

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]. Способны самовозгораться и сульфидные руды [8]. Исследование процесса 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:

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

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

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

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

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

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_v, 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 систему уравнений необходимо дополнить следующими начальными и граничными условиями:

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

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

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

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.

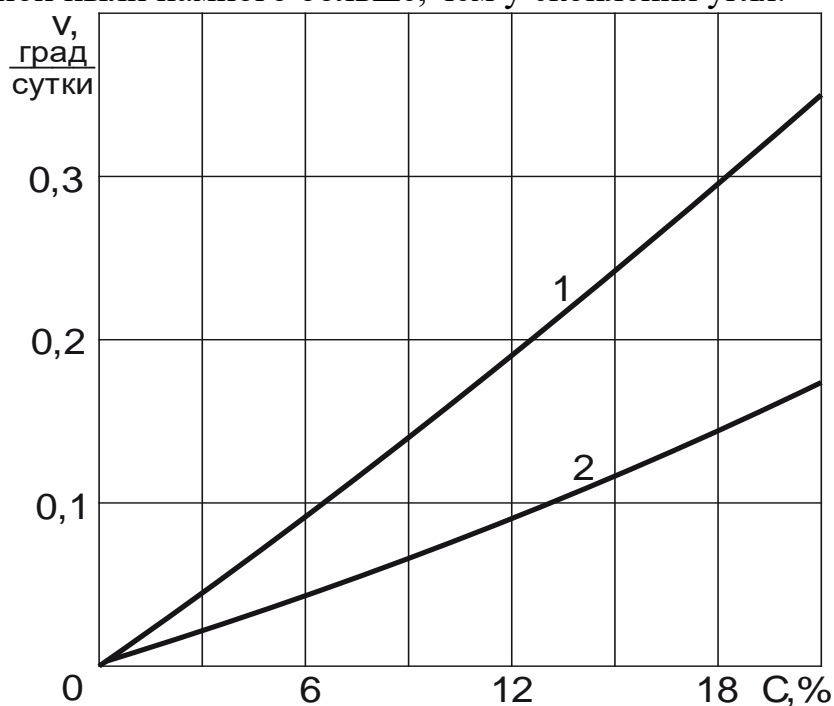


Рис. 1. Изменение скорости разогрева угля в зависимости от концентрации кислорода в газе: 1 – скорость газа 0,001 м/с; 2 – скорость газа 0,002 м/с

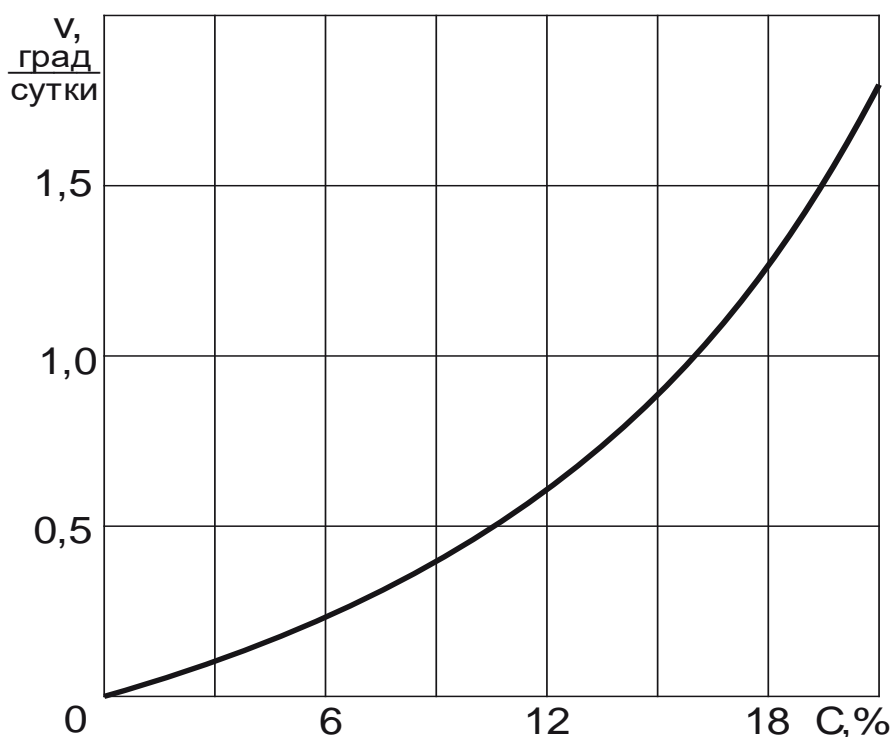


Рис. 2. Изменение скорости разогрева угольной пыли в зависимости от концентрации кислорода в газе

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., Подображин 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. Подображин //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. - С. 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. - С.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. - С. 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 - С. 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. - С. 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). - С. 42-46.

7. Portola VA, Zhdanov AN, Bobrovnikova AA Study of spontaneous combustion in the coal stack // Mountain Information and Analytical Bulletin. - 2020. - № 10. - С. 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. - С. 57-62.
9. Portola V.A. Danger of self-ignition of coal dust. Labor safety in industry. - 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. Igishev V.G., Portola V.A. Estimation of foam parameters required for extinguishing self-ignition sources // FTPRPI. - 1993. - № 4. - С. 74-78.
14. Sin S.A., Portola V.A., Igishev V.G. Increasing the effectiveness of nitrogen application to combat spontaneous combustion of coal in mines. Coal. - 2018. - № 5. - С. 51-57.
15. Sin S.A., Portola V.A., Igishev 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. - С. 11-14.
16. Portola V.A., Galsanov N.L. Increasing the efficiency of nitrogen application for suppressing spontaneous combustion of coal. Bulletin of the KuzSTU. - 2011 г. № 5. - С. 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. - С. 205-214.