

**УДК 606 / 622.8**

Тайлаков А.А., преподаватель Инженерной школы «УникУм»  
Кемерово.  
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.  
Горбачева

Taylakov A.A., teacher at the Kemerovo school of engineer “UnikUm”  
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

**ВКЛАД ПИРИТ-ОКИСЛЯЮЩИХ И МЕТАНОГЕННЫХ  
БАКТЕРИАЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ В ВЫДЕЛЕНИЕ ТЕПЛА И  
ВЫХОД МЕТАНА ИЗ УГЛЯ**

**CONTRIBUTION OF PYRITE-OXIDIZING AND  
METHANOGENIC BACTERIAL COMMUNITIES TO HEAT  
GENERATION AND METHANE RELEASE FROM COAL**

Метан в угольных шахтах представляет угрозу для промышленной безопасности [1]. Этот газ может образовываться двумя путями – геотермическим и биогенным. Термогенный метан возникает при термическом разложении угля при высоких температурах и давлениях, тогда как биогенный продуцируется анаэробными археями, расщепляющими органику в угле [2].

Биогенный метан идентифицируется путем изотопного анализа. У микробного метана повышенное количество углерода с изотопом  $^{12}\text{C}$ , в то время как термогенный метан содержит больше углерода  $^{13}\text{C}$  [3].

В пласте действуют сложные микробные сообщества, превращающие высокомолекулярные углеродсодержащие компоненты угля в метан. Классические метаногены потребляют ацетат или  $\text{H}_2/\text{CO}_2$ , но для разложения твёрдого угля необходимы деградирующие бактерии и грибки, обрабатывающие полимеры угля до более простых соединений [2].

Недавние исследования выявили уникальные термофильные метаногены, способные превращать ароматические компоненты угля напрямую в метан [4, 5].

Эти данные указывают, что биогенный метан существенно дополняет термогенный, помимо всего прочего в обнаруженных микробных сообществах найдены бактерии, способные повышать температуру изолированного пористого участка пласта путем разложения пирит содержащей фракции угля.

В ходе этого окислительного метаболизма бактерии выделяют значительное количество тепла, поскольку реакции окисления пирита экзотермичны.

Кроме того, повышение температуры стимулирует десорбцию газов, в частности, метана из угольной породы, усиливая выделение горючего газа.

В связи с данной информацией, целью исследования является дополнение уравнения газового баланса, которое позволит повысить точность прогнозирования эмиссии метана в выдержанных участках пласта. Для реализации поставленной цели необходимо построение математической модели, способной выполнять предиктивный анализ синтеза биогенного метана и повышения десорбции метана в связи с жизнедеятельностью термогенных бактерий.

Кинетика биометаногенеза описывается уравнением Гомперца (1).

$$G(t) = G_0 \exp \left[ -\exp \left( \frac{R_{\max}}{G_0} (\lambda - t) + 1 \right) \right] \quad (1)$$

где  $G_0$  – общий выход метана,  $\text{мл} \cdot \text{г}^{-1}$ ;  $R_{\max}$  – максимальный суточный выход метана,  $\text{мл} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ ;  $\lambda$  – лаг-фаза, сут.;  $t$  – время анаэробного сбраживания, сут.

Микробное окисление пирита бактериями *Acidithiobacillus ferrooxidans* и родственными термофильными формами описывается скоростью реакции первого порядка (2).

$$r_{ox}(t) = r_{ox,max} \cdot O_{sat}(t) \cdot \frac{[FeS_2]}{K_{FeS_2} + [FeS_2]} \quad (2)$$

где  $r_{ox}(t)$  – скорость окисления пирита,  $\text{г} \cdot \text{сут}^{-1}$ ;  $r_{ox,max}$  – максимальная скорость окисления при насыщении кислородом;  $[FeS_2]$  – концентрация пирита в породе,  $\text{г} \cdot \text{г}^{-1}$ ;  $K_{FeS_2}$  – константа полунасыщения пиритом  $O_{sat}(t)$  – степень насыщения шахтного участка кислородом и влагой.

Тепловыделение от микробного окисления пирита описывается балансом энергии (3):

$$C_{th} \frac{dT}{dt} = f_{heat} \Delta G_{rxn} r_{ox}(t) - k_{loss} (T - T_{env}) \quad (3)$$

где  $C_{th}$  – теплоёмкость системы,  $\text{Дж} \cdot \text{°C}^{-1}$ ;  $f_{heat}$  – доля тепла, переходящая в породу (0–1);  $\Delta G_{rxn}$  – удельная энергия реакции окисления пирита,  $\text{Дж} \cdot \text{г}^{-1}$ ;  $k_{loss}$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Дж} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ ;  $T_{env}$  – температура окружающей среды,  $\text{°C}$ .

С применением моделей (1,2,3) выполнена оценка динамики метаногенеза в шахтной атмосфере (рисунок 1).

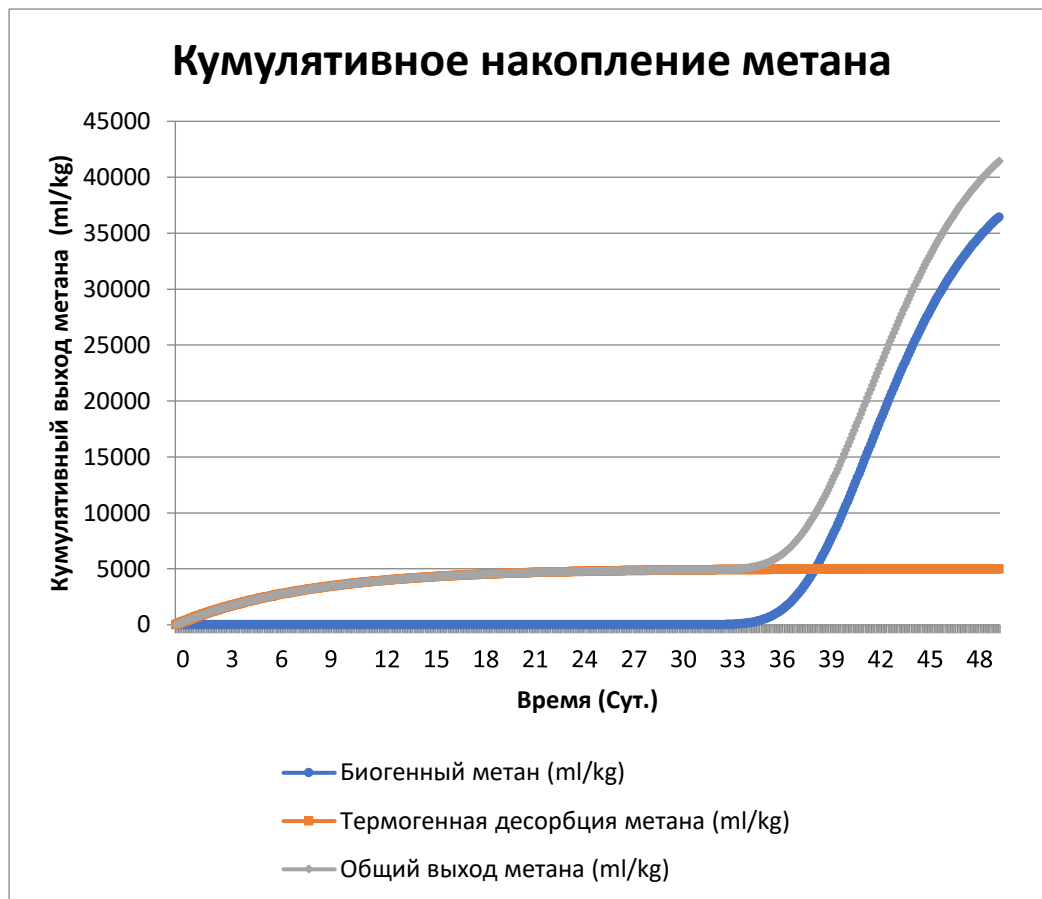


Рис.1

На графике (Рис.1) показаны три кумулятивные кривые. Срок симуляции составляет 50 дней, в ранней фазе первые  $\approx 0$ –30 дней вклад десорбции доминирует. Кумулятивная десорбция, вызванная микробным нагревом, даёт ранний вклад в суммарный выход  $\text{CH}_4$ , что является быстрым, но ограниченным всплеском, который обусловлен запасом адсорбированного газа. На  $\sim 36$  сутки биогенная кривая Гомпертца разгоняется и становится доминирующим источником метана.

Микробная лаг-фаза, которая начинается спустя 30 суток, сопровождается быстрым ростом бактериальной популяции и биометаногенезом. Данная фаза пересекает линию термогенной десорбции, становясь ведущим вкладом в суммарный выход.

Представленная модель является обобщённой с такими упрощениями, как пространственно-однородный объём, простая модель для активности пирит-окисляющих бактерий, демонстрирующая логистоподобный рост на графике, усреднённый коэффициент превращения химической энергии в тепло  $f_{heat}$ , а также первый порядок десорбции.

Данные допущения необходимы для получения легко настраиваемой модели, которая может служить основой обучающих алгоритмов для предиктивных нейросетей.

#### Список литературы.

1. Wang Z, Wang X. Promotion effects of microwave heating on coalbed methane desorption compared with conductive heating. *Sci Rep.* 2021;11(1):9618. Published 2021 May 5.

2. Iram, A., Akhtar, K. & Ghauri, M.A. Coal methanogenesis: a review of the need of complex microbial consortia and culture conditions for the effective bioconversion of coal into methane. *Ann Microbiol* **67**, 275–286 (2017).

3. Тайлаков О.В. // Определение источников газовыделения в атмосферу выемочного участка на основе измерений изотопного состава углерода метана // Тайлаков О.В., Макеев М.П., Герасимов А.В., Коровин Д.С. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 5 (123). С. 73-79.

4. M. K. Lloyd, E. Trembath-Reichert, K. S. Dawson, J. Feakins, M. Mastalerz, V. J. Orphan, L. Sessions, J. M. Eiler. Methoxyl stable isotopic constraints on the origins and limits of coal-bed methane // *Science*. 2021.

5. Mayumi D, Mochimaru H, Tamaki H, Yamamoto K, Yoshioka H, Suzuki Y, Kamagata Y, Sakata S. Methane production from coal by a single methanogen. *Science*. 2016 Oct 14;354(6309):222-225.