

УДК 622.822

Син С.А., аспирант

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

Sin S.A., Candidate

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF SELF-IGNITION OF COAL

Способность угля взаимодействовать с кислородом может закончиться возникновением эндогенного пожара. Опыт показывает, что самовозгораются содержащие уголь породные отвалы [1-4]. Длительное хранение угля в штабелях также может закончиться пожаром [5-7]. Способы самовозгорания угля [9-12] позволили разработать различные способы борьбы с эндогенными пожарами. Так для предотвращения и локализации очагов самовозгорания использовалась пена [13]. Проводятся исследования влияния азота на процесс самовозгорания [14-16]. Реструктуризация угольной отрасли и совершенствование практики борьбы с самовозгоранием привели к снижению количества эндогенных пожаров на угольных предприятиях [17].

Существенно упрощает исследования процесса самовозгорания математическое моделирование. Описать процесс самовозгорания можно следующей системой уравнений, учитывающих одномерное фильтрационное движение газа в угольной насыпке:

$$\frac{\partial(\gamma\rho)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\gamma\rho V) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\gamma\rho V)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\gamma\left(\rho V^2 + p\right)\right) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial V}{\partial x}\right) - \left(\frac{\mu}{a} + \frac{C_2\rho}{2}|V|\right) \cdot V \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\gamma\rho_B Y_0)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\gamma\rho_B Y_0 V) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\gamma\rho_B D \frac{\partial Y_0}{\partial x}\right) - \gamma\rho_B u_0 \rho_y \cdot X_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3)$$

$$(\gamma\rho_B c_B + (1-\gamma)\rho_y c_y) \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}((\rho_B c_B T + p)V) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x}\right) + u_0 \rho_y Q \cdot X_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4.)$$

$$p = \rho \cdot RT, \quad (5)$$

где t - время, с; x - координата вдоль угольной насыпки, м; ρ – плотность, кг/м³; V - фильтрационная скорость, м/с; γ -объёмная доля пустот; μ - коэффициент динамической вязкости газа, Па·с; C_2 - коэффициент внутреннего сопротивления, 1/м; a - проницаемость, м² ; T - температура, К; ρ_B, ρ_Y - плотность воздуха и угольной частицы, соответственно, кг/м³; c_∞, c_y - удельная теплоемкость воздуха и угля, соответственно, Дж/(кг·К); u_0 - удельная скорость сорбции кислорода углем, м³/(кг·с); λ_{eff} - эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); Q , - теплота сорбции кислорода углем, Дж/м³; X_0 - мольная доля кислорода; E - энергия активации, Дж/моль; R - универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·град); λ_B, λ_Y - эффективный коэффициент теплопроводности воздуха и угольной частицы, соответственно, Вт/(м·К); Y_0, Y_N - массовая доля кислорода и азота, соответственно; D - коэффициент диффузии, м²/с.

Система пяти уравнений (1)- (5) позволяет определить неизвестные ρ, V, Y_0, T, p . Для расчета системы уравнений необходимо дополнить следующими начальными и граничными условиями:

$$\text{при } t=0 \text{ и } x>0: \quad \rho = \rho_B, \quad V=V_0, \quad Y_0=Y_0, \quad T=T_0. \quad (6)$$

$$\text{при } x=0 \text{ и } t>0: \quad \rho = \rho_B, \quad V=V_0, \quad Y_0=Y_0, \quad T=T_0. \quad (7)$$

$$\text{при } t>0: \quad \frac{\partial Y_0}{\partial x} \Big|_{x=L}=0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L}=0, \quad \frac{\partial V}{\partial x} \Big|_{x=L}=0, \quad \frac{\partial \rho}{\partial x} \Big|_{x=L}=0. \quad (8)$$

Система уравнений решалась численным методом с использованием стандартного пакета FLUENT. Концентрация кислорода в азоте на входе в скопление изменялась в пределах от 1 % до 21 % (1%, 3%, 5%, 10%, 15%, 21%). Скорость фильтрации равна 0, 001 м/с и 0,002 м/с. Частицы угля и пыли приняты сферическими со средним диаметром соответственно 0,002 и 0.0003 м. Удельные скорости сорбции кислорода углем и пылью равны $1,96 \cdot 10^{-7}$ и $4,9 \cdot 10^{-7}$ м³/(кг·с). Теплота сорбции – 12,5 МДж/м³.

Начальная температура газа, угля и пыли 285 К. Энергия активации 30000 Дж/моль. Объёмная доля пустот принята 0,476 и 0,259. Плотность угля и пыли – 800 кг/м³. Коэффициент теплопроводности равен 0,07 Вт/(м·К), а теплоёмкость – 1,05 Дж/(кг·К). Размер скопления 0,1 м. Шаг по времени принят равным 60 мин.

Изменение скорости разогрева угля в зависимости от концентрации кислорода в фильтрующемся газе приведена на рис. 1. Из результатов решения уравнений следует, что с увеличением концентрации кислорода в газе скорость разогрева угольного скопления возрастает. Причем увеличение скорости газа с 0,001 м/с до 0,002 м/с замедляет разогрев из-за выноса тепла потоком газа.

На рис.2 приведено изменение скорости разогрева угольной пыли в зависимости от концентрации кислорода в газе. Видно, что скорость разогрева угольной пыли намного больше, чем у скопления угля.

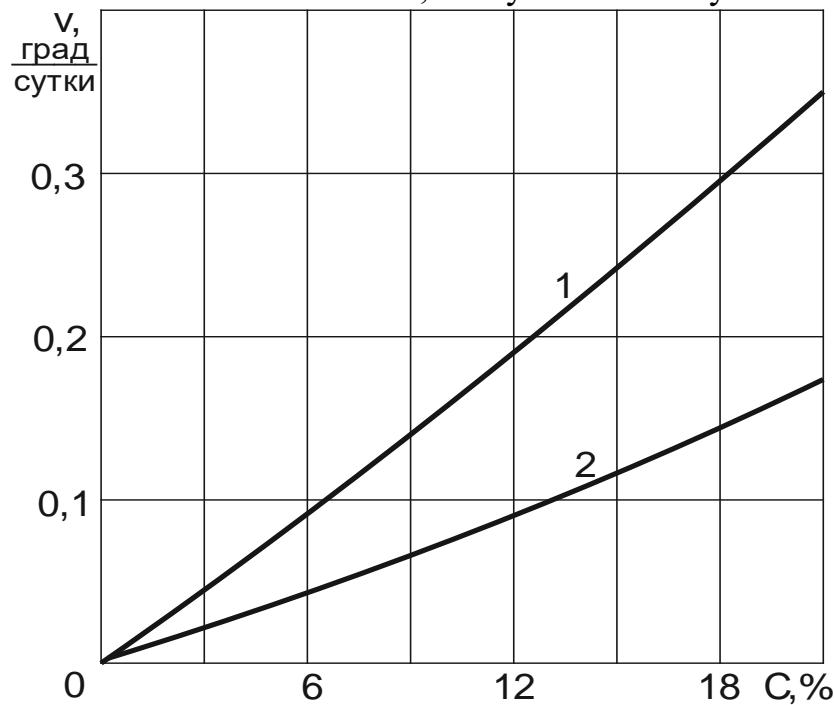


Рис. 1. Изменение скорости разогрева угля в зависимости от концентрации кислорода в газе: 1 – скорость газа 0,001 м/с; 2 – скорость газа 0,002 м/с

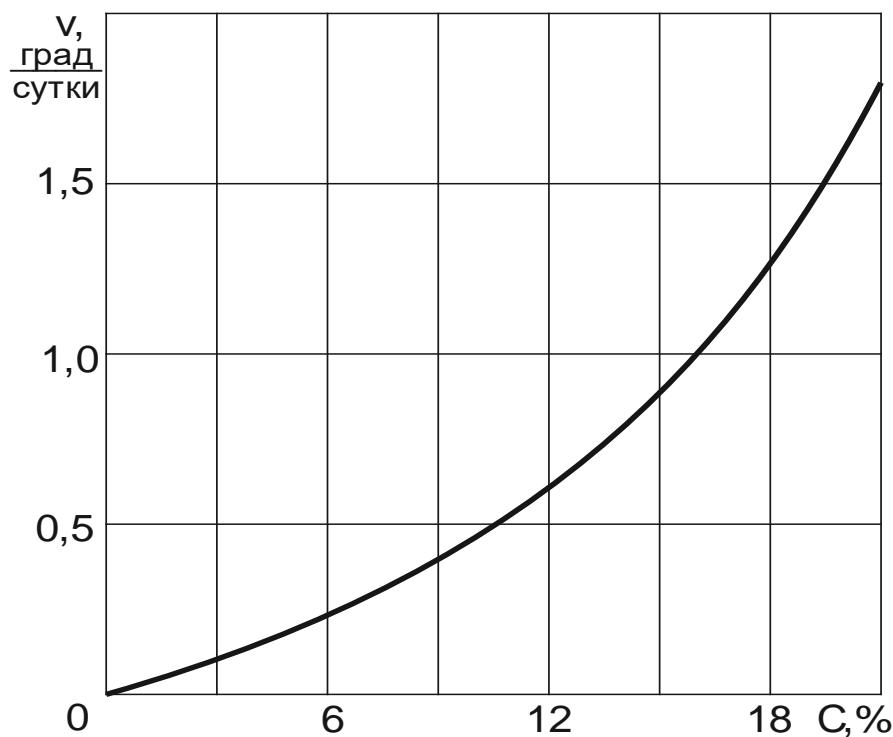


Рис. 2. Изменение скорости разогрева угольной пыли в зависимости от концентрации кислорода в газе

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что предотвратить возникновение очагов самовозгорания можно не только снижением концентрации кислорода, но и увеличением скорости фильтрации газа через угольное скопление.

Список литературы:

1. Портола В.А., Скударнов Д.Е., Протасов С.И., Подображен С.Н. Оценка параметров очагов самовозгорания породных отвалов угольных карьеров и способов их тушения. Безопасность труда в промышленности. – 2017. – № 11. – С. 42–47.
2. Проблемы и пути снижения пожароопасности при добыче угля открытым способом / В.А. Портола, С.И. Протасов, С.Н. Подображен // Безопасность труда в промышленности. – 2004, № 11. – С.41-43.
3. Портола В.А., Бобровникова А.А., Протасов С.И., Серегин Е.А., Еременко А.А. Оценка склонности к самовозгоранию и газовыделения углесодержащих пород отвалов и шламов угольных предприятий. Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 3. – С. 74–80.
4. Протасов С.И., Серегин Е.А., Портола В.А., Бобровникова А.А. Исследование очагов эндогенных пожаров на породных отвалах угольных предприятий// Безопасность труда в промышленности. — 2021 — № 8 — С. 65–70.
5. Портола В.А., Жданов А.Н., Бобровникова А.А. Перспектива применения антипирогенов для предотвращения самовозгорания складов угля. Уголь. – 2019. – № 4. – С. 14-19.
6. Ютяев Е.П., Портола В.А., Мешков А.А., Харитонов И.Л., Жданов А.Н. Развитие процесса самонагревания в скоплениях угля под действием молекулярной диффузии кислорода. Уголь. – 2018. – № 10 (1111). – С. 42–46.
7. Портола В. А., Жданов А. Н., Бобровникова А. А. Исследование процесса самовозгорания в штабеле угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10. – С. 155–162.
8. Портола В.А., Бобровникова А.А., Палеев Д.Ю., Еременко А.А., Шапошник Ю.Н. Исследование скорости сорбции кислорода самовозгорающимися сульфидными рудами. Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 1. – С. 57–62.
9. Портола В.А. Опасность самовозгорания угольной пыли. Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 6. – С. 36–39.
10. Portola V.A. Assessment of the effect of some factors on spontaneous coal combustion. Journal of Mining Science. 1996. 32(6). P. 536-541.
11. Portola V.A. Gas anomalies above underground gas sources. Journal of Mining Science. 1996. 32(3). P. 212-218.

12. Portola, V. Detection and location of places of spontaneous combustion of coal in mines due to gas anomalies on the earth's surface // V. Portola, A. Bobrovnikova, G. Shirokolobov, D. Paleev // E3S Web Conf., Vth International Innovative Mining Symposium, 174, 01061 (2020), P. 1-7.
13. Игишев В.Г., Портола В.А. Оценка параметров пены, необходимых для тушения очагов самовозгорания // ФТПРПИ. – 1993. - № 4. - С. 74-78.
14. Син С.А., Портола В.А., Игишев В.Г. Повышение эффективности применения азота для борьбы с самовозгоранием угля в шахтах. Уголь. – 2018. – № 5. – С. 51–57.
15. Син С.А., Портола В.А., Игишев В.Г. Повышение безопасности и эффективности использования азота для борьбы с самовозгоранием угля в выработанном пространстве шахт. Уголь. – 2019. – № 2. – С. 11–14.
16. Портола В.А., Галсанов Н.Л. Повышение эффективности применения азота для подавления самовозгорания угля. Вестник КузГТУ. – 2011 г. № 5. – С. 59-63.
17. Портола В. А., Овчинников А. Е., Жданов А. Н. Оценка мер по предупреждению эндогенных пожаров в угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 12. – С. 205–214.

References

1. Portola V.A., Skudarnov D.E., Protasov S.I., Podobrazhin S.N. Assessment of the parameters of self-ignition of rock dumps in coal mines and methods of extinguishing them. Labor safety in industry. - 2017. - № 11. - C. 42-47.
2. Problems and ways to reduce the fire hazard in coal mining by open pit / V.A. Portola, S.I. Protasov, S.N. Podobrazhin // Labor Safety in Industry. - 2004, № 11. - C.41-43.
3. Portola V.A., Bobrovnikova A.A., Protasov S.I., Seregin E.A., Eremenko A.A. Assessment of the tendency to self-ignition and gas release of coal-bearing rocks of waste dumps and slimes of coal enterprises. Labor Safety in Industry. - 2021. - № 3. - C. 74-80.
4. Protasov S.I., Seregin E.A., Portola V.A., Bobrovnikova A.A. Study of endogenous fires in the rock dumps of coal enterprises // Safety of Work in Industry. - 2021 - № 8 - C. 65-70.
5. Portola V.A., Zhdanov A.N., Bobrovnikova A.A. Prospect of Application of Antipyrogens to Prevent Self-Inflammation of Coal Stockpiles. Coal. - 2019. - № 4. - C. 14-19.
6. Yutyaev E.P., Portola V.A., Meshkov A.A., Kharitonov I.L., Zhdanov A.N. Development of the self-heating process in coal clusters under the influence of molecular oxygen diffusion. Coal. - 2018. - № 10 (1111). - C. 42-46.

7. Portola VA, Zhdanov AN, Bobrovnikova AA Study of spontaneous combustion in the coal stack // Mountain Information and Analytical Bulletin. - 2020. - № 10. - C. 155-162.
8. Portola V.A., Bobrovnikova A.A., Paleev D.Y., Eremenko A.A., Shaposhnik Yu.N. Study of the rate of oxygen sorption by self-ignited sulfide ores. Labor Safety in Industry. - 2020. - № 1. - C. 57-62.
9. Portola V.A. Danger of self-ignition of coal dust. Labor safety in industry. - 2015. - № 6. - C. 36-39.
10. Portola V.A. Assessment of the effect of some factors on spontaneous coal combustion. Journal of Mining Science. 1996. 32(6). P. 536-541.
11. Portola V.A. Gas anomalies above underground gas sources. Journal of Mining Science. 1996. 32(3). P. 212-218.
12. Portola, V. Detection and location of places of spontaneous combustion of coal in mines due to gas anomalies on the earth's surface // V. Portola, A. Bobrovnikova, G. Shirokolobov, D. Paleev // E3S Web Conf., Vth International Innovative Mining Symposium, 174, 01061 (2020), P. 1-7.
13. Igishev V.G., Portola V.A. Estimation of foam parameters required for extinguishing self-ignition sources // FTPRPI. - 1993. - № 4. - C. 74-78.
14. Sin S.A., Portola V.A., Igithev V.G. Increasing the effectiveness of nitrogen application to combat spontaneous combustion of coal in mines. Coal. - 2018. - № 5. - C. 51-57.
15. Sin S.A., Portola V.A., Igithev V.G. Improvement of safety and efficiency of nitrogen use to combat spontaneous combustion of coal in the mined-out space of mines. Coal. - 2019. - № 2. - C. 11-14.
16. Portola V.A., Galsanov N.L. Increasing the efficiency of nitrogen application for suppressing spontaneous combustion of coal. Bulletin of the Kuz-STU. - 2011 г. № 5. - C. 59-63.
17. Portola VA, Ovchinnikov AE, Zhdanov AN Assessment of measures to prevent endogenous fires in coal mines // Mining Information and Analytical Bulletin. - 2019. - № 12. - C. 205-214.