

УДК 622.272

Н.И. Абрамкин, И.В. Агеева

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАЗРАБОТКИ
УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ НА МАЛЫХ ГЛУБИНАХ**

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 м³/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 и 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 под руководством академика В.В. Ржевского, позволяет резко снизить нагрузку 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.

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/м³; w - скорость химической реакции, м³/с.

Тепловой эффект взаимодействия кислорода с углем складывается из тепла процесса хемосорбции, которое при высоких температурах изменяется в интервале от 18 до 37 МДж/м³ и в среднем составляет 28 МДж/м³, и тепла реакции окисления углерода угля кислородом воздуха, которое равно 10 МДж/м³. Поэтому этот параметр можно считать постоянным и в среднем равным 38 МДж/м³.

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

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

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

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

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

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

где K_0 - предэкспоненциальный множитель, 1/с; E - энергия активации, Дж/моль; R - универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К; λ_y - теплопровод-

ность термически подготовленного угля, Вт/м·К; C_y – теплоемкость термически подготовленного угля, Дж/кг·К; $\lambda_{\Gamma i}$ – 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; ρ_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 натурных испытаний, проведенных сотрудниками МГГУ и ТулГУ. Полученная модель позволяет решить следующие практические задачи:

- определение расстояния между рядами нагнетательных и всасывающих скважин, которое обеспечит эффективную работу теплообменника;
- определение физических условий, обеспечивающих устойчивую реакцию горения;
- оценка химического состава газообразных продуктов подземного сжигания угольного пласта и мощности выбросов загрязнителей в водоносные горизонты и приземные слои атмосферы.

Забалансовые запасы целого ряда угольных месторождений Подмосковно-го бассейна целесообразно обрабатывать по скважинной технологии, которая аналогична известным технологическим схемам подземной газификации угля. Это позволяет использовать в качестве математического описания распределения 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 Φ – потенциал массовой скорости фильтрации газа; k – коэффициент газовой проницаемости, м²; μ – коэффициент динамической вязкости воздуха, Па·с; ρ_0 – плотность воздуха, кг/м³; 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 2σ . В этом случае потенциал массовой скорости фильтрации будет иметь вид:

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

$$V = (\rho_0)^{-1} (V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)^{0.5}. \quad (9)$$

Использование формулы (9) позволило рассчитать 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 $N = 13 - 15$, 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 $dT/dt = 0$, и тогда 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 подвигания огневого забоя, м/с; C_* - концентрация кислорода на линии огневого забоя;

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

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_Γ , так и ниже ее. Принимая $T_\infty = T_\Gamma$, можно определить оптимальное расстояние между рядами скважин

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

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: $C_{x \rightarrow \infty} = \lim_{x \rightarrow \infty} C(x) = C_* (1 + KV)^{-1} = C_* (1 + KV)^{-1}$. Прини-

мая, 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 $5 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{ч}$ и их температуру $T_r = 578\text{К}$, при этом средняя скорость фильтрации воздуха будет составлять $3,5 \cdot 10^2 \text{ м/с}$.

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

Сотрудниками ОАО «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

свидетельствуют о том, что в целом для условий Подмосковного бассейна эта технологическая схема является наиболее эффективной при отработке оконтуренных выработками целиков угля (такая ситуация наиболее часто наблюдается в околовольных дворах обрабатываемых шахт и подлежащих закрытию). В качестве расчетной схемы рассматривался плоский объект произвольной формы, оконтуренный выработками.

Комплексное решение 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 Подмосковного бассейна, для получения тепловой энергии.

Полученные результаты, по мнению авторов, могут быть использованы для решения проблем диверсификации и технологической реструктуризации, действующих и строящихся шахт ОАО «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 схема воздухообмена позволит обеспечить потребителя необходимым количеством тепла. Для нормального функционирования рассмотренной технологической схемы необходимо провести технические мероприятия по осушению подготовленных запасов. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Абрамкин Н.И. – Московский государственный горный университет.
Агеева И.В. – инженер-экономист ТулГУ.

Рецензент д-р техн. наук, проф. *Н.М. Качурин.*

