

онной моделью, приводит к существенному (в отдельных случаях – более, чем двукратному) увеличению размеров зон неупругих деформаций вблизи выработок. Последнее объясняет одну из причин "дальнодействия" зон влияния выработок при традиционном креплении и указывает на первоочередную задачу предотвращения переразрыхления пород приконтурной зоны выработок, а как результат - сохранение остаточной несущей способности пород.

Для натуральных условий, по сравнению с результатами лабораторных экспериментов, величина граничного разрыхления пород на контуре выработки, характеризующаяся исчезновением остаточной несущей способности, требует определенной корректировки в сторону уменьшения, связанной с особенностями разрыхления пород контура, характерными размерами и формой образующихся блоков.

Решение уравнений модели, обработка экспериментальных данных и построение графиков выполнены в среде Mathcad Professional 7.0 [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. - Киев: Наук. думка, 1985. - 192 с.
2. Очков В.Ф. Mathcad 7 Pro для студентов и инженеров. - М.: КомпьютерПресс, 1998. - 384 с.

УДК 662.61:622.33

В.И. Елисеев, Т.А. Толстопят

ГОРЕНИЕ УГОЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ

В роботі у рамках теорії зведеної плівки представлена математична модель горіння вугільної частинки з урахуванням кінетики хімічних процесів, які відбуваються на зовнішній поверхні а також в тріщинах та порах. На основі отриманих систем рівнянь проведені розрахунки розподілу температур та концентрацій компонентів у самої частинки та в її околі.

Горение угля и, в частности, угольных частиц давно уже привлекает внимание исследователей. Это связано с большим интересным комплексом теоретических задач, которые объединяют в себе и физико-химические явления и тепло-массообменные процессы. Этот круг задач имеет громадное практическое значение, вследствие чего данному вопросу посвящено значительное количество работ, например [1-4], в которых определены основные химические реакции, выписаны уравнения тепло-массообмена, получены приближенные решения, приведены важные результаты экспериментальных исследований.

В настоящее время в связи с проблемами газификации угля вопросы горения угольных частиц представляются по-прежнему актуальными и требуют детальных проработок. В данной работе на основе современных представлений о гетерогенном горении и химизме процесса составлена математическая модель, учитывающая массообменные процессы на внешней и внутренних поверхностях в трещинах и порах частицы, а также кинетику химических реакций в прилегающем к частице объеме.

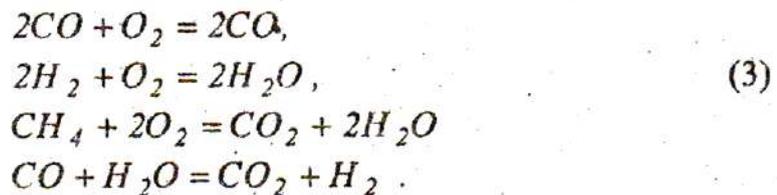
1. Основные уравнения процесса, проходящего во внешней области. Используя модель приведенной пленки [3], выпишем уравнение, описывающее движение и теплообмен в окрестности частицы

$$\begin{aligned} \frac{\partial(r^2 c_i)}{\partial t} + \frac{\partial(r^2 v c_i)}{\partial r} &= r^2 g_i + \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D \frac{\partial c_i}{\partial r} \right) \\ r^2 \rho \left(\sum_i c_i \frac{c_{pi}}{M_i} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial r} \right) &= \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \\ + r^2 \rho D \left(\sum_i \frac{c_p}{M_i} \frac{\partial c_i}{\partial r} \right) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} - r^2 \rho \sum_i \left(H_{0i} + \frac{c_{pi}}{M_i} T \right) g_i \end{aligned} \quad (1)$$

где t - время; r - текущий радиус; c_i - массовые концентрации; ρ - плотность смеси; T - температура газа; D - коэффициент диффузии; λ - коэффициент теплопроводности; M_i - молекулярный вес; c_{pi} - коэффициент теплоемкости компонентов; H_{0i} - энтальпии образования веществ; g_i - источники, учитывающие объемные реакции в среде. Будем считать, что плотность ρ постоянна (в расчетах примем ее зависимой от температуры параметрически), тогда скорость v можно получить из уравнения неразрывности в виде:

$$v = \frac{r_m^2}{r^2} v_g \quad (2)$$

где r_m - радиус частицы; v_g - скорость газа на внешней поверхности частицы (она возникает в результате гетерогенных реакций). Согласно [2,3] в качестве объемных реакций в газе будем рассматривать следующие



Используя выписанные реакции и кинетические уравнения для скоростей этих реакций, выражения для источников и стоков компонентов g_i могут быть записаны в соответствии с законами массообмена [5], в результате чего уравнения во внешней области замыкаются.

2. Уравнения, учитывающие внутреннее горение в частице.

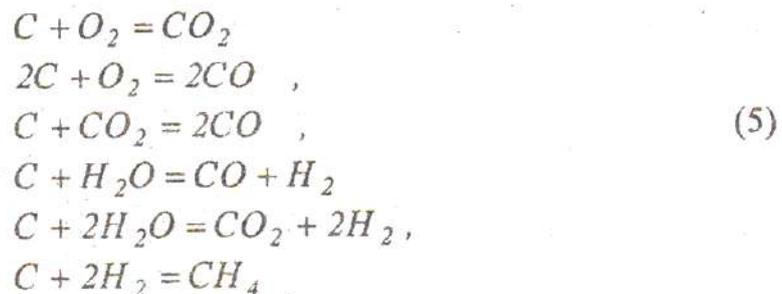
Рассматривая отдельную пору и идеализируя ее в виде некоторого канала можно записать уравнения тепло-массообмена для движущегося газа в этой поре. Усредняя их по всему объему частицы и учитывая теплообмен в твердой фазе, получим следующие уравнения

$$\frac{\partial(r^2 c_i)}{\partial t} + \frac{\partial(r^2 u c_i)}{\partial r} = r^2 G_i + \frac{D}{l^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial c_i}{\partial r} \right) + r^2 \frac{1-\beta}{\beta} \rho_m \chi S_m j_m$$

$$\begin{aligned}
(1-\beta)\rho_m \frac{c_{pm}}{M_m} \left(\frac{\partial(r^2 T_m)}{\partial t} + \frac{\partial(r^2 u T)}{\partial r} \right) &= \beta \lambda_m \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \beta r^2 \rho \sum_i \left(H_{0i} + \frac{c_{pi}}{M_i} T \right) G_i + \\
+ r^2 \rho \rho_m (1-\beta) \chi S_m \sum_i I_i \left[H_{0i} - H_{om} + \left(\frac{c_{pi}}{M_i} - \frac{c_{pm}}{M_m} \right) T_m \right], & \\
\frac{\partial(r^2 u)}{\partial r} &= r^2 \frac{1-\beta}{\beta} \rho_m \chi S_m \sum_i j_i, \quad (4)
\end{aligned}$$

где c_i - те же компоненты газовой смеси, что и в уравнении (1); u - скорость газа в поре; ρ_m - истинная плотность угля; T_m - температура угля; c_{pm} - коэффициент теплоемкости угля; λ_m - коэффициент теплопроводности системы уголь-газ (в расчетах принимаем равным теплопроводности угля); β - пористость угля; S_m - внутренняя поверхность с размерностью принятой в соответствии с [6] - $\text{м}^2/\text{г}$; χ - доля внутренних поверхностей, на которых активно проходят химические реакции; G_i - источники вещества или стоки, связанные с объемными химическими реакциями (3); I_i - источники связанные с поверхностными химическими реакциями.

В работах [2,3] показано, что на поверхности угольной частицы проходят следующие химические реакции, которые являются собирательными, т.к. включают в себя ряд более элементарных актов:



Согласно [3] при горении угольных частиц в воздухе двумя последними можно пренебречь. Записывая потоки вещества на единице поверхности и используя кинетические уравнения для скоростей реакций (5), можно получить выражения для I_i , после чего уравнения (4) будут представлять собой замкнутую систему.

3. Граничные условия.

Граничные условия включают в себя соответствующие равенства для концентраций компонентов и их потоков. В центре частицы из условия симметрии следует, что

$$\frac{\partial c_i}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T_m}{\partial r} = 0, \quad u = 0 \quad (6)$$

На внешней поверхности приняты следующие условия:

$$\begin{aligned} c_i|_- &= c_i|_+, \quad T_i|_- = T_i|_+ \\ -D \frac{\partial c_i}{\partial r} \Big|_+ + (v_g - v_m) c_i|_+ &= (1 - \beta) j_i + \beta \left(-\frac{D}{l^2} \frac{\partial c_i}{\partial r} + u c_i \right) \Big|_- \\ -\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial r} \Big|_- &= -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_+ + \rho \sum_i j_i \left[H_{0i} - H_{0m} (c_{pi} - c_{pm}) T \right] \Big|_+ + \sigma (T^4|_+ - T_w) \quad (7) \\ v_g - v_m &= (1 - \beta) \sum_i j_i + \beta u|_- \end{aligned}$$

где $|_-$ - параметры на поверхности изнутри частицы; $|_+$ - извне частицы; σ - постоянная Больцмана; T_w - температура стенок аппарата, в котором происходит горение; j_i - потоки вещества, связанные с гетерогенными реакциями (5).

Замыкающими условиями являются выражения на внешней поверхности приведенной пленки:

$$\begin{aligned} -D \frac{\partial c_i}{\partial r} + v c_i &= \alpha_c (c_i - c_{i\infty}) \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} + \rho \sum_i \frac{c_{pi}}{M_i} \left(c_i v - D \frac{\partial c_i}{\partial r} \right) T &= \alpha_T (T - T_\infty) \quad (8) \end{aligned}$$

где $c_{i\infty}$ - концентрация i -го компонента на бесконечности; T_∞ - температура среды; α_c и α_T - коэффициенты массо- и теплоотдачи, которые определяются с помощью критериального условия [7]

$$Nu = 2 + 0.03 Re^{0.54} Pr^{0.33} + 0.35 Re^{0.58} Pr^{0.36}, \quad (9)$$

где Nu - соответственно теплообменное или массообменное число Нуссельта; Re - число Рейнольдса; Pr - число Прандтля или, соответственно число Шмидта.

Выписанная система уравнений (1) - (5) с граничными условиями (6) - (8) и критериальными соотношениями (9) представляет собой замкнутую математическую задачу, сформулированную в рамках модели приведенной пленки с учетом внутреннего горения и признанной схемой химизма горения угля.

4. Результаты расчетов.

В данной серии расчетов показано влияние внутренней поверхности трещин на распределение концентраций в поровых каналах частицы и в области приве-

денной пленки. Согласно [6] (таблица III - 1) порозность в углях составляет 0.07 - 0.18, а внутренняя поверхность $S_m \sim 70 - 180 \text{ м}^2/\text{г}$, т.е. величина $B = (1 - \beta) / \beta \rho_m S_m$ может достигать до 10^9 1/м . Из анализа внутреннего горения следует, что наиболее активно выгорание угля проходит в макропорах, что составляет $\approx 20\%$ от общего объема пор. Таким образом в процессе горения активно участвует не вся внутренняя поверхность, а ее эффективная часть. Оценка для крупных частиц кокса показала, что эта доля составляет $\chi \sim 4 \cdot 10^{-3}$ [6], тогда величина $\chi B \sim 4 \cdot 10^6$. Наличие такого значения в уравнениях (4) представляет некоторые сложности в получении результатов, поэтому в данной работе для определения качественных зависимостей система уравнений несколько упрощается с помощью отбрасывания в них скоростей u и v , что обеспечивает приемлемую точность. В [3] отмечается, что отбрасывание скорости в уравнениях приводит к ошибке $\approx 10\%$, что считается допустимым для подобных процессов. Учитывая, что величина χB может измениться в довольно широких пределах, поэтому рассмотрим несколько вариантов с различными значениями χB .

На рис. 1 ($\chi B = 10^4$) и 2 ($\chi B = 10^6$) показаны распределения концентраций по радиусу частицы и приведенной пленки. По оси абсцисс отложены величины

$$0 \leq n = \frac{r}{r_m} \leq 1 \text{ и } 1 \leq n = \frac{r - r_m}{r_\Delta - r_m} + 1 \leq 2, \text{ где } r_\Delta - \text{внешний радиус приведенной}$$

пленки, поэтому вся область изменения состоит из двух областей 0 - 1 - частица и 1 - 2 - внешняя область. В качестве параметров на бесконечности принимались значения $c_{N_2} = 0.79$, $c_{O_2} = 0.10$, $c_{CO_2} = 0.11$. $T_\infty = 1600 \text{ К}$.

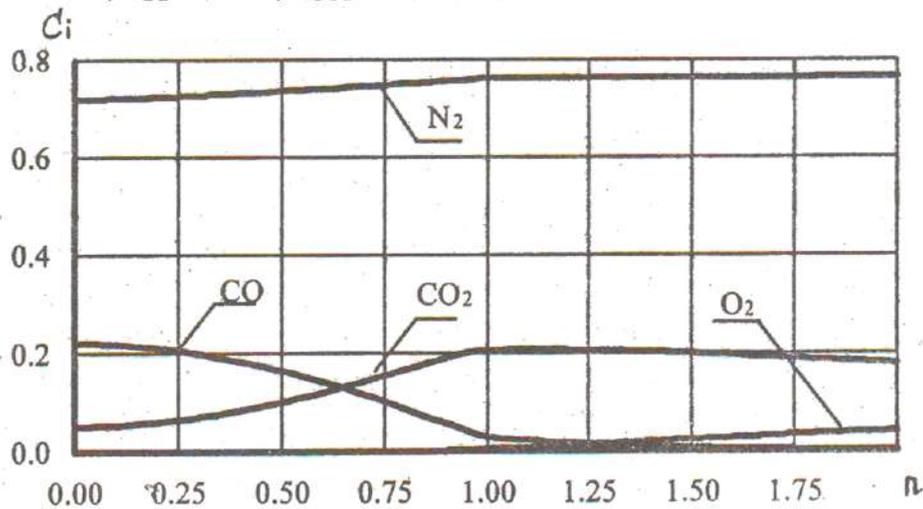


Рис. 1 - Изменение концентраций компонентов по радиусу при $\chi B = 10^4$

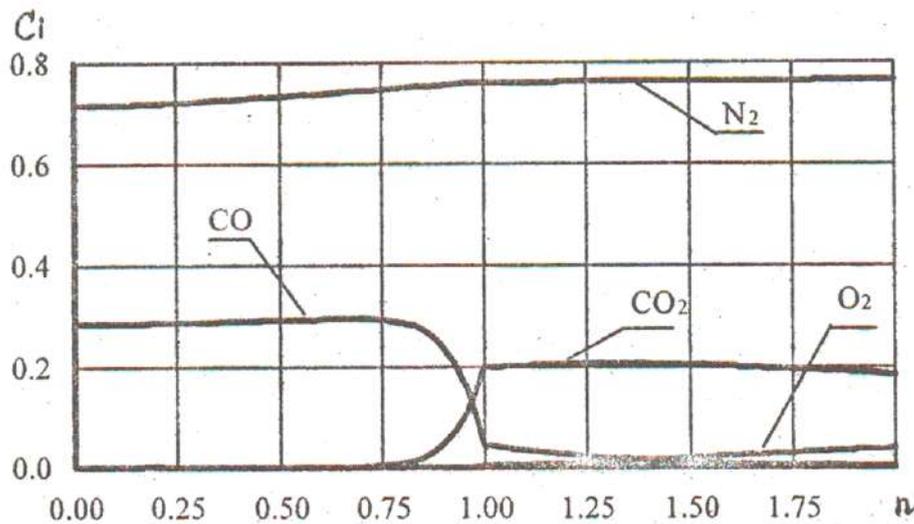


Рис. 2 - Изменение концентраций компонентов по радиусу при $\chi B = 10^6$

Из рисунков следует, что поровые каналы заполнены в основном азотом и окисью углерода. Это нейтральные для углерода компоненты, которые диффундируют внутрь канала. Химически активные компоненты также проникают вглубь частицы, но глубина распространения ограничивается адсорбцией их на поверхностях. При этом кислород, как более активный компонент проникает на значительно меньшие расстояния от входа в пору, чем двуокись углерода (в масштабе рисунка глубина проникания кислорода практически не видна). Кроме того, значительная часть его теряется на внешней поверхности частицы и в объеме приведенной пленки, где он реагирует с CO . Увеличение внутренней поверхности приводит к тому, что глубина проникания активных компонентов сокращается и ограничивается приповерхностной областью. Это хорошо видно на примере двуокиси углерода. Если в первом варианте CO_2 доходит до центра частицы, то во втором - его присутствие в порах сильно ограничено. Таким образом, при больших значениях внутренней поверхности процесс горения проходит в основном на внешней поверхности и в некотором тонком приповерхностном слое. В заключение следует отметить, что из-за наличия большой величины в уравнениях (4) результаты счета зависят от структуры конечно-разностной сетки. Известный в численных методах прием сгущения сетки возле поверхности позволяет получить значения температур частиц, близкие к экспериментальным значениям, выражаемых формулой [6]

$$\Delta T = 0.068(1900 - T_{\infty})^{0.74} d^{-0.16} O_2,$$

где $\Delta T = T_m - T_{\infty}$; d - диаметр частицы; O_2 - процентное содержание кислорода в газе. Для указанных выше компонентов смеси газов на бесконечности и $d=0,8$ мм эта величина составляет 145. Довольно близкое значение было получено и в расчетах. Однако заметная чувствительность от параметров сгущения не позволяет еще говорить о хорошем согласовании теории с экспериментом.

Она, скорее, указывает на возможность получения достаточно точных результатов, однако сам результат требует серьезной проверки, качественная же сторона процесса не противоречит известным закономерностям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хитрин А.В. Физика горения и взрыва. - М.: МГУ, 1957.
2. Канторович Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива. - М.: АН СССР, 1958.
3. Основы практической теории горения / Под ред. В.В. Померанцева. - Л.: Энергия, 1973.
4. Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. М.: Энергоатомиздат, 1986.
5. Вильямс Ф.А. Теория горения. - М.: Наука, 1973.
6. Оренбах М.С. Реакционная поверхность при гетерогенном горении. - Новосибирск, Наука, 1973.
7. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. Справочник / Под ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. - М.: Энергоатомиздат, 1988.

УДК 531.43:517.956.225

В.А. Страшко, В.В. Шумриков,
Д.Л. Васильев

О СВЯЗИ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

Встановлено зв'язок між внутрішнім тертям і коефіцієнтом Пуассона суцільного середовища і показано, що обидва ці параметри відбивають метричні властивості поля механічних напруг.

Необходимость рассмотрения такого рода связи продиктована весьма существенным влиянием внутреннего трения и коэффициента Пуассона сплошной среды на эффективность ее деформирования и разрушения, особенно при добыче полезных ископаемых механическими средствами.

Внутреннее трение по своей природе является физическим процессом, определяющим сопротивляемость среды деформированию и разрушению на всех структурных уровнях ее строения. Процесс трения, как правило, сопровождается изменением топографии поверхностей отдельных частей и структурных элементов среды, их характерных геометрических параметров, диссипацией энергии, изменением структуры и физико-механических свойств среды. Одним из основных параметров, раскрывающих суть протекания процессов трения, является угол внутреннего трения, с помощью которого устанавливаются фундаментальные соотношения между прочностными характеристиками, метрическими свойствами среды и внешними нагрузками.

Коэффициент Пуассона, так же, как и угол внутреннего трения, является параметром, определяющим наиболее общие формы проявления законов самоорганизации напряженно-деформированного состояния среды, сопротивляемости ее деформированию и разрушению в зависимости от природных свойств самой среды и вида внешней нагрузки.

Анализ работ, посвященных исследованиям внутреннего трения и коэффициента Пуассона различных материалов, показывает, что оба эти параметра по существу представляют собой две математические модели одного и того же физического явления, определяющего процесс деформирования и разрушения