

*Маадыр-оол Шенне Олеговна, преподаватель
ФГБОУ ВО «Тувинский государственный университет»,*

ПРОЦЕСС САМОВОЗГОРАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

***Аннотация.** В статье рассматриваются фундаментальные аспекты процесса самовозгорания твердого топлива как сложного физико-химического явления, обусловленного экзотермическими реакциями окисления в условиях недостаточного теплоотвода. Анализируются стадии процесса, начиная от низкотемпературного окисления и заканчивая тепловым взрывом. Особое внимание уделено классификации твердых топлив (уголь, торф, бурый уголь, горючие сланцы) по склонности к самовозгоранию, а также количественным критериям, таким как критическая температура и период индукции. На основе теории теплового самовоспламенения Семенова — Франк-Каменецкого обсуждаются условия перехода медленной высокотемпературной реакции в аварийный режим горения.*

***Ключевые слова:** самовозгорание, твердое топливо, уголь, низкотемпературное окисление, тепловой взрыв, стадии самовозгорания, период индукции, критическая температура, прогнозирование самовозгорания, профилактика, инертизация.*

***Annotation.** The article discusses the fundamental aspects of the process of spontaneous combustion of solid fuels as a complex physico-chemical phenomenon caused by exothermic oxidation reactions in conditions of insufficient heat dissipation. The stages of the process are analyzed, starting from low-temperature oxidation and ending with a thermal explosion. Special attention is paid to the classification of solid fuels (coal, peat, brown coal, oil shale) according to their propensity to spontaneous combustion, as well as quantitative criteria such as critical temperature and induction period. Based on the Semenov—Frank-Kamenetsky theory of thermal self-ignition, the conditions for the transition of a slow high-temperature reaction to an emergency gorenje mode are discussed.*

Keywords: *spontaneous combustion, solid fuel, coal, low-temperature oxidation, thermal explosion, stages of spontaneous combustion, induction period, critical temperature, prediction of spontaneous combustion, prevention, inertia.*

Проблема самовозгорания твердого топлива сохраняет свою актуальность для горнодобывающей, углеперерабатывающей и энергетической отраслей промышленности. По данным Международного энергетического агентства (IEA, 2021), ежегодные потери угля от самовозгорания при хранении и транспортировке достигают 2–3% от мирового объема добычи, что составляет десятки миллионов тонн. Кроме того, самовозгорание создает серьезные экологические риски и угрозу безопасности персонала. В отличие от принудительного зажигания, самовозгорание развивается спонтанно вследствие внутренних тепловых и химических процессов, что требует глубокого понимания его термокинетической природы. Под самовозгоранием твердого топлива понимается процесс быстрого термического разложения и последующего горения, инициируемый не внешним источником открытого пламени, а накоплением тепла в объеме топлива за счет экзотермических реакций окисления с кислородом воздуха. Классический пример — бурый уголь с высоким содержанием реакционноспособных кислородсодержащих групп и влаги[1].

Процесс самовозгорания твердого топлива инициируется на молекулярном уровне адсорбцией кислорода на активных центрах углеродной матрицы. Для ископаемых углей и торфа такими центрами выступают ароматические фрагменты, содержащие неспаренные электроны (парамагнитные центры), а также гетероатомные группировки: гидроксильные ($-\text{OH}$), карбонильные ($>\text{C}=\text{O}$) и карбоксильные ($-\text{COOH}$). При температуре 20–80°C физическая адсорбция O_2 сменяется хемосорбцией, сопровождающейся разрывом π -связей в конденсированных ароматических системах. Ключевая реакция первой стадии — образование пероксидных и гидропероксидных комплексов на поверхности углеродного скелета. Например, в случае бурого угля Канско-Ачинского бассейна скорость хемосорбции кислорода подчиняется уравнению Аррениуса с эффективной энергией активации $E_a \approx 50\text{--}70$ кДж/моль, что значительно ниже, чем для антрацитов ($E_a \approx 100\text{--}120$ кДж/моль). Образующиеся пероксидные радикалы $\text{ROO}\cdot$ инициируют

цепные реакции автоокисления с участием алкильных и арильных фрагментов топлива.

Решающую роль в ускорении процесса играет способность гидропероксидов (ROOH) к термолизу с гомолитическим разрывом связи O—O (энергия диссоциации около 150–170 кДж/моль). При достижении локальной температуры 70–90°C скорость распада ROOH резко возрастает, порождая лавинообразный рост концентрации свободных радикалов. Этот переход знаменует начало второй стадии — термокинетической неустойчивости[2].

Фундаментальное объяснение самовозгорания дает классическая теория теплового взрыва, развитая Н.Н. Семеновым и Д.А. Франк-Каменецким. Согласно этой теории, основной причиной самовозгорания является превышение скорости тепловыделения от химических реакций над скоростью теплоотвода в окружающую среду. Для пористого твердого топлива, такого как торф или бурый уголь, процесс описывается уравнением теплового баланса в приближении однородного распределения температуры:

$$\rho c (\partial T / \partial t) = Q W(T) + \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T)$$

где ρ — плотность топлива, c — удельная теплоемкость, λ — коэффициент теплопроводности, Q — тепловой эффект реакции окисления, $W(T)$ — скорость реакции, экспоненциально зависящая от температуры по закону Аррениуса.

Критическим условием самовозгорания для топлива, хранящегося в штабеле или бункере, является выполнение неравенства: $dQ_{\text{ген}} / dT > dQ_{\text{отв}} / dT$. Безразмерным критерием служит число Семенова (Ψ):

$$\Psi = (Q E V \rho c_s) / (S \lambda R T_0^2) * \exp(-E / (R T_0))$$

где V — объем, S — поверхность теплоотвода, T_0 — температура окружающей среды. При $\Psi > \Psi_{\text{кр}}$ (критическое значение, для сферических частиц $\approx 3,0$) система переходит в режим теплового взрыва. Реальные экспериментальные данные для углей марки Д (длиннопламенный) показывают, что критическая температура окружающей среды для самовозгорания составляет 60–80°C при штабеле объемом 1000 м³, тогда как для антрацита она превышает 150°C.

На основе термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) выделяют четыре характерные стадии самовозгорания твердого топлива.

Первая стадия — индукционный период (латентная фаза). Длительность может варьироваться от нескольких часов (для реакционноспособных лигнитов) до нескольких месяцев (для высокометаморфизованных углей). При температуре 20–40°C реакция окисления идет медленно, тепловыделение компенсируется естественной конвекцией и теплопроводностью. Однако в центральных зонах штабеля с плохой вентиляцией температура начинает медленно расти (0,1–1°C в сутки). Этот этап характеризуется накоплением пероксидов и карбонильных соединений.

Вторая стадия — автоускорение. При достижении локальной температуры 70–90°C (так называемая «температура хемосорбционного перехода») скорость реакции становится сравнимой со скоростью теплоотвода. Возникает положительная обратная связь: выделяющееся тепло ускоряет распад гидропероксидов, что ведет к дальнейшему росту температуры. На этом этапе появляются первые признаки самонагрева — запах продуктов неполного окисления (фенолов, альдегидов), повышение влажности из-за дегидратации гигроскопической влаги. Третья стадия — тепловой взрыв (собственно самовозгорание). Температура быстро (в течение минут или часов) поднимается до 200–300°C, что вызывает пиролиз органической массы с выделением летучих горючих компонентов: водорода, метана, оксида углерода, смолистых веществ. Эти газы воспламеняются при контакте с кислородом, и процесс переходит в открытое пламенное горение. Экспериментально установлено, что для торфа критическая температура перехода к третьей стадии составляет 180–200°C, а для бурого угля — 150–170°C. Четвертая стадия — распространение горения по объему топлива. В зависимости от пористости и фракционного состава скорость фронта пламени может достигать 0,1–10 мм/мин. На этой стадии самовозгорание уже необратимо и требует внешнего тушения[3].

Склонность твердого топлива к самовозгоранию определяется комплексом параметров. Важнейший из них — степень метаморфизма. Низкосортные топлива (бурые угли, торф, горючие сланцы) обладают максимальной реакционной

способностью. Так, для торфа фрезерного с влажностью 40–50% период индукции при 30°C составляет всего 15–20 суток, а для каменного угля марки Ж (жирный) при той же температуре — более 6 месяцев. Причина — разная концентрация кислородсодержащих функциональных групп: в бурых углях содержание кислорода достигает 20–25% по массе, тогда как в антрацитах — менее 2–3%.

Влажность играет двойственную роль. При низких температурах гигроскопическая влага замедляет доступ кислорода к активным центрам и увеличивает теплоемкость системы, что повышает критическую температуру самовозгорания. Однако при нагреве до 100–150°C пары воды могут катализировать гидролиз связей C–O–C и способствовать образованию дополнительных радикалов. Максимальная склонность к самовозгоранию наблюдается при влажности 8–15% для углей и 25–35% для торфа. Фракционный состав критически важен из-за масштабного фактора. Согласно критерию Франк-Каменецкого, критический размер частицы $d_{кр}$ для самовозгорания обратно пропорционален корню квадратному из скорости реакции. Для угольной пыли с размером частиц менее 75 мкм самовозгорание возможно при комнатной температуре в слое всего 10–15 см толщиной. Напротив, куски угля размером более 200 мм самовозгораются только при нагреве внешней среды выше 120°C[4].

В промышленной практике для оценки склонности твердого топлива к самовозгоранию применяются стандартные методы: определение температуры самовозгорания по ГОСТ 28662-90 (аналог метода в горячей воздушной среде) и метод динамического дифференциального термического анализа (ДТА). Показатель «температура самовозгорания» для бурого угля составляет 190–210°C, для каменного — 280–320°C, для антрацита — выше 450°C. Современные подходы к предотвращению самовозгорания включают контроль критических условий хранения. Основные меры: ограничение высоты штабеля (не более 8–10 м для бурых углей), послойная укладка с уплотнением для снижения пористости, устройство вентиляционных каналов для отвода тепла, а также инертизация среды диоксидом углерода или азотом при хранении в силосах. Применение термопарных датчиков с автоматической регистрацией позволяет отслеживать рост температуры в зонах риска[5].

Таким образом, процесс самовозгорания твердого топлива представляет собой сложную термокинетическую систему, в которой химические реакции низкотемпературного окисления и тепловые процессы неразрывно связаны. Ключевым триггером выступает образование и разложение гидропероксидов на стадии автоускорения, приводящее к тепловому взрыву при нарушении баланса тепловыделения и теплоотвода. Понимание этих механизмов позволяет не только прогнозировать опасные режимы хранения и транспортировки, но и разрабатывать эффективные методы профилактики, основанные на контроле температуры, влажности и фракционного состава топлива. Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание мультифизических моделей, учитывающих реальную неоднородность пористой структуры и многокомпонентный состав твердых топлив, включая каталитическое влияние минеральных примесей (пирита, сидерита), которые могут дополнительно инициировать экзотермические реакции.

Список источников:

1. Торпо В. О., Ремезов А.В., Роут Г.Н. Методика, ход и результаты исследования процесса самовозгорания угля // Вестник КузГТУ. 2016. №4 (116). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-hod-i-rezultaty-issledovaniya-protsesta-samovozgoraniya-uglya> (дата обращения: 08.06.2026).
2. Ульянова Е. В. Влияние неоднородности структуры угольного вещества на склонность угля к самовозгоранию / Е. В. Ульянова, О. Н. Малинникова, А. И. Докучаева, Б. Н. Пашичев // Химия твердого топлива. – 2022. – № 6. – С. 18-24.
3. Худякова Л. И., Войлошников О. В., Тимофеева С. С. Магнийсиликатные отходы горнодобывающей промышленности и технологии их утилизации / отв. ред. А. К. Тулохонов. Новосибирск: Гео, 2014. 177 с.
4. Носырев Д.Я., Климова Е.Н. ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОЦЕССОВ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ В ЦИЛИНДРАХ ДИЗЕЛЕЙ // Современные наукоемкие технологии. 2007. № 9. С. 51-54; URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=25477> (дата обращения: 08.06.2026).
5. Исследование проявления горного давления при отработке мощного пласта с выпуском угля из подкровельной пачки / В.О. Торпо, С.И. Калинин, Н.Г.

Сердобинцев, И.С. Биктимиров, С.А. Новосельцев //Уголь.-2009.-№1.-С.64-67.