

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЖАРООПАСНОСТИ УГЛЕЙ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРМОГРАВИМЕТРИИ

О.В. Скопинцева¹, А.А. Рыбичев¹, С.В. Баловцев¹

¹ Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия, e-mail: rybichev@yandex.ru

Аннотация: Рассмотрены результаты термогравиметрического анализа образцов угля марок Ж, ГЖ, А. Потеря массы образца угля марок Ж, ГЖ при термогравиметрическом анализе имеет ступенчатый характер. Потеря массы образца угля марки А при термогравиметрическом анализе имеет плавный, монотонный характер. Для всех исследованных углей марок Ж, ГЖ, А первичная потеря массы около 4% происходит при температуре около 350–370 °С и связана с испарением внешней и гигроскопической влаги. Вторая потеря массы для углей марок Ж, ГЖ имеет две ступени в диапазоне температур около 350–660 °С и 700–870 °С. Первый пик (479,95 °С) связан с эндотермическими процессами, второй (772,32 °С) – с экзотермическими процессами. Всего на двух ступенях происходит потеря массы порядка 30%, в том числе – на первой ступени около 16%, на второй – около 14%. Вторая потеря массы, связанная с десорбцией углеводородов, для угля марки ГЖ в 1,6 раза больше, чем для угля марки Ж, что соответствует соотношению по выходу летучих веществ из углей этих марок. Вторая потеря массы для угля марки А составляет 2%, что от 8 до 13 раз меньше потери массы для углей марок Ж и ГЖ. Третья потеря массы образцов угля в диапазоне температур от 660 до 870 °С для угля марки Ж в 3,5 раза больше, чем для угля марки ГЖ, что объясняется превышением зольности угля марки ГЖ в 4,6 раз по сравнению с углем марки Ж. Самая маленькая потеря массы в диапазоне температур от 100 до 1200 °С наблюдается в углях марки А, составляя 2%, что от 2 до 7 раз меньше по сравнению с марками ГЖ и Ж. Из исследованных образцов угля наиболее взрывопожароопасен образец угля марки ГЖ.

Ключевые слова: взрывоопасность, метан, тяжелые углеводороды, остаточные газы угольных пластов, динамическая термогравиметрия, термогравиметрическая кривая, термогравиметрическая кривая по производной, десорбция, выход летучих веществ.

Для цитирования: Скопинцева О. В., Рыбичев А. А., Баловцев С. В. Исследование пожароопасности углей методом динамической термогравиметрии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 6. – С. 134–144. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_6_0_134.

Study of coal fire hazard by dynamic thermogravimetry

O.V. Skopintseva¹, A.A. Rybichev¹, S.V. Balovtsev¹

¹ NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: rybichev@yandex.ru

Abstract: The results of thermogravimetric analysis of coal samples of grades Zh, GZh, and A are examined. The mass loss of the coal sample of grades Zh and GZh during thermogravimetric analysis is stepwise. The mass loss of the coal sample of grade A during thermogravimetric analysis is smooth and monotonic. For all studied coal grades Zh, GZh, and A, the primary

mass loss of approximately 4% occurs at temperatures of approximately 350–370 °C and is associated with the evaporation of external and hygroscopic moisture. The second mass loss for coal grades Zh and GZh occurs in two stages, ranging from approximately 350–660 °C and 700–870 °C. The first peak (479.95 °C) is associated with endothermic processes, the second (772.32 °C) with exothermic processes. In total, the two stages result in a mass loss of approximately 30%, with a loss of approximately 16% in the first stage and approximately 14% in the second stage. The second mass loss associated with the desorption of hydrocarbons is 1.6 times greater for GZh coal than for Zh coal, which corresponds to the ratio of volatile matter yield from these coal grades. The second mass loss for A coal is 2%, which is 8 to 13 times less than the mass loss for Zh and GZh coal. The third loss of mass of coal samples in the temperature range from 660 to 870°C for coal grade Zh is 3.5 times greater than for coal grade GZh, which is explained by the ash content being 4.6 times higher for coal grade GZh compared to coal grade Zh. The smallest mass loss in the temperature range of 100 to 1200 °C is observed in A-grade coals, amounting to 2%, which is 2 to 7 times less than in GZh- and Zh-grade coals. Of the studied coal samples, the GZh-grade coal sample is the most explosive and flammable.

Key words: explosiveness, methane, heavy hydrocarbons, coal seam residual gases, dynamic thermogravimetry, thermogravimetric curve, thermogravimetric derivative curve, desorption, volatile matter yield.

For citation: Skopintseva O. V., Rybichev A. A., Balovtsev S. V. Study of coal fire hazard by dynamic thermogravimetry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(6):134-144. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_6_0_134.

Введение

Более половины всех аварий на угольных шахтах, происходящих по природно-технологическим причинам, приходится на шахтные пожары [1, 2]. Пожары, инициированные взрывами пылеметановоздушных смесей, приводят к катастрофическим последствиям из-за участия во взрыве отложившейся угольной пыли в горных выработках [3–5]. Эндогенные пожары, возникающие при самовозгорании угля, представляют также большую опасность из-за затрудненного доступа к очагу пожара.

Точное прогнозирование и предотвращение самовозгорания угольных пластов имеет решающее значение для безопасности ведения горных работ. В работе [6] представлена новая прогностическая модель для прогнозирования возгорания угля, которая включает параметр шероховатости трещин и интегрирует шероховатость трещин, тепло-

проводность, химические реакции, давление газа, напряжение и деформацию углепородного массива, а также механизмы адсорбции-десорбции для достижения всесторонней многофакторной связи в миграции газа в угольном пласте. Введение этого параметра обеспечивает более точное представление газопроницаемости, теплопередачи и деформации угольного пласта, тем самым повышая точность оценки риска самовозгорания угля.

Температура и концентрация оксида углерода (СО) являются ключевыми показателями при мониторинге самовозгорания угля. Для достижения точного прогнозирования опасности самовозгорания угля под землей в исследовании [7] была решена проблема недостаточной точности традиционных моделей прогнозирования самовозгорания угля путем предложения модели машинного обучения, которая интегрирует множе-

ство газовых индикаторов с температурными характеристиками. Был создан набор данных, включающий такие характеристики, как CO, температура, O₂ и олефины, с использованием экспериментов по повышению температуры самовозгорания угля. Результаты показали, что точность модели IPOA-LSTM на 15–30% выше, чем у других пространственных моделей. Анализ SHAP (SHapley Additive exPlanations) показал, что C₂H₄, O₂ и CO/O₂ являются ключевыми прогностическими переменными. Модель продемонстрировала высокую точность и эффективность, обеспечивая надежную поддержку для раннего предупреждения о самовозгорании угля.

С целью решения проблемы сложной молекулярной структуры угля и неполной последовательности реакций при самовозгорании угля, в исследовании [8] были изучены механизмы и термодинамические параметры цепных реакций самовозгорания угля путем сочетания экспериментальных исследований и молекулярного моделирования. Было установлено, что на стадии обрыва цепи образуются стабильные соединения, такие как эфиры, сложные эфиры и хиноны, которые могут ингибировать развитие цепных реакций. Полученные результаты могут дополнительно объяснить механизм реакции самовозгорания угля и послужить основой для разработки и использования химических ингибиторов.

Низкотемпературное окисление угля в процессе добычи метана из угольных пластов неизбежно. Исходя из эволюции физической и химической адсорбции метана в угольном массиве в процессе низкотемпературного окисления и сочетая это с эволюцией свободных радикалов, в работе была построена физическая модель адсорбции и десорбции метана в процессе добычи метана из угольных пластов. Установлено, что

для максимизации эффективности извлечения метана из угольных пластов необходимо принять меры, чтобы избежать низкотемпературного окисления угля на начальном этапе [9, 10].

Теоретические и экспериментальные исследования

Метод динамической термогравиметрии применяется для получения результатов динамики процесса термодеструкции угля, определения характерных точек, температуры начала и окончания процессов выхода летучих веществ и ряда других показателей. Термогравиметрия — метод, в котором измеряется изменение массы образца в зависимости от температуры или времени. Этот метод позволяет исследовать физические и химические процессы, такие как фазовые переходы, абсорбция, десорбция, деструкция и реакция твердых веществ с газами. Результатом анализа являются ТГ-кривые — зависимости массы навески (или изменения массы навески) от температуры или времени, %. Производная от ТГ-сигнала (скорость изменения массы), представляемая кривой ДТГ, позволяет установить момент времени или температуру, при которой изменение веса происходит наиболее быстро, %/мин.

В области исследований угля термогравиметрический анализ используется в рамках отнесения угольной пыли каждого шахтопласта к взрывчатой. При изотермическом нагреве ($T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$) в муфельной печи в течение 7 мин определяется выход летучих веществ V_{daf} , % (по ГОСТ Р 55660-2013 — как величина потери массы образца, выраженная в процентах) и масса зольного остатка [11–13].

При термогравиметрическом исследовании проводится нагрев образца и выполняется измерение массы образца

с шагом времени. По полученным данным строится ТГ-кривая: зависимость массы образца, как функции температуры [11]:

$$M = F(T) \quad (1)$$

Кроме ТГ-кривых экспериментально получают ДТГ-кривые (зависимость скорости потери массы)

$$dM/dt = f(T) \quad (2)$$

Исследования образцов угля марок Е-5, ГЖ и А проводились на метрологически аттестованном оборудовании – термовесах ТГА-951, входящих в термоаналитический комплекс «Duont-9900»; скорость нагревания – 20 °С/мин; атмосфера – аргон (расход газа – 50 мл/мин); температурный диапазон нагревания – от 30 до 1200 °С.

Наличие тяжелых углеводородов в остаточных газах угольных пластов представляют потенциальную опасность, так как выделяемые из угля тяжелые углеводороды в процессе угледобычи могут инициировать развитие процессов возгораний и взрывов в угольных шахтах [14–16].

Для подтверждения наличия тяжелых углеводородов в углях определенных

марок были проведены термогравиметрические исследования (рис. 1–3) изменения массы навесок угля (марки ГЖ, Ж, А) при изменении их температур.

Потеря массы образца угля (см. рис. 1) имеет ступенчатый характер. Первичная потеря массы около 4% происходит при температуре около 350–370 °С и связана с испарением внешней и гигроскопической влаги. Вторая потеря массы имеет две ступени, как показывает график ДТГ (первая производная от ТГ). Первая ступень охватывает диапазон температур около 350–660 °С, вторая – около 660–870 °С. Согласно графику кривой дифференциального термического анализа (ДТА, мВ/мг), первый пик (479,95 °С) связан с эндотермическими процессами, требующими поглощения тепла (испарение, десорбция газов), второй (772,32 °С) – с экзотермическими процессами, сопровождающимися выделением тепла. Разделены ступени температурой 650–670 °С. Всего на двух ступенях происходит потеря массы порядка 30%, в том числе – на первой ступени около 16%, на второй – около 14%. Потеря массы на второй ступени связана с окисли-

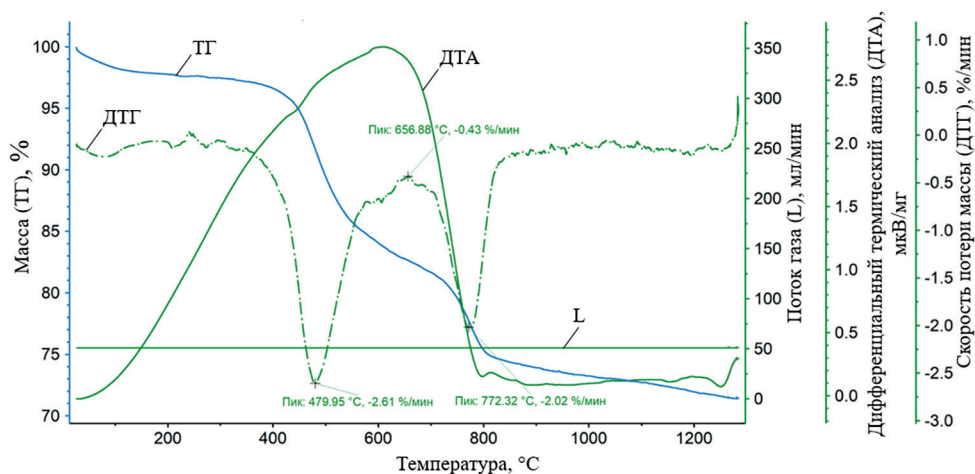


Рис. 1. Термогравиметрический анализ (ТГА) угля марки Ж (пласт Е-5)

Fig. 1. Thermogravimetric analysis (TGA) of coal grade Zh (E-5 seam)

тельными процессами тем кислородом, который находился в угле, так как исследования проводились в атмосфере аргона. Нас интересует потеря массы, связанная с процессами десорбции газов.

Известно, что при разрушении угля выделение углеводородов из углей происходит в соответствии с их сорбционными свойствами: первым выделяется метан, затем при нагревании или измельчении угля начинают выделяться глубокосорбированные углеводороды. Первая потеря массы на анализируемом рисунке связана с испарением влаги. Молекулярная масса воды составляет 18 атомных единиц. На ступени потери массы, связанной с десорбцией углеводородов, градиент скорости потери массы в 3–4 раза превышает градиент потери массы при испарении влаги. Значит, при десорбции испаряется что-то тяжелое, и это не метан, так как молекулярная масса метана меньше молекулярной массы воды. Следовательно, на второй ступени потери массы испаряются тяжелые углеводороды.

Ранее было экспериментально подтверждено [11, 12], что основу выделя-

ющихся из углей летучих веществ составляют горючие газы.

Потеря массы образца угля (см. рис. 2) также имеет ступенчатый характер, однако испарение внешней и гигроскопической влаги составляет большее значение, чем у образца угля марки Ж (см. рис. 1) и равно 8% в диапазоне температур 350–370 °С. Вторая потеря массы также имеет две ступени. Первый температурный пик потери массы (482,89 °С), связанный с эндотермическими процессами, происходит с поглощением тепла, обусловленного десорбцией газов. Потеря массы образца в интервале температур от 350–370 °С до 483 °С составляет порядка 25%, что больше, чем для образца углей марки Ж. Это может свидетельствовать о том, что содержание тяжелых углеводородов во втором образце угля больше, чем в первом. Выделение тепла, связанного с окислением угля, составляет небольшое количество, равное 4%. Это объясняется повышенной зольностью второго образца угля, равной 37,8%, по сравнению с зольностью первого образца угля, равной 8,3% (табл. 1).

Потеря массы образца угля (см. рис. 3) носит плавный характер. Первичная по-

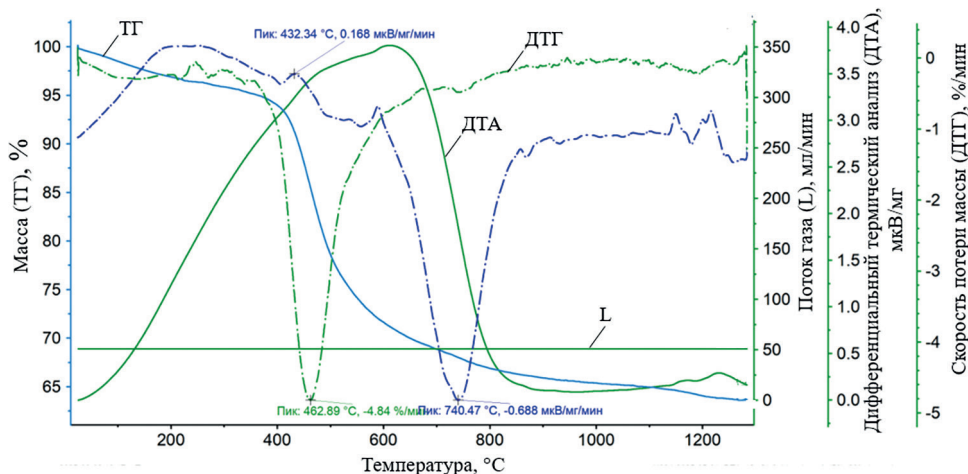


Рис. 2. Термогравиметрический анализ (ТГА) угля марки ГЖ (пласт «Поленовский»)

Fig. 2. Thermogravimetric analysis (TGA) of coal grade GZh (Polenovskiy seam)

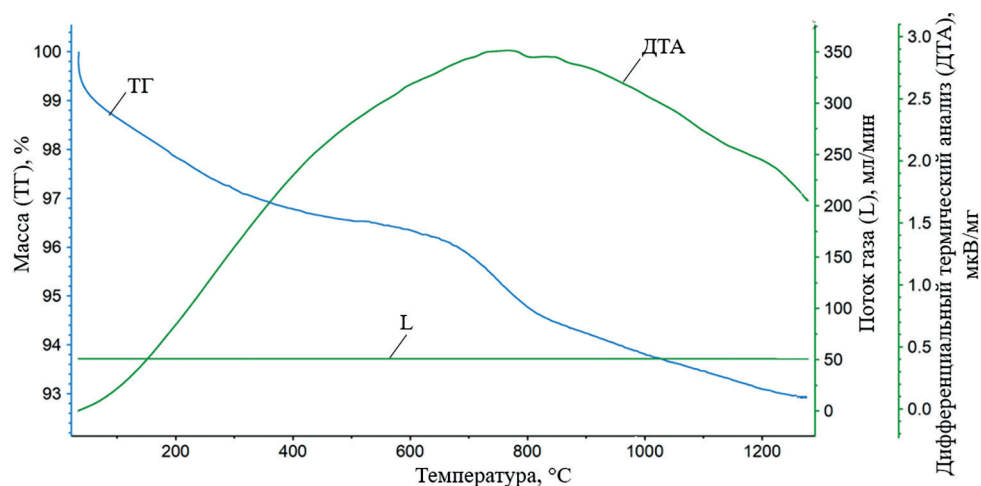


Рис. 3. Термогравиметрический анализ (ТГА) угля марки А
 Fig. 3. Thermogravimetric analysis (TGA) of coal grade A

теря массы, связанная с испарением внешней и гигроскопической влаги, составляет около 3% и также происходит при температуре около 350–370 °С. Потеря массы, связанная с десорбцией газов, в диапазоне температур от 350–370 °С до 770–800 °С очень незначительна и составляет не более 2%. На выделение тепла, связанного с окислением угля, также приходится не более 2%, что объясняется малым количеством кислорода, находящегося в углях марки А.

Для нашего образца угля атомное содержание кислорода в угле составляет 3,7% (см. табл. 1).

Результаты термогравиметрического анализа исследованных марок углей (Ж, ГЖ, А) сведены в табл. 2. Первичная потеря массы образцов, обусловленная испарением влаги в диапазоне температур 350–370 °С, составляет от 3 до 6%, в среднем 4%.

Вторая потеря массы, связанная с десорбцией углеводородов, для угля марки ГЖ в 1,6 раза больше, чем для угля марки Ж, что соответствует соотношению данных (см. табл. 2) по выходу летучих веществ из углей этих марок. Вторая потеря массы для угля марки А составляет 2%, что от 8 до 13 раз меньше потери массы для углей марок Ж и

Таблица 1

Физико-химические характеристики исследуемых образцов угля
Physicochemical characteristics of the studied coal samples

Образцы углей	Марка угля	Влажность угля, %	Выход летучих веществ, %	Зольность, %	Содержание серы, %	Атомное содержание кислорода, %
У1 (пласт Е-5, шахта «Осинниковская»)	Ж	2,70	32,10	8,30	0,48	6,1
У2 (пласт «Поленовский», шахта им. С.М. Кирова)	ГЖ	4,10	41,70	37,80	0,30	10,7
У3 (пласт І6, шахта «Алмазная»)	А	5,00	9,00	9,80	1,70	3,7

Таблица 2

Показатели динамической термогравиметрии образцов угля
Dynamic thermogravimetry parameters of coal samples

Образцы углей	Потеря массы образца, %			Всего, %
	При испарении влаги в диапазоне температур	При десорбции газов в диапазоне температур	При окислении угля в диапазоне температур (термодеструкция)	
У1 (пласт Е-5, шахта «Осинниковская»)	4% 350–370 °С	16% 350–660 °С	14% 660–870 °С	34
У2 (пласт «Поленовский», шахта им. С.М. Кирова)	6% 350–370 °С	27% 370–660 °С	4% 660–870 °С	37
У3 (пласт І6, шахта «Алмазная»)	3% 350–370 °С	2% 370–800 °С	2% 800–1200 °С	7

ГЖ. Данные табл. 2 показывают, что угли марки А имеют выход летучих веществ 9%. Исследованиями авторов ранее было установлено, что остаточные газы углей марки А могут состоять не более чем из 2% метана, а тяжелые углеводороды в них отсутствуют вовсе. Можно предположить, что в состав летучих веществ угля марки А входят негорючие газы, которые выделяются при термодеструкции неорганических веществ, минеральных добавок, обуславливающих зольность угля. Для образца У3 зольность угля составляет 9,8%.

Третья потеря массы образцов угля в диапазоне температур от 660 до 870 °С для угля марки Ж в 3,5 раза больше, чем для угля марки ГЖ, что объясняется превышением зольности в 4,6 раз угля марки ГЖ по сравнению с углем марки Ж.

Самая маленькая потеря массы в диапазоне температур от 100 до 1200 °С наблюдается в углях марки А (см. рис. 3) (из-за маленького содержания летучих веществ в угле), составляя 2%, что от 2 до 7 раз меньше по сравнению с марками ГЖ и Ж; это объясняется маленьким содержанием атомного кислорода в угле и существенной зольностью.

Температура воспламенения гексана 233 °С, бутана — 405 °С, пропана — 470 °С. Температура воспламенения

метана выше, чем у этих газов, и составляет 650–750 °С. Нижние концентрационные пределы взрываемости: гексан — 1,25%, бутан — 1,9%, пропан — 2,4%, метан — 5%. При работе комбайнов, шахтных ленточных конвейеров и другого оборудования на выемочном участке могут возникать температуры воспламенения тяжелых углеводородов. Таким образом, от источника теплового импульса могут сначала вспыхнуть тяжелые углеводороды, которые дадут искру для взрыва метана.

В исследованиях [17–19] приводятся данные, позволяющие оценить температуру воспламенения угля в воздухе под воздействием теплового импульса при работе шахтного ленточного конвейера для транспортировки угля, при неправильной эксплуатации которого на локальных участках может возникнуть нагрев до 300–500 °С. Возникает возможность воспламенения штыба угля на конвейере в результате воспламенения летучих веществ, в состав которых входят и остаточные газы углей, выделяющиеся из угля при нагревании.

Содержание тяжелых углеводородов было также зафиксировано отделением ВГСЧ в дистанционном отборе по проложенным трубам для проб воздуха с аварийного участка при пожаре в

лаве, обрабатывающей пласт марки Ж (из трубопровода на выхлопе ВВН2-150 и из трубопровода УВЦГ на поверхности). В результате термодегазации угля при пожаре содержание индикаторных газов в воздухе горной выработки составило: CH_4 – 1,26%, C_2H_6 – 0,046%, C_3H_8 – 0,0096%, $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$ – 0,0011%, $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ – 0,0010%.

Китайскими учеными [20] исследовались характеристики повторного воспламенения перегретого угля, полученного из трех типичных низкосортных углей, склонных к самовозгоранию: лигнита Чжалайнуэр (марка Ж), длиннопламенного угля Чжунъэр (КЖ) и неслеживающегося угля Шэньфу-Дуншэн (Д). Анализировалось влияние реакций пиролиза при различных температурах на образование перегретого угля, после чего оценивались его свойства повторного воспламенения. Результаты показали согласованное поведение пиролиза для всех трех углей, характеризующееся критическими переходами около 500 °С. Хотя скорость выделения летучих веществ увеличивалась с температурой, она уменьшалась после 500 °С из-за образования полукокса. Эти результаты дают важное представление о поведении угля, подвергнутого перегреву, при повторном воспламенении, и закладывают основу для улучшения стратегий управления рисками самовозгорания угля.

Заключение

Проведенные исследования пожароопасности углей методом динамической термогравиметрии показали:

1. потеря массы образцов угля марок Ж, ГЖ при термогравиметрическом анализе имеет ступенчатый характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоткин И. О., Федоткин Д. В. Проблемы пожаров в угольных шахтах и обзор современных подходов к их моделированию // Уголь. – 2024. – № 2. – С. 69–73. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-2-69-73.

Потеря массы образца угля марки А при термогравиметрическом анализе имеет плавный, монотонный характер. Для всех исследованных углей марок Ж, ГЖ, А первичная потеря массы около 4% происходит при температуре около 350–370 °С и связана с испарением внешней и гигроскопической влаги;

2. вторая потеря массы для углей марок Ж, ГЖ имеет две ступени в диапазоне температур около 350–660 °С и 700–870 °С. Первый пик (479,95 °С) связан с эндотермическими процессами, второй (772,32 °С) – с экзотермическими процессами. Всего на двух ступенях происходит потеря массы порядка 30%, в том числе – на первой ступени около 16%, на второй – около 14%. Вторая потеря массы, связанная с десорбцией углеводородов, для угля марки ГЖ в 1,6 раза больше, чем для угля марки Ж, что соответствует соотношению по выходу летучих веществ из углей этих марок. Вторая потеря массы для угля марки А составляет 2%, что от 8 до 13 раз меньше потери массы для углей марок Ж и ГЖ;

3. третья потеря массы образцов угля в диапазоне температур от 660 до 870 °С для угля марки Ж в 3,5 раза больше, чем для угля марки ГЖ, что объясняется превышением зольности в 4,6 раз угля марки ГЖ по сравнению с углем марки Ж. Самая маленькая потеря массы в диапазоне температур от 100 до 1200 °С наблюдается в углях марки А, составляя 2%, что от 2 до 7 раз меньше по сравнению с марками ГЖ и Ж;

4. из исследованных образцов угля наиболее взрывопожароопасен образец угля марки ГЖ, содержащий тяжелые углеводороды в 1,6–13,5 раз больше, чем образцы угля марок Ж и А соответственно.

2. Kamran M., Chaudhry W., Wattimena R. K., Rehman H., Martyushev D. A. A multi-criteria decision intelligence framework to predict fire danger ratings in underground engineering structures // *Fire*. 2023, vol. 6, no. 11, article 412. DOI: 10.3390/fire6110412.

3. Yu J., Li Z., Yang D., Liu Y. Dynamic risk assessment of gas accumulation during coal and gas outburst catastrophes based on analytic hierarchy process and information entropy // *Processes*. 2025, vol. 13, no. 5, article 1305. DOI: 10.3390/pr13051305.

4. Li S., Gao L. An investigation of the process of risk coupling and the main elements of coal-mine gas-explosion risk // *Fire*. 2025, vol. 8, no. 8, article 294. DOI: 10.3390/fire8080294.

5. Zhang M., Cao X., Zhang L., Zhou A., Li B. Experimental study on the contribution of desorbed gas to the propagation and disaster-causing of coal-gas outbursts // *Fuel*. 2023, vol. 349, article 128656. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.128656.

6. Lu G., Zhao G., Yu L., Zhang M., Wang X. Quantifying fracture roughness effects on coal mine spontaneous combustion through a coupled thermos hydro mechanical model // *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, article 24897. DOI: 10.1038/s41598-025-09268-5.

7. Tan B., Sui L., Gao L., Yang K., Tang S., Zuo Yu. Improved POA-LSTM model based on multi-source gas and temperature features for predicting key indicators of coal spontaneous combustion // *Natural Resources Research*. 2026. DOI: 10.1007/s11053-025-10623-6.

8. Yujia Huo, Hongqing Zhu, Xin He, Shuhao Fang, Wei Wang Quantum chemistry calculation study on chain reaction mechanisms and thermodynamic characteristics of coal spontaneous combustion at low temperatures // *ACS Omega*. 2021, vol. 6, no. 45, pp. 30841–30855. DOI: 10.1021/acsomega.1c05307.

9. Tang Z., Yang Sh., Xu G., Sharifzadeh M., Zhai Ch. Evolution law of adsorption and desorption characteristics of CH_4 in coal masses during coalbed methane extraction // *Energy & Fuels*. 2018, vol. 32, no. 10, pp. 10540–10548. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b02318.

10. Qi X., Chen L., Xin H., Ji Y., Bai Ch., Song R., Xue H. Fangming liureaction mechanism and thermodynamic properties of aliphatic hydrocarbon groups during coal self-heating // *Energy & Fuels*. 2018, vol. 32, no. 10. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b02165.

11. Романченко С. Б., Нагановский Ю. К., Корнев А. В. Инновационные способы контроля пылевзрывобезопасности горных выработок // *Записки Горного института*. – 2021. – Т. 252. – С. 927–936. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.14.

12. Романченко С. Б., Корнев А. В. Инновационные методы исследований пылевой взрывоопасности углей // *Записки Горного института*. – 2025. – Т. 274. – С. 129–141.

13. Blokhin D. I., Dokuchaeva A. I., Zakorshmenniy I. M., Kobylkin A. S., Koporulina E. V. The influence of the mine dust mineral composition on the characteristics of thermal destruction processes // *Journal of Physics: Conference Series*. 2024, vol. 2697, no. 1, article 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/2697/1/012059.

14. Лебедев В. С., Скопинцева О. В. Остаточные газовые компоненты угольных пластов: состав, содержание, потенциальная опасность // *Горный журнал*. – 2017. – № 4. – С. 84–86. DOI: 10.17580/gzh.2017.04.17


15. Liang Y., Shi B., Yue J., Zhang Ch., Shen X., Hu T., Han Q. Desorption characteristics of CH_4 - C_2H_6 mixed gas in heavy hydrocarbon-rich coal seams // *ACS Omega*. 2024, vol. 9, no. 14, pp. 16176–16186. DOI: 10.1021/acsomega.3c10156.

16. Родионов В. А., Скрипник И. Л., Ивахнюк С. Г. Исследование характеристик самовозгорания каменного угля // *Безопасность труда в промышленности*. – 2025. – № 4. – С. 7–13. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-4-7-13.

17. Dong X., Liu T., Wang X., Xu X. Fuzzy structured element integrated decision of metamorphism on coal dust ignition hazard rating // *Journal of Physics Conference Series*. 2023, vol. 2549, no. 1, article 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/2549/1/012013.

18. Zhou S., Yang Y., Shang H. Adhesion behavior of underground coal dust with fused silica: Effects of relative humidity and particle size // *Processes*. 2024, vol. 12, no. 4, article 735. DOI: 10.3390/pr12040735.

19. Черданцев С. В., Шлапаков П. А., Лебедев К. С., Ерастов А. Ю., Хаймин С. А. Самовоспламенение пылегазовоздушных смесей в атмосфере горных выработок // *Горная промышленность*. – 2024. – № 2. – С. 121–126. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-2-121-126.

20. Chen L., Lu W., Qi X., Li J., Li J. Pyrolysis-induced transformations and re-ignition behavior of overfired low-rank coals under oxygen exposure // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2025, vol. 150, pp. 15663–15673. DOI: 10.1007/s10973-025-14732-5. 

REFERENCES

1. Fedotkin I. O., Fedotkin D. V. The problems of fires in coal mines and a review of modern approaches to their modelling. *Ugol'*. 2024, no. 2, pp. 69–73. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-2-69-73.
2. Kamran M., Chaudhry W., Wattimena R. K., Rehman H., Martyushev D. A. A multi-criteria decision intelligence framework to predict fire danger ratings in underground engineering structures. *Fire*. 2023, vol. 6, no. 11, article 412. DOI: 10.3390/fire6110412.
3. Yu J., Li Z., Yang D., Liu Y. Dynamic risk assessment of gas accumulation during coal and gas outburst catastrophes based on analytic hierarchy process and information entropy. *Processes*. 2025, vol. 13, no. 5, article 1305. DOI: 10.3390/pr13051305.
4. Li S., Gao L. An investigation of the process of risk coupling and the main elements of coal-mine gas-explosion risk. *Fire*. 2025, vol. 8, no. 8, article 294. DOI: 10.3390/fire8080294.
5. Zhang M., Cao X., Zhang L., Zhou A., Li B. Experimental study on the contribution of desorbed gas to the propagation and disaster-causing of coal-gas outbursts. *Fuel*. 2023, vol. 349, article 128656. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.128656.
6. Lu G., Zhao G., Yu L., Zhang M., Wang X. Quantifying fracture roughness effects on coal mine spontaneous combustion through a coupled thermos hydro mechanical model. *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, article 24897. DOI: 10.1038/s41598-025-09268-5.
7. Tan B., Sui L., Gao L., Yang K., Tang S., Zuo Yu. Improved POA-LSTM model based on multi-source gas and temperature features for predicting key indicators of coal spontaneous combustion. *Natural Resources Research*. 2026. DOI: 10.1007/s11053-025-10623-6.
8. Yujia Huo, Hongqing Zhu, Xin He, Shuhao Fang, Wei Wang Quantum chemistry calculation study on chain reaction mechanisms and thermodynamic characteristics of coal spontaneous combustion at low temperatures. *ACS Omega*. 2021, vol. 6, no. 45, pp. 30841–30855. DOI: 10.1021/acsomega.1c05307.
9. Tang Z., Yang Sh., Xu G., Sharifzadeh M., Zhai Ch. Evolution law of adsorption and desorption characteristics of ch₄ in coal masses during coalbed methane extraction. *Energy & Fuels*. 2018, vol. 32, no. 10, pp. 10540–10548. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b02318.
10. Qi X., Chen L., Xin H., Ji Y., Bai Ch., Song R., Xue H. Fangming liureaction mechanism and thermodynamic properties of aliphatic hydrocarbon groups during coal self-heating. *Energy & Fuels*. 2018, vol. 32, no. 10. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b02165.
11. Romanchenko S. B., Naganovskiy Y. K., Kornev A. V. Innovative ways to control dust and explosion safety of mine workings. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 252, pp. 927–936. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.14.
12. Romanchenko S. B., Kornev A. V. Innovative research methods for the dust explosion hazard of coals. *Journal of Mining Institute*. 2025, vol. 274, pp. 129–141. [In Russ].
13. Blokhin D. I., Dokuchaeva A. I., Zakorshmenyi I. M., Kobytkin A. S., Koporulina E. V. The influence of the mine dust mineral composition on the characteristics of thermal destruction processes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024, vol. 2697, no. 1, article 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/2697/1/012059.
14. Lebedev V. S., Skopintseva O. V. Residual coalbed gas components: Composition, content, hazard. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 4, pp. 84–86. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.04.17
15. Liang Y., Shi B., Yue J., Zhang Ch., Shen X., Hu T., Han Q. Desorption characteristics of CH₄-C₂H₆ mixed gas in heavy hydrocarbon-rich coal seams. *ACS Omega*. 2024, vol. 9, no. 14, pp. 16176–16186. [In Russ]. DOI: 10.1021/acsomega.3c10156.
16. Rodionov V. A., Skripnik I. L., Ivakhnyuk S. G. Investigating properties of hard coal spontaneous ignition. *Occupational Safety in Industry*. 2025, no. 4, pp. 7–13. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-4-7-13.
17. Dong X., Liu T., Wang X., Xu X. Fuzzy structured element integrated decision of metamorphism on coal dust ignition hazard rating. *Journal of Physics Conference Series*. 2023, vol. 2549, no. 1, article 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/2549/1/012013.
18. Zhou S., Yang Y., Shang H. Adhesion behavior of underground coal dust with fused silica: Effects of relative humidity and particle size. *Processes*. 2024, vol. 12, no. 4, article 735. DOI: 10.3390/pr12040735.

19. Cherdantsev S. V., Shlapakov P. A., Lebedev K. S., Erastov A. Yu., Khaymin S. A. Self-ignition of dust and gas-air mixtures in the atmosphere of mine workings. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 2, pp. 121 – 126. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-2-121-126.

20. Chen L., Lu W., Qi X., Li J., Li J. Pyrolysis-induced transformations and re-ignition behavior of overfired low-rank coals under oxygen exposure. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2025, vol. 150, pp. 15663 – 15673. DOI: 10.1007/s10973-025-14732-5.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Скопинцева Ольга Васильевна¹ — д-р техн. наук,
профессор, профессор, e-mail: skopintseva54@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7257-8720,

Рыбичев Алексей Алексеевич¹ — ассистент,
e-mail: rybichev@yandex.ru,

ORCID ID: 0009-0005-9269-201X,

Баловцев Сергей Владимирович¹ — д-р техн. наук,
доцент, профессор, e-mail: balovcev@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0961-6050,

¹ Университет науки и технологий МИСИС.

Для контактов: Рыбичев А.А., e-mail: rybichev@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

O. V. Skopintseva¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

Professor, e-mail: skopintseva54@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-7257-8720,

A. A. Rybichev¹, Assistant, e-mail: rybichev@yandex.ru,

ORCID ID: 0009-0005-9269-201X,

S. V. Balovtsev¹, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

Professor, e-mail: balovcev@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0961-6050,

¹ NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: A. A. Rybichev, e-mail: rybichev@yandex.ru.

Получена редакцией 19.01.2026; получена после рецензии 06.03.2026; принята к печати 10.05.2026.

Received by the editors 19.01.2026; received after the review 06.03.2026; accepted for printing 10.05.2026.

