

УДК 622.324.5

## ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ УГОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАК КОЛЛЕКТОРА МЕТАНА

Смирнова А.Д., научный сотрудник НИЛ ЦТМСК,  
аспирант группы ГМа-211, IV курс  
Журавлев Д.М., техник НИЛ ЦТМСК, студент гр. ПГС-201, V курс  
Научный руководитель: Михайлова Т.В., к.т.н., доцент,  
заведующий кафедрой маркшейдерского дела и геологии  
Кузбасский Государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева  
г. Кемерово

Уголь сохраняет статус стратегического энергоресурса, обеспечивая до 35 % мирового производства электроэнергии (рисунок 1) [1]. Освоение угольных месторождений сопряжено с рисками взрывов и выбросов метана – газа, аккумулированного в угольных пластах, который не только усложняет ведение подземных горных работ, но и представляет значительную экологическую угрозу. Метан угольных пластов (МУП) является ценным попутным полезным ископаемым вследствие своего энергетического потенциала, полезное использование которого перспективно с точки зрения снижения углеродного следа отрасли. В условиях глобального тренда на декарбонизацию и растущего спроса на уголь, комплексное освоение месторождений с извлечением МУП становится важным элементом стратегии устойчивого развития. Это требует пересмотра традиционных подходов к планированию и ведению горных работ в сторону внедрения ресурсо- и энергосберегающих технологий.

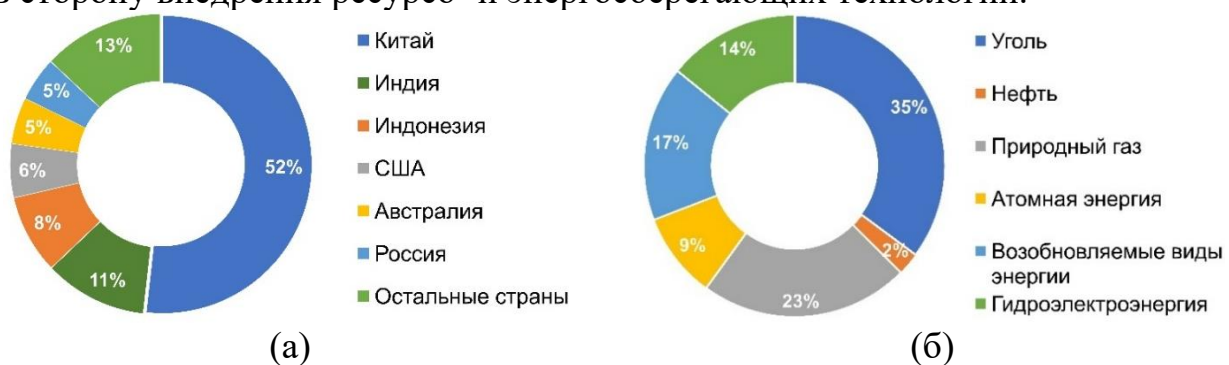


Рисунок 1. Статистические данные по мировой добыче угля и потреблению электроэнергии в 2023 году: а – доли стран в объемах добычи угля в мире; б – доли мирового потребления электроэнергии

В Кузбассе, как правило, преобладает текущая дегазация разгруженного массива из горных выработок [2]. Вследствие малых объемов и низкой концентрации в качестве способов утилизации метана применяется либо прямой выброс разбавленного метана вентиляционных струй в атмосферу, либо сжигание

метана на факельных установках. Очевидно, что подобные способы, помимо низкой экономической эффективности, противоречат глобальным трендам полезного использования метана, например, практикам торговли эмиссионными квотами, развивающимися в США, Китае и Австралии.

Заблаговременная дегазация, предусматривающая бурение скважин с поверхности до начала горных работ на этапе проектирования шахтных полей, позволяет не только существенно снизить метаноносность угольных пластов и минимизировать риски газодинамических явлений, но и извлекать сорбированный газ с концентрацией  $\text{CH}_4$  98 % [3]. Высокие концентрации предопределяют полезное использование газа в качестве энергоресурса для локального обеспечения потребностей в тепловой и электрической энергии угледобывающего предприятия, для производства химических продуктов или, как было сказано ранее, для формирования и продажи эмиссионных квот [4].

Однако, в настоящее время актуальной проблемой при освоении угольных месторождений остается отсутствие методик определения зон повышенной газоотдачи [5], сочетающих высокую газоносность, проницаемость коллектора и благоприятные геомеханические условия. На слабаразведанных участках эта проблема усугубляется дефицитом исходных данных, что существенно ограничивает точность прогнозирования оптимальных мест для бурения. Решение лежит в разработке цифрового двойника угольного месторождения как коллектора метана, что соответствует современным требованиям цифровой трансформации предприятий минерально-сырьевого комплекса [6].

Поэтому целью исследования служит определение особенностей этого процесса на основе применения технологий геоинформационного анализа больших массивов данных. В исследовании рассмотрены взаимодополняющие цифровые модели, а именно литолого-структурная (геологическая), геомеханическая и газодинамическая, которые обеспечивают комплексный учет горно-геологических факторов и анализ их влияния на эффективность дегазации угольных пластов.

Литолого-структурная модель представляет собой трехмерную цифровую реконструкцию геологического строения участка, отражающую распределение литотипов, стратиграфические границы и тектонические нарушения. На слабаразведанных участках модель компенсирует недостаточное количество данных методами геостатистической интерполяции, что позволяет визуализировать пространственную изменчивость свойств угольных пластов и вмещающих пород. Помимо использования при подсчете запасов, эта модель формирует основу для дальнейшего построения цифрового двойника, обеспечивая связь между геологическими особенностями участка, геомеханическим состоянием массива и фильтрационно-емкостными свойствами коллектора.

Геомеханическое моделирование позволяет прогнозировать и количественно оценивать напряженно-деформированное состояние (НДС) углепородного массива, а также пространственное распределение его физико-механических свойств [7]. Геомеханические модели позволяют выделять зоны по-

вышенной фильтрации, где направление векторов и амплитуды главных компонент тензора напряжений способствуют образованию трещин и влияют на степень их раскрытия [8]. Трещины, в свою очередь, выполняют функцию проводящих каналов в угольном пласте, способствуя эффективной миграции метана [9].

Существует три основных типа геомеханических моделей, используемых в зависимости от сложности задачи и доступных данных (рисунок 2). Одномерные и двухмерные модели применяются для локальной оценки НДС и выявления зон концентрации напряжений в виде графиков или изолиний в плоскости и разрезе [10]. Трехмерные геомеханические модели, интегрируя данные о литологии, тектонике и трещиноватости, позволяют детально охарактеризовать участок угольного месторождения. Это позволяет выделять зоны высокой фильтрации и обосновать направленность бурения скважин заблаговременной дегазации.

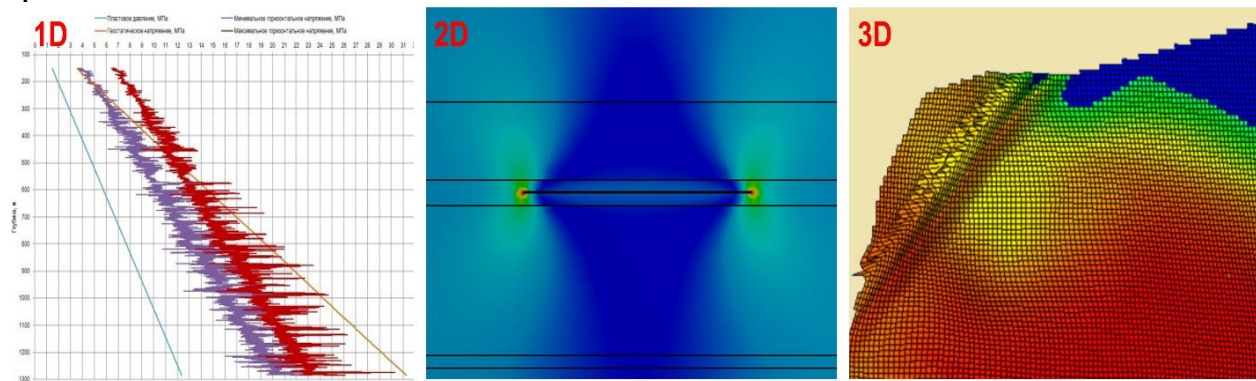


Рисунок 2. Виды геомеханических моделей

Газодинамическая модель предназначена для количественной оценки процессов десорбции, миграции и аккумуляции метана в углепородном массиве с учетом газоносности и проницаемости. Ее ключевая цель – прогнозирование пространственного распределения свободного и сорбированного метана, а также динамики его выделения при изменении давления и температуры в процессе дегазации. Интеграция газодинамической модели с литолого-структурной и геомеханической моделями позволяет учитывать комплексное влияние горно-геологических факторов на проницаемость и выделять зоны высокой аккумуляции метана.

Таким образом, цифровой двойник угольного месторождения как коллектора метана представляет собой интегрированную систему моделей, позволяющую определить зоны повышенной фильтрации и высокометаносные области. Такой подход, сочетающий методы математического моделирования и комплексный анализ горно-геологических факторов, обеспечивает научную основу для принятия решений по выбору мест заложения и направленности бурения скважин заблаговременной дегазации. Внедрение современных технологий геоинформационного анализа больших массивов данных в практику горных предприятий позволит повысить объемы извлекаемого метана и снизить

экологические риски за счет рационального управления ресурсами в рамках глобальных трендов декарбонизации и цифровой трансформации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075–03-2024-082-2).

### Список литературы:

1. Statistical review of world energy – 2024 edition. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.energyinst.org/statistical-review> (дата обращения: 25.12.2024).
2. Золотых С.С. Заблаговременная дегазация угольных пластов как фактор повышения безопасности на шахтах Кузбасса / С.С. Золотых // Горная промышленность. – 2019. – Т. 18. – № 5. – С. 18-22. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-05-18-22.
3. Thakur P. Chapter 8 – Coal Seam Degasification / P. Thakur // Coal Bed Methane: From Prospect to Pipeline (1st ed.). – San Diego, CA, USA: Elsevier, 2014. – P. 155-175.
4. Amez I. Potential of CBM as an Energy Vector in Active Mines and Abandoned Mines in Russia and Europe / I. Amez, D. Leon, A. Ivannikov, K. Kolikov, B. Castells // Energies. – 2023. – Vol. 16. – № 3. – P. 1196. DOI: 10.3390/en16031196.
5. Логинов А.К. Заблаговременная дегазация угольных пластов и добыча метана угольных пластов. Проблемы и перспективы развития / А.К. Логинов, А.А. Мешков, Е.В. Мазаник, К.С. Коликов, Н.Д. Вержанская // Уголь. – 2024. – Т. 1185. – № 10. – С. 62-67. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-10-62-67.
6. Немова Н.А. О моделировании геомеханических процессов на месторождениях в условиях цифровой трансформации горнодобывающих предприятий / Н.А. Немова, А.В. Резник, В.Н. Карпов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – Т. 2. – № 3. – С. 332-341. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-3-332-341.
7. Шевцов А.Г. Определение физико-механических свойств угля по результатам исследований керна для решения задач геомеханики при добыче метана угольных пластов / А.Г. Шевцов // Вести газовой науки. – 2023. – Т. 54. – № 2. – С. 55-58.
8. Захаров В.Н. Зависимость проницаемости угольного пласта от газосодержания и действующих напряжений / В.Н. Захаров, О.Н. Малинникова, В.А. Трофимов, Ю.А. Филиппов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – Т. 52. – № 2. – С. 218-225.
9. Смирнова А.Д. Анализ распределения проницаемости угольных пластов Южной части Тутуянской площади Кузбасса / А.Д. Смирнова, А.Г. Шевцов, Ш. Чэнь // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. – № 4. – С. 657-665. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-657-665.
10. Шевцов А.Г. Подготовка одномерных геомеханических моделей метаноугольных месторождений в условиях недостаточности исходных данных / А.Г. Шевцов, А.С. Попков, А.Д. Смирнова // Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность. Материалы XI Молодежной международной научно-

практической конференции. – Видное, п. Развилка: ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий - Газпром ВНИИ-ГАЗ», 2023. – С. 11.