

*Socolov Edward Mihailovich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Chief of a Department, [ecology@tsu.tula.ru](mailto:ecology@tsu.tula.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Malikov Andrei Andreevich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Chief of a Department, [ecology@tsu.tula.ru](mailto:ecology@tsu.tula.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Ribak Leonid Livovich, Post Graduate Student, [ecology@tsu.tula.ru](mailto:ecology@tsu.tula.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Bogdaniv Sergei Maratovich, Post Graduate Student, [ecology@tsu.tula.ru](mailto:ecology@tsu.tula.ru), Russia, Tula, Tula State University*

УДК 622.272

## **ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИЧЕСКИ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕДР ПОДМОСКОВНОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА**

Э.М. Соколов, А.А. Маликов, Л.Л. Рыбак, С.М. Богданов

*Рассмотрены геотехнологические принципы экологически рационального использования недр подмосковного угольного бассейна.*

*Ключевые слова: минерально-сырьевая база, угольный бассейн, твердые бытовые отходы, технологические схемы.*

Особенностью российской минерально-сырьевой базы угольной промышленности является концентрация основной доли запасов в восточных регионах, а основные потребители угольной продукции расположены в европейской части России. Географическое положение Подмосковного бассейна уникально. Он расположен на территории Новгородской, Калининской, Смоленской, Калужской, Тульской и Рязанской областей. Общие геологические ресурсы угля составляют 11 млрд т. Балансовые запасы более 3,5 млрд т. В Тульской области главными полезными ископаемыми до недавнего времени являлись месторождения бурых углей Подмосковного бассейна, разработка которых началась более 150 лет назад, в 1853 году. За это время в Тульской области добыто более 1 млрд 200 млн т угля. Суммарная площадь, в той или иной мере подверженная техногенному воздействию, связанному с разработкой месторождений угля, составляет около 12 % от общей территории области. В пределах этой площади значительно активизировались экзогенные геологические процессы. Добыча углей привела к резкому нарушению природных ландшафтов и формированию новых техногенных ландшафтов. На данный момент балансовые запасы угля в Тульской области составляют 1 млрд 400 млн т [1].

В России доля природного газа как топлива на электростанциях будет снижаться вследствие падения добычи. Мировая электроэнергетика в среднем на 43 % основана на угле: в Европе – более 50 %, в США – на 56 %, в Китае – на 70 % . В России его доля на тепловых станциях составляет 27 %, а с учетом атомных и гидростанций – 18 % . Разведанных запасов газа хватит на 80 лет, тогда как угля на 300 лет. Эксплуатируемые месторождения газа иссякают, а для освоения новых месторождений (на Ямале, в Баренцевом море) требуются огромные затраты. Цена газа вырастет в 5-6 раз. Настолько же подорожает электроэнергия. Целесообразно прогнозировать те социальные, экономические и политические риски, которыми подвергнется наша страна через 50 лет, если ситуация в данной области останется без изменений. Особую остроту приобретает эта проблема для европейской части Российской Федерации, где есть один единственный источник угля – Подмосковский угольный бассейн. Однако процессы реструктуризации и диверсификации угольной промышленности поставили эту угленосную территорию в разряд бесперспективных угольных бассейнов.

В горнодобывающих регионах России создалась крайне напряженная социально-экономическая и экологическая обстановка, что отразилось в ухудшении качества и снижении уровня жизни населения не только этих регионов, но и населения страны в целом. Сегодня уже очевидным, что если жить так, как мы живем последнее десятилетие, если думать теми категориями, которые противопоставляют Российскую государственность эффективной рыночной экономике, и сохранить без изменения возникшую шкалу общественных ценностей, то вскоре нас ожидает энергетический кризис и в центральном федеральном округе, что уже имеет место в дальневосточных регионах страны. Наряду с энергетическими проблемами обостряются экологические проблемы, обусловленные угрожающими темпами роста потоков твердых бытовых отходов в городах, а эти проблемы можно и нужно решать используя геотехнологические подходы.

Следовательно, для возрождения и последующего развития отечественной системы рационального и безопасного природопользования нужны иные знания, иные принципы, иные стандарты. Анализ технико-экономических обоснований на закрытие шахт свидетельствует о том, что вопросы использования основных фондов ликвидируемых предприятий изучены лишь в первом приближении. В первую очередь это относится к использованию горных выработок и оставленных запасов. Подземное захоронение и обезвреживание отходов производится в виде глубокого захоронения отходов в скважины или в виде захоронения в естественные или искусственные пустоты в горных выработках на различных глубинах. Значительный опыт захоронения отходов в соляных рудниках или искусственных пустотах в соли накоплен в Германии. Подземное

пространство шахт и железных рудников используется в гораздо меньшей степени. Такой опыт для подземных пространств шахт Подмосквовного бассейна с возможностью подземного сжигания отходов совместно с углем является исключительно перспективным [2].

Целью исследований являлось установление новых и уточнение существующих закономерностей подземной выемки угольных пластов Подмосквовного бассейна, тепломассообменных процессов при подземном сжигании угля забалансовых запасов, а также отходов производства и потребления в горных выработках, отработанных шахт, для разработки эффективных геотехнологий комплексного использования низкокалорийного и высокочольного бурого угля и практической реализации геотехнологических методов уничтожения промышленных отходов подземном пространстве при закрытии шахт.

Проблема развития концептуальных положений экологически рационального комплексного использования минеральных ресурсов угольных месторождений и подземного пространства отработанных шахт, утилизация отходов и создание малоотходных и безотходных технологий в ведущих угольных бассейнах России приобрели исключительную актуальность. К настоящему времени Российскими и зарубежными школами разработаны научные основы комплексного освоения недр, подземной газификации и подземного сжигания угля для получения тепловой энергии, основанные на использовании классических законов термодинамики, физической химии и математической физики.

Показательным в этом отношении является пример Подмосквовного бассейна. На начальном этапе освоения добыча угля в Подмосквовном бассейне составляла всего лишь 9000 - 83000 т в год (период с 1858 по 1870 годы), перед второй мировой войной в 1940 году было добыто более 10 млн т угля, а наибольшая добыча 42 - 47 млн т приходится на 1956 - 1960 годы. В настоящее время акционерная компания «Мосбассуголь» добывает не более 1 млн т угля в год. Все это привело к необходимости разработки технологических решений для комплексного использования угольных месторождений Подмосквовья.

Концептуальная формула комплексного подхода заключается в том, что создание конкурентоспособных энерго-сырьевых предприятий и устойчивой системы новых рентабельных рабочих мест на базе технологической и социальной инфраструктуры действующих шахт и строящихся шахт Подмосквовного бассейна, обеспечивается экологически чистой технологией комплексного освоения недр [3]. Важнейшей составляющей комплексного использования угольных месторождений Подмосквовья является нетрадиционное использования подземных пространств существующих и вновь проводимых горных выработок, внедрения принципов гибкой технологии комплексного освоения угольных месторождений и создания энерго-сырьевых комбинатов на промплощадках закрытых шахт.

Требования к технологическим схемам ведения очистных и подготовительных работ, позволяющие в наибольшей степени учитывать горно-геологические условия эксплуатации угольных шахт Подмосквовного бассейна можно сформулировать следующим образом.

1. Для практической реализации систем разработки короткими очистными забоями необходимо обеспечить рациональную увязку выемочного, транспортного и иного оборудования по всему комплексу горных работ.

2. Использовать в технологических схемах как серийно выпускаемые, так и опытные образцы оборудования с относительно низкими стоимостными характеристиками и перспективой использования местных и региональных производственных и ремонтных баз.

3. Исключить из технологических схем трудоемкие, материалоемкие, многоступенчатые и опасные процессы и операции и параллельно осуществить максимальную унификацию оборудования (многофункциональность).

4. Снизить до минимума, определяемого порогом экономической целесообразности, потери полезного ископаемого.

5. Обеспечить высокие показатели надежности технологических схем в целом и ее структурных элементов.

6. Ориентироваться на относительно простые схемы организации труда с высокими темпами ведения очистных и подготовительных работ.

7. Обеспечить возможность включения в структуры технологических схем процессов размещения различных веществ, с учетом их агрегатного состояния, в выработанном пространстве.

При ранжировании требований в современных условиях доминирующим требованием является обеспечение минимальной ресурсоемкости (без снижения требований безопасности и охраны недр). Это требование позволяет выделить следующие группы технологических схем выемки ограниченных запасов угля в условиях форсированного сокращения производственных мощностей при ограниченных ресурсах, меняющихся требованиях к качеству угля и функциональному диапазону технологий.

1. Технологические схемы выемки угля проходческими комбайнами при камерных системах разработки.

2. Технологические схемы на основе специального оборудования.

3. Технологические схемы бурошнековой выемки.

Технологической основой указанных групп является структурное сочетание средств выемки, вентиляции, транспорта и водоотлива, которое можно легко обеспечить в будущих шахтах ООО «Мосбассуголь».

Минимизация ресурсоемкости позволяет выделить группы технологических схем выемки ограниченных запасов угля в условиях форсированного сокращения производственных мощностей при ограниченных ресур-

сах, меняющихся требованиях к качеству угля и функциональному диапазону технологий.

Технология выемки и транспортирования угля на основе проходческого оборудования может быть реализована в широком диапазоне горно-геологических и горнотехнических условий Подмосковского бассейна и для этих условий разработаны различные рациональные варианты. Для селективной выемке пластов со сложной структурой перспективной является флангово-фронтальная и короткозабойная фронтальная технология, например, с применением машины фронтально-избирательного действия, которая имеет телескопическую стрелу с дисковым рабочим органом, снижающим динамические удары.

Применение самоходной платформы в конструкции машины весьма перспективно для создания выемочного механизма в рамках короткозабойной технологии.

Бурошнековая технология может быть принята как базовая для разработки универсальных совмещенных технологических схем очистных и подготовительных работ на пологих пластах тонких и средней мощности в составе проходческих и буро-закладочных комплексов для выборочной и селективной отработки угольных месторождений подмосковского бассейна [4].

В процессе обоснования геотехнологических принципов ликвидации твердых бытовых отходов (ТБО) была уточнена структура варианта размещения затаренных ТБО в подземном пространстве шахты, включая дополнительные полости, с последующим сжиганием совместно с углем. Вычислительные эксперименты позволили определить исходные данные и установить закономерности материального и топливного баланса процесса сжигания смеси бурого угля и твердых бытовых отходов. Таким образом были установлены закономерности изменения показателей сжигания от скорости горения смеси и обоснованы эффективные режимы горения, увязанные с технологическими возможностями (проведение камер, транспортные схемы и т.п.). Установлено, что на 1 кг ТБО, сжигаемого в подземном пространстве, приходится 1,625 кг, что при размещении в шахте от 10,5 до 36,5 т ТБО требует подготовки для сжигания соответственно 17,2 тыс. т и 59,3 тыс. т угля. Тепловая мощность, выделяющаяся при сжигании смеси ТБО и бурого угля, составляет соответственно 6,75 и 23,25 Гкал/ч.

При заданных производительностях подземного пространства по размещению ТБО необходимая минимальная скорость горения смеси  $G_{см}$  составит 0,881 кг/с, максимальная – 3,038 кг/с. Температура смеси на выходе из угольного канала в зависимости от  $G_{см}$  - от 400 до 700 К. Величина угольного канала, обеспечивающего полное сгорание угля при рассматриваемых  $G_{см}$ ,  $T_r$  и количестве одновременно сжигаемых блоков ( $n_{бл}=1, 2, 4$ ) находится в диапазоне от 73,5 м до 112,5 м. Доказано, что отклонения от идеального режима горения и связанные с ними добавление горючих газов

в продукты подземного сжигания угля и ТБО практически не изменяет материальный баланс процесса и теплофизические свойства продуктов сжигания.

Наиболее целесообразной схемой сжигания смеси угля и ТБО является сжигание угля и ТБО с необходимой массовой скоростью в одном канале горения (одном блоке). Установлено, что существующая схема вентиляции шахты не требует корректировки. Разработаны технические требования к теплотехническому комплексу поверхности и предложены компоновочная схема и основной состав.

Геотехнологические параметры определяются для схемы, при которой производится совместное сжигание отходов, размещенных в камерах (дополнительных полостях), и угля в междуканальных целиках. Ширину каждой из сооружаемых камер принимаем равной 4 м, а длина определяется размерами угольных целиков по линии расположения камер и составляет до 50 м. При таком способе фронт горения угля и ТБО наиболее рационально ориентировать перпендикулярно длинной оси камер и междуканальных угольных целиков шириной 4 м. Такая ориентировка фронта горения гарантирует относительно стабильные поперечные размеры канала горения по всей его длине, а также наиболее полное выгорание угля и ТБО. В последнем случае достигается наиболее полная экологическая безопасность остатков ТБО, получаемых в результате их сжигания в смеси с бурый углем. В качестве базового объекта исследований была использована шахта «Смирновская» ОАО «Тулауголь» [3].

Бурый уголь шахты «Смирновская» является типичным для бурых углей Подмосковного угольного бассейна. Марка угля - Б2, состав угля на рабочую массу  $\sim W_t=33\%$ ,  $A=23,5\%$ ,  $S=2,9\%$ ,  $C=29,1\%$ ,  $H=2,2\%$ ,  $N=0,6\%$ ,  $O=8,7\%$ , низшая теплота сгорания угля на рабочую массу  $Q = 10500$  кДж/кг.

Средняя теплота сгорания ТБО на рабочую массу составляет  $Q_i = 6300$  кДж/кг. Состав ТБО на рабочую массу вариателен, поэтому их влажность, которая является одной из важнейших характеристик топлива при теплотехнических расчетах, примем равной влажности на рабочую массу угля, т.е.  $W_{ТБО} = W_t = 33\%$ . Вероятность того, что  $W_{ТБО}$  будут равны  $W_t$  угля довольно большая, т.к. до процесса сжигания ТБО могут находиться в камерах довольно длительное время (порядка 1 года) и между ними и углем в междуканальных целиках установится, весьма вероятно, равновесное состояние, как по температуре, так и по влажности. Состав теплотехнического комплекса должен определяться заданной теплопроизводительностью, составом парогазовой смеси и ПДК [5-6].

Все устройства и аппараты, входящие в комплекс, должны быть увязаны между собой по всем параметрам и подчинены общей технологии утилизации физического тепла газов подземного сжигания угля и их очистки. В состав теплотехнического комплекса должны входить следующие

щие основные устройства и аппараты: контрольно-регулирующая и управляющая аппаратура; обвязка скважины (ствола) исходящих газов; аппараты предварительной мокрой очистки газов и регулировки их температуры и производительности; система очистки газов от сернистых соединений; система котлов-утилизаторов тепла; система пылеулавливания газов, выбрасываемых в атмосферу; вентилятор-дымосос; система трубопроводов парогазовой смеси; система циркуляции теплофикационной воды (от котлов-утилизаторов до потребителя) в виде насосов, трубопроводов, аппаратуры управления; система химической подготовки подпиточной воды и ее магнитной обработки; дымовая труба и газовые задвижки (табл.).

Учитывая данные расчетов, температура газа - теплоносителя может достигать 1000 °С, что требует защиты обсадных колонн скважин. Кроме того, следует учитывать требования, предъявляемые к оборудованию ( $T_r \leq 600$  °С). Использование данного устройства позволяет сохранить скважину и полезно использовать извлекаемое при этом тепло. Для очистки газов от твердых частиц следует применять мокрые золоуловители следующих типов: центробежные скрубберы (ЦС ВТИ) или мокротрубковые золоуловители (МП ВТИ), работающие в комплексе с оросительными устройствами производительностью 2,1...3,25 м<sup>3</sup> воды в час. Для повышения степени очистки дымовых газов при установке центробежных скрубберов типа ЦС ВТИ перед скруббером рекомендуются применять аппараты типа МВ-УО ОРГОЭС или МПР-50, включающие трубы Вентури с системой орошения, обеспечивающие удельный расход воды в пределах 50...200 г/м<sup>3</sup> газа. При этом эффективность пылеулавливания составляет 57...99 %.

### ***Технические требования к теплотехническому комплексу***

Теплопроизводительность .....	не менее 3 Гкал/ч
Основные теплоносители .....	вода
Температура теплоносителя .....	70-110 °С, 110-130 °С
Источник тепла .....	паровая смесь, получаемая при подземном сжигании отходов или угля совместно с отходами
Диапазон производительности подачи паровой смеси .....	2,5-10 м <sup>3</sup> /с
Влагосодержание в паровой смеси	400 г/м <sup>3</sup>
Содержание O <sub>2</sub> .....	12 %
Содержание СО .....	10 %
Содержание СН <sub>4</sub> .....	1,5 %
Содержание Н <sub>2</sub> .....	10 %
Теплотворная способность парогазовой смеси	1,68 МДж/м <sup>3</sup> (400 Гкал/м <sup>3</sup> )

Температура парогазовой смеси	600 °С
Содержание твердых частиц при выбросе в атмосферу .....	не более 0,1 г/м <sup>3</sup>
Содержание окислов серы при выбросе в атмосферу .....	не более 0,3 г/м <sup>3</sup>
Содержание окислов азота при выбросе в атмосферу .....	не более 0,2 г/м <sup>3</sup>
Схема водооборотной системы ..	замкнутый цикл
Сточные воды .....	подвергаются очистке
Обеспечение пожаровзрывобезопасности процессов	Оборудование комплекса должно быть полустационарного, модульного типа (блочного)

Горно-геологическими факторами, определяющими значения физико-химических факторов, влияющих на устойчивость подземного горения угольного пласта, являются обводненность месторождения, тип угля и вмещающих пород, гипсометрия и глубина залегания угольного пласта, наличие карстовых нарушений. Максимальный КПД теплообменника при устойчивом горении угольного пласта обеспечивается если температура газообразных продуктов горения составляет 473...523 К, а расход 20000...50000 м<sup>3</sup>/ч. Для такого режима работы теплообменника необходимо прогреть угольный пласт на линии всасывающих скважин до температуры не менее 573 К. Устойчивое горение бурого угля происходит в фильтрационном канале и зависит от интенсивности фильтрационного потока воздуха, поступающего к огневому забою. Параметрами оптимизации газотеплогенератора являются расстояния между скважинами и рядами скважин; количество воздуха, подаваемого в нагнетательные скважины; перепад давления, развиваемый источниками тяги. Физико-химическими факторами, определяющими интенсивность физико-химических процессов горения угля являются проницаемость, трещиноватость и влажность угля и вмещающих пород; коэффициент диффузии кислорода; энергия активации, константа скорости окисления угля и тепловой эффект реакции кислорода с углем.

При фиксированном перепаде давления фильтрационный поток воздуха к огневому забою будет зависеть от проницаемости и трещиноватости угольного пласта, на которые существенное влияние оказывает влажность угля. Если плотность фильтрационного потока будет недостаточна, то процесс горения будет затухать. Горно-геологические условия Подмосковского бассейна позволяют эффективно использовать как технологию подземной газификации угля, так технологию «Углегаз», на базе существующего оборудования.

Теоретические исследования, лабораторные и промышленные эксперименты показали, что технология комплексной постадийной отработки



угольных месторождений «Углегаз», разработанная в Московском горном университете по руководством академика В.В. Ржевского, позволяет резко снизить нагрузки на окружающую среду по сравнению с традиционными способами угледобычи. Однако положительный экологический эффект достигается при устойчивом процессе подземного горения угольного пласта. Поэтому на стадии проектных решений необходимо иметь корректное математическое описание этого процесса, являющегося одним из основных в технологии «Углегаз».

Область горения угольного пласта, расположенную между рядом нагнетательных и вытяжных скважин можно разделить на следующие составные части - это зольный остаток; объем угольного пласта, реагирующий с кислородом воздуха; зона термической подготовки угольного пласта. Объем угля, контактирующий с зольным остатком, имеет наибольшую температуру в области горения. Учитывая, что линейный размер этой зоны на несколько порядков меньше расстояния между скважинами будем считать, что область горения состоит из двух полуплоскостей - зольного остатка и термически подготовленного угля, которые разделены линией огневого забоя.

В качестве физической модели процесса подземного сжигания угольного пласта принята модель, в соответствии с которой горение угля определяется интенсивностью трех различных процессов: химической реакции кислорода с углем на поверхности огневого забоя, сопровождающейся выделением тепла; конвективно-диффузионным переносом кислорода к огневому забою и отводом газообразных продуктов реакции [3].

Очевидно, что в общем процессе подземного горения угольного пласта лимитирующей стадией является тепломассоперенос в зоне химического реагирования. При определенном сочетании параметров тепломассообмена устанавливается состояние динамического равновесия, которое характеризуется постоянной скоростью химической реакции и горение протекает в устойчивом режиме.

В рамках этой физической модели справедливо следующее уравнение, теплового баланса:  $Q_x - Q_T - Q_{г.п.} = 0$ , где  $Q_x$  - количество тепла, выделяющегося в результате химической реакции;  $Q_T$  - количество тепла, уходящего из зоны химической реакции за счет теплопроводности;  $Q_{г.п.}$  - количество тепла, уносимого из зоны химической реакции газообразными продуктами горения. Количество тепла, выделяющегося в результате химической реакции, равно  $q \cdot w$ , где  $q$  - тепловой эффект физико-химического взаимодействия кислорода с углем, Дж/м<sup>3</sup>;  $w$  - скорость химической реакции, м<sup>3</sup>/с. Тепловой эффект взаимодействия кислорода с углем складывается из тепла процесса хемосорбции, которое при высоких температурах изменяется в интервале от 18 до 37 МДж/м<sup>3</sup> и в среднем составляет 28 МДж/м<sup>3</sup>, и тепла реакции окисления углерода угля кислородом воздуха,

которое равно 10 МДж/м<sup>3</sup>. Поэтому этот параметр можно считать постоянным и в среднем равным 38 МДж/м<sup>3</sup>.

Математическое описание процесса подземного горения угольного пласта можно представить в следующем виде:

$$\rho_y C_y \frac{\partial}{\partial t} T(x, t) = \lambda_y \frac{\partial^2}{\partial x^2} T(x, t) - \sum_{i=1}^2 \lambda_{\text{пг}} \frac{\partial^2}{\partial y_i^2} T_i(x, y_i, t) \Big|_{y_i=0} - \rho_y V C_y \frac{\partial}{\partial x} T(x, t); \quad (1)$$

$$\frac{\rho_{\text{пг}} C_{\text{пг}}}{\lambda_{\text{пг}}} \frac{\partial}{\partial t} T_i(x_i, y_i, t) = \frac{\partial^2}{\partial y_i^2} T_i(x_i, y_i, t) = \frac{\partial^2}{\partial y_i^2} T(x_i, y_i, t) + \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} T(x_i, y_i, t), \quad i=1,2; \quad (2)$$

$$T(x, 0) = T_i(x, y_i, 0) = T_0 = \text{const}; \quad (3)$$

$$T_i(x, 0, t) = T(x, t); \quad (4)$$

$$-\lambda_y \frac{\partial}{\partial x} T(0, t) = q K_0 I_{\text{п.с.}} C(0, t) \exp \left[ -\frac{E}{RT(0, t)} \right], \quad (5)$$

где  $K_0$  – предэкспоненциальный множитель, 1/с;  $E$  - энергия активации, Дж/моль;  $R$  - универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $\lambda_y$  - теплопроводность термически подготовленного угля, Вт/(м·К);  $C_y$  – теплоемкость термически подготовленного угля, Дж/(кг·К);  $\lambda_{\text{пг}}$  - теплопроводность вмещающих пород (индекс  $i=1$  относится к породам кровли,  $i=2$  к породам почвы), Вт/(м·К);  $T_i(x, y_i, t)$  - функция, описывающая поле температур во вмещающих породах, К;  $\rho_r$  - плотность газообразных продуктов горения, кг/м;  $V$  - скорость фильтрации, м/с;  $C_r$  - теплоемкость газообразных продуктов горения, Дж/(кг·К).

Уравнения (1) - (5) описывают нестационарное поле температур угольного пласта и вмещающих пород соответственно. Математическая модель процесса, представленная уравнениями (1) - (2) и условиями (3) - (5) является теоретическим обобщением результатов физического моделирования и стендовых испытаний, проведенных сотрудниками МГГУ и ТулГУ. Полученная модель позволяет решить следующие практические задачи:

- определить расстояние между рядами нагнетательных и всасывающих скважин, которое обеспечит эффективную работу теплообменника;
- определить физические условия, обеспечивающие устойчивую реакцию горения;
- оценить химический состав газообразных продуктов подземного сжигания угольного пласта и мощность выбросов загрязнителей в водоносные горизонты, и приземные слои атмосферы.

Забалансовые запасы целого ряда угольных месторождений Подмосковного бассейна целесообразно обрабатывать по скважинной технологии, которая аналогична известным технологическим схемам подземной газификации угля. Это позволяет использовать в качестве математического описания распределение воздуха в угольном пласте и вмещающих породах модели, предложенные И.А. Чарным. Адаптация этих моделей к рассматриваемым физическим условиям сводится к следующему. Пусть в однородном пласте расположены два параллельных ряда скважин, расстояние между которыми  $2h$ , расстояние между скважинами в ряду  $s$ , глубина каждой скважины одна и та же и равна  $H$ . Установившееся течение газовой смеси в пористой среде описывается уравнением Лапласа:  $\nabla^2\Phi = 0$ , где  $\Phi$  - потенциал массовой скорости фильтрации газа;  $k$  - коэффициент газовой проницаемости,  $m^2$ ;  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости воздуха, Па·с;  $\rho_0$  - плотность воздуха,  $kg/m^3$ ;  $p_0$  - атмосферное давление, Па;  $p$  - давление воздуха в данной точке пористой среды, Па.

При этом вновь введенные источники окажут небольшое влияние на распределение потенциалов в плоскости  $z=H$ , так как расстояние от них до этой плоскости  $2H$  значительно больше расстояния между скважинами  $2\sigma$ . В этом случае потенциал массовой скорости фильтрации будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \Phi = & \pi^{-1} \left\{ q_1 \sum_{n=1}^N \ln \left[ \left[ (x - 2\sigma(n-1))^2 + (y - h)^2 + (z - H)^2 \right] \times \right. \right. \\ & \times \left. \left[ (x - 2\sigma(n-1))^2 + (y - h)^2 + (z + H)^2 \right]^{-1} \right\} + \\ & + \sum_{n=1}^N q_{2n} \ln \left\{ \left[ (x - 2\sigma(n-1))^2 + (y + h)^2 + (z - H)^2 \right] \times \right. \\ & \left. \times \left[ (x - 2\sigma(n-1))^2 + (y + h)^2 + (z + H)^2 \right]^{-1} \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $q_1, q_{2n}$  - мощность стоков и источников, на единицу длины скважины,  $H/m \cdot c$ ;  $N$  - число скважин.

Массовые дебиты скважин источников находятся из условий равенства нулю потенциалов на их контурах:

$$\Phi \left\{ \text{при } (x - x_n)^2 + (y + h)^2 + (z - H)^2 = r^2 \right\} = 0, \quad n = \overline{1, N}, \quad (7)$$

где  $r$  - радиус скважины.

Условия (7) представляют собой систему  $N$  линейных уравнений. Учитывая, что радиус скважины значительно меньше расстояний между ними, эту систему уравнений можно записать в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} B_1 q_{21} + d_{12} q_{22} + \dots + d_{1N} q_{2N} &= -A_1 - C_1, \\ d_{21} q_{21} + B_1 q_{22} + \dots + d_{2N} q_{2N} &= -A_1 - C_2, \\ \dots & \\ \dots & \\ d_{N1} q_{21} + d_{N2} q_{22} + \dots + B_1 q_{2N} &= -A_1 - C_N, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где

$$A_1 = \frac{q_1}{\pi} \ln \frac{r^2 + 4h^2}{r^2 + 4h^2 + 4H^2}; B_1 = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r}{(r^2 + 4H^2)^{0.5}};$$

$$d_{1n} = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{2(i-n)\sigma}{[4\sigma^2(i-n) + 4H^2]^{0.5}}; C_1 = \frac{q_1}{2\pi} \ln \frac{[4\sigma^2(i-n)^2 + 4h^2]^{0.5}}{[4\sigma^2(i-n)^2 + 4h^2 + 4H^2]^{0.5}}.$$

Учитывая тот факт, что массовая скорость фильтрации газовой смеси пропорциональна градиенту потенциала фильтрационного течения, получим

$$\begin{aligned} \rho_0 V_x &= -\frac{q_1}{2\pi} \sum_{n=1}^N [x - 2\sigma(n-1)] [(S_{1n})^{-1} - (S_{2n})^{-1}] - \\ &\quad - \frac{1}{2\pi} \sum_{n=1}^N q_{2n} [x - 2\sigma(n-1)] [(S_{3n})^{-1} - (S_{4n})^{-1}]; \\ \rho_0 V_y &= -\frac{q_1}{2\pi} \sum_{n=1}^N (y-h) [(S_{1n})^{-1} - (S_{2n})^{-1}] - \\ &\quad - \frac{1}{2\pi} \sum_{n=1}^N q_{2n} (y+h) [(S_{3n})^{-1} - (S_{4n})^{-1}]; \\ \rho_0 V_z &= -\frac{q_1}{2\pi} \sum_{n=1}^N [(z-H)(S_{1n})^{-1} - (z+H)(S_{2n})^{-1}] - \\ &\quad - \frac{1}{2\pi} \sum_{n=1}^N q_{2n} [(z-H)(S_{3n})^{-1} - (z+H)(S_{4n})^{-1}]; \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} S_{1n} &= (x - 2\sigma(n-1))^2 + (y-h)^2 + (z-H)^2; \\ S_{2n} &= (x - 2\sigma(n-1))^2 + (y-h)^2 + (z+H)^2; \\ S_{3n} &= (x - 2\sigma(n-1))^2 + (y+h)^2 + (z-H)^2; \\ S_{4n} &= (x - 2\sigma(n-1))^2 + (y+h)^2 + (z+H)^2. \\ V &= (\rho_0)^{-1} (V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)^{0.5}. \end{aligned} \quad (9)$$

Расчет по формуле (9) позволил определить минимальные скорости фильтрации  $V_{\min}$  в плоскости угольного пласта (при  $z = H$ ) в зависимости

от соотношения линейных размеров сетки скважин и числа скважин в ряду. Установлено, что оптимальной по критерию  $V_{\min} \rightarrow \max$  является квадратная сетка скважин с  $h/\sigma = 1$ . С ростом числа скважин в ряду  $V_{\min}$  монотонно возрастает, но, начиная с  $N = 13 \dots 15$  прирост минимальной скорости фильтрации незначителен.

Решение уравнений (8) показывает, что общий дебит скважин-источников всегда меньше дебита стоков. Это объясняется тем, что кровля угольного пласта не является абсолютно непроницаемой и поэтому неизбежен подсос воздуха через аэродинамически активные зоны покрывающих пород. Расстояние между рядами скважин определяется из условия прогрева угольного пласта до температуры равной расчетной температуре газообразных продуктов горения. При этом рассматривается стационарный процесс теплообмена, который установится через некоторый период после возникновения устойчивого горения. Для того, чтобы поддерживалось устойчивое горение необходим устойчивый диффузионный поток кислорода к реагирующей поверхности, который соответствует состоянию динамического равновесия процесса окисления угля в интервале температур горения. Тогда с учетом принятых допущений и математического описания процесса тепломассообмена получим, что при стационарном теплообмене  $\partial T/\partial t = 0$  и математическая модель примет вид

$$a \frac{d^2 T}{dx^2} + b \frac{dT}{dx} = 0; \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} T|_{x=0} &= T_{O_3} = \text{const}, \\ -\lambda \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} &= 2hqK_0 C_* \exp[-E(RT_{O_3})^{-1}], \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где  $V$  - скорость фильтрации воздуха, м/с;  $V_{O_3}$  - средняя скорость продвижения огневого забоя, м/с;  $C_*$  - концентрация кислорода на линии огневого забоя;

$$a = \left( \lambda_y + \sum_{i=1}^2 \lambda_{\Pi i} \right) \left( \rho_y C_y + \sum_{i=1}^2 C_{\Pi i} \rho_{\Pi i} \right)^{-1}; \quad b = \rho_y C_y V \left( \rho_y C_y + \sum_{i=1}^2 C_{\Pi i} \rho_{\Pi i} \right)^{-1} - V_{O_3}.$$

Из решения задачи (10) - (11) следует, что существует функция  $T(x)$ , которая имеет горизонтальную асимптоту  $T_\infty < T_{O_3}$ :

$$T_\infty = \lim_{x \rightarrow \infty} T(x) = T_{O_3} - 2hqK_0 C_* (b\lambda)^{-1} \exp[-E(RT_{O_3})^{-1}]. \quad (12)$$

При этом в зависимости от расстояния  $2h$  асимптота может находиться как выше изотермы  $T_r$ , так и ниже ее. Принимая  $T_\infty = T_r$  можно определить оптимальное расстояние между рядами скважин

$$2h = \lambda b(T_{O_3} - T_r)(aqK_0 C_*)^{-1} \exp[-E(RT_{O_3})^{-1}]. \quad (13)$$

Чтобы воспользоваться формулой (13), необходимо рассчитать  $C_*$ . Для решения этой задачи достаточно рассмотреть стационарный конвективно-диффузионный перенос кислорода к огневому забою. Математическая модель диффузионного переноса в этом случае имеет вид

$$D \frac{d^2 C}{dx^2} + V \frac{dC}{dx} = 0; \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} C|_{x=0} &= C_* = \text{const}; \\ D \frac{dC}{dx} \Big|_{x=0} &= KC_* \cdot 1, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где  $K$  - константа скорости химического взаимодействия кислорода с углем при температуре  $T_{O_3}$ , 1/с,  $K = K_0 \exp[-E(RT_{O_3})^{-1}]$ .

Решение задачи (14) - (15) можно записать следующим образом:

$C(x) = C_* \left\{ 1 + KV^{-1} [1 - \exp(-xVD^{-1})] \right\}$ . Функция  $C(x)$  также имеет горизонтальную асимптоту  $C_\infty > C_*$ , которая определяется по формуле  $C|_{x=0} = \lim_{x \rightarrow \infty} C(x) = C_* (1 + KV^{-1})$ . Принимая, что  $C_\infty = C_0$ , где  $C_0$  - начальная концентрация кислорода в воздухе, поступающем в нагнетательные скважины, получим следующее соотношение:  $C_* = C_0 (1 + KV^{-1})$ . Исходя из оптимальных режимов работы серийно выпускаемых теплообменников, принимаем средний расход газообразных продуктов горения равным  $5 \cdot 10^4$  м<sup>3</sup>/ч и их температуру  $T_r = 578$  К, при этом средняя скорость фильтрации воздуха будет составлять  $3,5 \cdot 10^2$  м/с.

Температура огневого забоя принимается исходя из опыта подземной газификации угля и результатов физического моделирования равной 788 К, тогда  $K = 0,19$  1/с. Значения коэффициентов:  $a = 5,9 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с;  $b = 7,44 \cdot 10^{-3}$  м/с (при расчете  $b$ , значение  $V_{o.з.}$  принято из опыта подземной газификации угля равным 0,5 м/сут). Расчетная концентрация кислорода на огневом забое 3,1 %, тогда по формуле найдем  $2h = 28,9$  м. Учитывая возможные отклонения, связанные с временными флуктуациями температуры, оптимальным следует считать расстояние между рядами скважин равное 20 - 30 м.

Сотрудниками ООО «Мосбассуголь» и МГГУ совместно с исследовательской группой «Углегаз» ТулГУ проведена серия опытов на лабораторной установке, созданной на базе технологического комплекса шахты № 3 – «Киреевская», для исследования процесса сжигания пласта бурого

угля при различных способах подачи воздуха в модель. Исследования показали, что при огневой отработке оконтуренных целиков угля, комбинированная схема, разработанная в МГГУ, обеспечивает начальное горение в свободном канале с последующей интенсификацией процесса за счет фильтрационного подвода воздуха к огневому забою. Этот способ обеспечил устойчивое горение, с высокой температурой газообразных продуктов горения. Результаты натурного эксперимента свидетельствовали о том, что в целом для условий Подмосковского бассейна эта технологическая схема является наиболее эффективной при отработке оконтуренных выработками целиков угля (такая ситуация наиболее часто наблюдается в околоствольных дворах отрабатываемых шахт и подлежащих закрытию). В качестве расчетной схемы рассматривался плоский объект произвольной формы, оконтуренный выработками.

Комплексное решение задач тепломассопереноса позволило получить на выходе всю информацию, необходимую для обоснованного выбора параметров подземного газотеплогенератора, в том числе и дебит окислителя, а также рассчитать возможный выброс тепловой энергии в окружающую среду. В целом на основе экспериментальных и теоретических исследований уточнены существующие закономерности физико-химических процессов, протекающих при подземном сжигании бурых углей Подмосковского бассейна, для получения тепловой энергии. Полученные результаты, на наш взгляд, могут быть использованы для решения проблем диверсификации и технологической реструктуризации, действующих и строящихся шахт ООО «Мосбассуголь» и способствовать созданию экологически рациональных и экономически конкурентоспособных энерго-сырьевых предприятий. Математическое моделирование технологической схемы огневой отработки угольного целика ш. «Киреевская – 3» показало, что комбинированная воздухообмена схема позволит обеспечить потребителя необходимым количеством тепла. Для нормального функционирования рассмотренной технологической схемы необходимо провести технические мероприятия по осушению подготовленных запасов.

### Список литературы

1. Соколов Э.М., Качурин Н.М., Рябов Г.Г. Геоэкологические принципы использования вторичных ресурсов. М.; Тула. Изд-во «Гриф и К<sup>0</sup>». 2000. 360 с.
2. Геоэкологические принципы технологической реструктуризации Подмосковского угольного бассейна / Н.М. Качурин [и др.]. М.: Тула. Изд-во "Гриф и К<sup>0</sup>". 2004. 365 с.
3. Комплексное освоение бурогоугольных месторождений / Л.А. Пучков [и др.]. М.: Изд-во «Горная книга». 2006. 289 с.

4. Геоэкологическое обоснование добычи угля на малых глубинах / Н.М. Качурин [и др.]. М.: Изд-во МГГУ. 2005. 298 с.

5. Качурин Н.М., Ефимов В.И., Воробьев С.А. Методика прогнозирования экологических последствий подземной добычи угля в России. М.: Горный журнал. 2014. №9. С. 138-142.

6. Качурин Н.М., Воробьев С.А., Факторович В.В. Теоретические положения и модели воздействия на окружающую среду подземной добычи полезных ископаемых//Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2013. Вып.3. С.126-134.

*Соколов Эдуард Михайлович, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, [ecology@tsu.tula.ru](mailto:ecology@tsu.tula.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Маликов Андрей Андреевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, [ecology@tsu.tula.ru](mailto:ecology@tsu.tula.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Рыбак Леонид Львович, аспирант, [ecology@tsu.tula.ru](mailto:ecology@tsu.tula.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Богданов Сергей Михайлович, аспирант, [ecology@tsu.tula.ru](mailto:ecology@tsu.tula.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет*

*GEOTECHNOLOGICAL PRINCIPALS ENVIRONMENTALLY RATIONAL USING  
MOSCOW COAL BASIN MINERAL RESOURCES*

*E.M. Socolov, A.A. Malikov, L.L. Ribak, S.M. Bogdaniv*

*Geotechnological principles environmentally rational using Moscow Coal Basin mineral resources were considered.*

*Key words: mineral base, coal basin, solid domestic wastes, technological schemes.*

*Socolov Edward Mihailovich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Chief of a Department, [ecology@tsu.tula.ru](mailto:ecology@tsu.tula.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Malikov Andrei Andreevich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Chief of a Department, [ecology@tsu.tula.ru](mailto:ecology@tsu.tula.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Ribak Leonid Livovich, Post Graduate Student, [ecology@tsu.tula.ru](mailto:ecology@tsu.tula.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Bogdaniv Sergei Maratovich, Post Graduate Student, [ecology@tsu.tula.ru](mailto:ecology@tsu.tula.ru), Russia, Tula, Tula State University*