерывно повышается. Если в это время принять меры предотвращения роста температуры или обеспечить тепловое равновесие, то самонагревание можно приостановить и предотвратить самовозгорание. Однако если равновесная температура окажется выше температуры самовозгорания или равной ей, избежать воспламенения вряд ли удастся.

Профилактика самовозгорания основана на принятии методов и средств, которые тормозят реакцию окисления или обеспечивают стационарные условия теплообмена между материалом и окружающей средой (увеличивают индукционный период). Безопасным считается процесс, в котором индукционный период самовозгорания превышает время, в течение которого сохраняются условия, способствующие самонагреванию.

Свежеполученные вещества с высокой дисперсностью материала в среде кислорода воздуха интенсивно окисляются, выделяют тепло и нагреваются.



Наиболее простым и доступным методом снижения химической активности является окислительная дезактивация. Например, для уменьшения химической активности металла процесс измельчения (размола) следует выполнять в атмосфере с пониженным содержанием кислорода. Этим достигается пассивирование поверхности частиц порошка. Так как химическая активность зависит не только от материала, но и от его дисперсности, следует учитывать, что крупные фракции, вследствие низкой реакционной поверхности, менее склонны к самовозгоранию. Обычно порошки железа, никеля и меди с размером частиц более 50 мкм считаются не пирофорными, однако те же порошки с размером частиц 10–30 нм проявляют пирофорные свойства [6]. Например, различные марки железных порошков, в зависимости от состава, дисперсности, способа получения, могут быть горючими или трудногорючими и проявлять пирофорные свойства.

Наиболее распространен химический метод предупреждения самовозгорания дисперсных материалов путем ингибирования их горения. Составы, применяемые для химического торможения реакции окисления, весьма разнообразны, например, составы, содержащие галогены (хлор, фтор, бром).

Физические методы профилактики самовозгорания основаны на том, чтобы изменением линейных параметров системы (объема, поверхности окисления, порозности, повышения теплопроводности и снижения теплоемкости) увеличить индукционный период до величин, при которых процесс можно считать пожаробезопасным. Увеличение размера частиц или диаметра нитей волокна, уплотнение материала (уменьшение порозности) служат профилактической мерой самовозгорания. При уплотнении дисперсного пористого материала сокращается его объем, а, следовательно, газосодержание, увеличиваются теплоемкость (на единицу объема), теплопроводность, плотность. В конечном итоге это приводит к снижению риска самовозгорания.

Величина слоя дисперсного горючего материала на поверхностях или на иных носителях (например, на фильтрующих элементах) определяется соотношением сил, удерживающих частицы на поверхности (адгезия), сил взаимодействия между частицами (аутогезия) и возмущающих сил, стремящихся оторвать частицы, разрушить слой. Чем меньше адгезия и аутогезия, тем меньше слой осевшего дисперсного материала. Чтобы уменьшить адгезию частиц с поверхностью, ее подвергают специальной обработке, повышают гидрофобизацию слоя или удаляют механически (например, встряхиванием). Кроме того, адгезия уменьшается с увеличением сферичности частиц (уменьшается ее шероховатость), поскольку уменьшается площадь фактического контакта частиц.

#### **4. Обеспечение пожарной безопасности при реализации плана мероприятий по рекультивации отработанных угольных месторождений**

Каждое горное предприятие должно иметь разработанный и утвержденный в установленном порядке проект рекультивации нарушенных и нарушаемых земель. Рекультивации отработанных угольных месторождений, терриконов (большие площади земель, нарушенные горными работами, высокие внешние отвалы больших объемов, глубокие карьерные выемки и т. д.) должно предшествовать предпроектное технико-экономическое обоснование целесообразного и эффективного использования этих территорий с разработкой мероприятий по предупреждению и тушению загораний и пожаров.

В стране имеется положительный опыт рекультивации угольных отвалов.

На угольных гидроотвалах отработанного угольного разреза производят посадки сосны, акации белой, бузины, тополя, которые хорошо приживаются.

При рекультивации других буроугольных разрезов и восстановлении нарушенных земель выровненные отвалы покрывают лессом или лессовидными суглинками, а затем плодородной почвой. Наибольшую ценность представляют лессы и лессовидные четвертичные суглинки, являющиеся плодородным субстратом для сельскохозяйственных культур и лесных насаждений. Они содержат гумус, питательные вещества и кальций, наличие которого особенно ценно для нейтрализации фитотоксичных пород отвалов при покрытии их слоем 2–3 м. Использование лессовидных суглинков позволяет исключить другие способы химической мелиорации.

Одной из возможных областей применения отвалов углеобогащения является использование их для засыпки утилизируемых твердых бытовых отходов. Имеется международный опыт такого использования отвалов.

Другой путь [1] заключается в возможности извлечения из отвалов тяжелых металлов широкого спектра.

Рекультивация угольных месторождений, в частности, отвалов угольных неантрацитовых и антрацитовых шахт может быть пожаровзрывоопасным мероприятием. Как отмечалось выше, опасность терриконов таких отвалов заключается в том, что при наличии в них большого содержания угля в условиях хорошей теплоизоляции могут зародиться очаги самонагрева, а затем и самовозгорания. Образующиеся со временем в отвалах породы при выгорании ее внутри каверны, пустоты с температурой в них, достигающей 400 °С представляют опасность для людей и техники. В свою очередь выделяющийся в виде аэрозоля углерод провоцирует образование смога, горючие продукты – дымление, а иногда и открытый огонь (свечение), загрязнение воздушной среды. Резкое увеличение числа опасных и вредных факторов происходит при появлении пожаров на горнодобывающих предприятиях. Большая часть пожаров в отвалах является следствием самовозгорания угля и углесодержащих пород. Пожары наносят ущерб окружающей среде, могут вызвать взрывы горючих газов и пылей [13–15]. Горение породных отвалов описано в работах [13, 15]. Резкому ускорению процесса самовозгорания способствует предварительное нагревание горючего в отвалах внешними источниками тепла. В случае когда прогретые горные массы оказываются на поверхности отвалов и обеспечиваются постоянным притоком воздуха, процесс самовозгорания быстро прогрессирует. Анализ причин, вызывающих возникновение эндогенных пожаров на породных отвалах шахт, показал, что существует несколько источников предварительного подогрева складированных пород [13]:

при транспортировании в кузовах большегрузных автомобилей, в которых отработавшие газы проходят по каналам кузова и способны нагревать поверхность кузова, особенно в летнее время до температуры 100 °С и более. Эта температура близка к температуре самонагрева углей;

при проведении взрывных работ, когда на отвал доставляются породы из развала взорванных горных пород, в которых после взрыва может продолжаться горение;

при размещении углеродсодержащих пород в верхнем слое отвалов, когда в условиях притока кислорода воздуха интенсифицируются потоки воздуха, образующиеся над предварительно разогретой массой горной породы. В этом случае при отсутствии планировки и уплотнения верхнего слоя увеличиваются площадь контакта угля с воздухом и приток кислорода в породу из-за ветрового напора.

Для пожаровзрывоопасных отвалов угольных шахт на период рекультивации должны быть разработаны меры по предотвращению взрывов и тушению пожаров.

### **5. Способы тушения породных отвалов и мероприятия по обеспечению пожаровзрывобезопасности при их реализации**

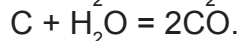
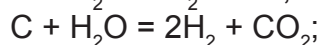
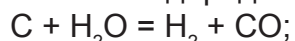
Предотвращение возникновения и тушение очагов самовозгорания породных отвалов могут осуществляться различными способами.

Одним из наиболее эффективных и экономически выгодных средств для предотвращения образования очагов горения в слое отвала является вода в проложенных внутри отвала трубопроводах. Способ реализации прокладки в отвалах водопровода является дорогостоящим, но эффективным.

Вода – эффективное средство тушения, так как обладает большой теплоемкостью, высокой плотностью, малой вязкостью. По оценкам [13] расход ее должен быть не ниже 2,3 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>2</sup>. Для разогретых объемов породной массы потребуются большие объемы воды, которую надо подавать в течение длительного периода времени.

Однако, как показали исследования [5, 8], при воздействии пара, воды и водопенных средств на горящий углерод, содержание горючих газов также растет пропорционально его температуре.

Выход горючих газов при взаимодействии воды, пара с углеродом при температуре горения углерода связан с протеканием реакций, сопровождающихся выделением водорода и оксида углерода:



Другим способом предотвращения пожаров в отвалах является способ утилизации горючих газов, который используется в свалках твердых бытовых отходов, по трубопроводам с выходом на факел или на переработку газов.

В работе [13] предложен метод предотвращения пожара путем изоляции прогретых углеродсодержащих масс от притока воздуха благодаря нанесению на поверхность отвала слоя негорючих пород, например, глины, обладающей низкой проницательной способностью. Однако такой метод обладает существенными недостатками.

На практике сложно, а часто невозможно, создать плотный слой инертного покрытия на борту породного отвала. Со стороны борта при ветровой нагрузке будет поступать воздух внутрь отвала. К этому следует добавить, что над очагами самовозгорания происходит прогрев слоя глины и с испарением в ней влаги уменьшается объем, что приводит к растрескиванию изолирующего слоя.

Наиболее эффективным способом тушения очагов горения в отвалах шахт назван комбинированный способ [13], суть которого заключается в подаче на разогретые области хладагента (воды) с последующей изоляцией прогретых углеродсодержащих пород. При этом, по мнению авторов работы, снижается расход воды до 0,3 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>2</sup> (при применении только воды как средства тушения расход воды составляет 2,3 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>2</sup>).

Обеспечение безопасности людей и техники при рекультивации углеродсодержащих отвалов включает в себя предотвращение взрывов. Взрывы возможны в случае интенсивных эндогенных пожаров при образовании выгоревших полостей и каверн, в которых аккумулируются горючие газы. Здесь важно отметить, что полости, каверны представляют смертельную опасность для людей, рабо-

тающих при рекультивации отвалов, и чреваты возможностью провала в них техники.

При ликвидации крупной аварии на Томыловском элеваторе (г. Чапаевск Самарской области) [5, 8] был применен метод предотвращения взрывов в горящих силосах 2 корпуса, покрытие которого полностью выгорело, путем сброса с вертолета МИ-6 металлических болванок массой около 1 т в кратеры активно горящих хранилищ. Это позволило избежать новых взрывов, которые уже произошли в этом корпусе, новых разрушений и, возможно, новых жертв. Такой метод метания металлических болванок по намеченным квадратам отвалов при наличии в них выгоревших полостей породы мог бы стать эффективным превентивным мероприятием для предотвращения взрывов.

### Заключение

Рекультивация отработанных угольных отвалов (восстановление земель и угодий, нарушенных горными, геологоразведочными и другими работами) является важной задачей.

Отвалы горнодобывающих производств подразделяются на две основные группы – отвалы открытых разработок и отвалы глубинных выемочных работ. На отвалах горных разработок открытого типа почвенный слой мощностью 1,5–2,0 см будет сформирован за период 15–20 лет и на нем возобновляются естественные процессы воспроизводства растительности. Опасность отвалов глубинных выемочных работ заключается в том, что при наличии в них большого содержания угля в условиях хорошей теплоизоляции могут зарождаться очаги самонагревания, а затем и самовозгорания. Эти очаги также приводят к выделению продуктов термической и термоокислительной деструкции, содержащих токсичные и горючие вещества: метан, аммиак, сероводород, углерод и его оксиды (например, оксид углерода), оксиды азота, продукты окисления металлов, в том числе и тяжелых. Со временем в отвалах породы при выгорании ее внутри образуются каверны, пустоты с температурой в них, достигающей 400 °С, представляющие опасность для людей и техники.

В случае возгорания эффективным средством тушения является вода, так как обладает большой теплоемкостью, высокой плотностью, малой вязкостью. По оценкам расход ее должен быть не ниже 2,3 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>2</sup>. Для разогретых объемов породной массы потребуются большие объемы воды, которую надо подавать в течение длительного периода времени.

Для предотвращения пожаров в отвалах применяют способ утилизации горючих газов, который используется в свалках твердых бытовых отходов по трубопроводам с выходом на факел или на переработку газов.

Представляет интерес метод предотвращения пожара путем изоляции прогретых углеродсодержащих масс от притока воздуха благодаря нанесению на поверхность отвала слоя негорючих пород, например, глины, обладающей низкой проницательной способностью. Однако такой метод может быть применен при низких значениях температур в отвалах.

Наиболее эффективным способом тушения очагов горения в отвалах шахт может быть комбинированный способ: подача на разогретые области хладагента (воды) с последующей изоляцией прогретых углеродсодержащих пород.

В случае интенсивных эндогенных пожаров при образовании выгоревших полостей и каверн, в которых аккумулируются горючие газы и проходят процессы разложения продуктов реакции термоокислительного пиролиза при повышенных температурах, возможны взрывы. Для предотвращения взрывов эффективным



превентивным мероприятием мог бы стать метод метания с вертолета металлических болванок по намеченным квадратам отвалов при наличии в них выгоревших полостей породы.

### Список литературы

1. Соколов Э.М., Качурин Н.М., Мелехова Н.И. Рекультивация отвалов отработанных шахт Подмосквовного бассейна // Известия ТулГУ. Науки о земле. Вып. 1. 2010. С. 102–105.
2. Горшков В.И. Самовозгорание веществ и материалов. М.: ВНИИПО, 2003. 444 с.
3. Баратов А.Н., Молчадский И.С. Горение на пожаре. М.: ВНИИПО, 2011. 502 с.
4. Вогман Л.П. Пожарная опасность процессов тления целлюлозы и растительного сырья // Комбикорма. 2016. № 12. С. 52–57.
5. Мелихов А.С. Исследование процесса распространения тления и условий его прекращения внутри массива газопроницаемого мелкодисперсного материала // Пожарная безопасность. 2018. № 4. С. 84–89.
6. Мелихов А.С., Баратов А.Н., Вогман Л.П. и др. Модель распространения фронта тления внутри мелкодисперсного газопроницаемого материала и условий тушения очага тления // Актуальные проблемы пожарной безопасности: тез. докл. XXI Междунар. науч.-практ. конф. М.: ВНИИПО, 2009. С. 35–40.
7. Вогман Л.П., Горшков В.И., Десяряев А.Г. Пожарная безопасность элеваторов. М.: Стройиздат, 1993. 298 с.
8. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность промышленных пылей. М.: Химия, 1986. 213 с.
9. Вогман Л.П., Простов Е.Е. Обзор результатов исследования роли воды в процессах самовозгорания растительного сырья // Хлебопродукты. 2015. № 2. С. 57–59.
10. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справ. в 2-х ч. М.: Ассоциация «Пожнаука», 2000.
11. Середа Т.Г., Кушнарёва О.В., Костарев С.Н., Устинов А.И., Михайлов М.А. Снижение пожаровзрывоопасности депонирования отходов // Пожарная безопасность. 2008. № 3. С. 74–81.
12. Портола В.А., Скударнов Д.Е., Протасов С.И., Подображин С.Н. Оценка параметров очагов самовозгорания породных отвалов угольных карьеров и способов их тушения // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 11. С. 2–47.
13. Левкин Н.Д., Мухина И.Е. Влияние породных отвалов угольных шахт на состояние окружающей среды // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2011. № 5. С. 277–279.
14. Шестакова И.И. Оценка экологической опасности самовозгорающихся бурых углей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 4 (63). С. 77–80.
15. Процессы тепломассобмена на породных отвалах шахт Кузбасса / Качурин Н.М. и др. // Известия Тульского государственного университета. Наука о земле. 2015. № 2. С. 41–43.

**Материал поступил в редакцию 31.10.2019 г.**

**Вогман Леонид Петрович** – главный научный сотрудник, доктор технических наук; **Ильичев Александр Валерьевич** – заместитель начальника отдела – начальник сектора; **Кондратюк Наталья Валентиновна** – старший научный сотрудник. Тел. (495) 524-98-59. E-mail: vniipo-3.5.3@ja.ru (Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России)), г. Балашиха, Московская область, Россия.

*L.P. Vogman, A.V. Ilyichev, N.V. Kondratyuk*

### **FIRE AND EXPLOSION SAFETY AT RECLAMATION OF SPENT COAL DEPOSITS**

Mining, exploration, and other activities lead to the destruction of lands, and it is important to restore them and use in the national economy. Coal mining is accompanied by the formation of a significant number of empty rocks, from which dumps (waste banks) are formed. These dumps are dangerous because if they contain a large amount of coal, at good thermal insulation there can arise sources of self-heating and then of self-ignition. The article considers the following ways to prevent the formation of sources of ignition in the dump layer: using water in pipelines inside the dump; utilization of combustible gases in solid waste dumps through pipelines with access to the torch or gas processing. The most effective way of fire extinguishing in the dumps of mines can be a combined method, which provides cooling agent (water) supply to the heated area followed by insulation of heated carbon-containing rocks, for example, clay.

**Keywords:** *carbon-containing dumps, waste banks, fire and explosion hazard, fire prevention and extinguishing, explosion prevention*

**Leonid P. Vogman** – Main Researcher, Doctor of Technical Sciences; **Alexander V. Ilyichev** – Deputy Head of Department – Head of Sector; **Natalia V. Kondratyuk** – Senior Researcher. Phone: (495) 524-98-59. E-mail: vniipo-3.5.3 @ ja.ru.

All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.