

УДК 662.612.1

DOI: <https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2026.13.38.001>

EDN: <https://elibrary.ru/bgyeth>

## РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ САМОВОЗГОРАНИЯ АЭРОГЕЛЕЙ УГЛЕЙ

*Леонид Петрович Вогман, Иван Ардашевич Болодьян, Дмитрий Вадимович Долгих, Евгений Евгеньевич Простов*

Всероссийский ордена “Знак Почета” научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), г. Балашиха, Московская область, Россия.

**Аннотация.** Представлен обзор процессов воспламенения и горения углей в виде топливной пыли (аэрозоли) и в слое (аэрогели). Выполнен анализ расчетных и экспериментальных данных условий теплового самовозгорания углей различных марок для расширения базы физико-химических и кинетических показателей при проведении расчетов, позволяющих определить условия предотвращения пожаров натуральных топлив на объектах защиты в результате самовозгорания. По данным расчетов можно сформулировать условия безопасного содержания и требования к форме оборудования для хранения углей.

**Ключевые слова:** уголь, самовозгорание, физико-химические показатели, кинетические показатели, расчет

**Для цитирования:** Расчетно-аналитические исследования процессов самовозгорания аэрогелей углей / Л.П. Вогман, И.А. Болодьян, Д.В. Долгих, Е.Е. Простов // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2026. № 2 (28). С. 7–13. DOI 10.37657/vniipo.avpb.2026.13.38.001. EDN BGYETH.

## COMPUTATIONAL AND ANALYTICAL STUDIES OF THE PROCESSES OF SPONTANEOUS COMBUSTION OF COAL-DERIVED AEROGELS

*Leonid P. Vogman, Ivan A. Bolodyan, Dmitry V. Dolgikh, Evgeny E. Prostov*

All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.

**Abstract.** An overview of the ignition and combustion processes of coals in the form of fuel dust (aerosols) and in a layer (aerogels) is presented. An analysis of calculated and experimental data on the thermal spontaneous combustion conditions of various grades of coal has been performed to expand the database of physicochemical and kinetic parameters for calculations aimed at determining the conditions for preventing fires of solid natural fuels at protected facilities due to spontaneous combustion. These calculations make it possible to formulate the conditions for safe storage and requirements for the design of coal storage equipment.

**Keywords:** coal, spontaneous combustion, physicochemical parameters, kinetic parameters, numerical modeling

**For citation:** Vogman L.P., Bolodyan I.A., Dolgikh D.V., Prostov E.E. Computational and analytical studies of the processes of spontaneous combustion of coal-derived aerogels. Aktual'nye voprosy pozharnoi bezopasnosti – Current Fire Safety Issues, 2026, no. 2, pp. 7-13. (InRuss.). DOI 10.37657/vniipo.avpb.2026.13.38.001. EDN BGYETH.

## Введение

Широкое использование углей, по данным аналитических исследований, будет затребовано в различных отраслях промышленности еще достаточно длительный период времени. Поэтому исследования, направленные на безопасные условия хранения, транспортирования и применения в оборудовании углей являются актуальными. Актуальность работы подтверждается и статистическими исследованиями пожаров [1, 2] на объектах защиты. Ежегодно в шахтах России возникает от 15 до 25 пожаров от самовозгорания угля. На долю Кузнецкого угольного бассейна приходится более 60 % добычи угля в России и около 70 % всех регистрируемых в шахтах эндогенных пожаров. На угольных разрезах эндогенные пожары возникают на вскрытых угольных пластах, породных отвалах, хвостохранилищах обогатительных фабрик. Самовозгорание углепородных скоплений характерно для угольных разрезов, расположенных в угольных районах Кузнецкого бассейна. Ежегодно фиксируется до 38 эндогенных пожаров, часть из которых не могут потушить более 30 лет [1].

Проведена статистическая оценка причин пожаров в течение жизненного цикла угля. При этом количество эндогенных пожаров на разрезах составляло около 65 % от общего количества пожаров, пожары на транспортной ленте топливоподдачи ТЭЦ – 15 %. При этом утверждается [2], что в неучтенных инцидентах и авариях их количество гораздо больше (почти в два раза) по сравнению с количеством аналогичных пожаров, принятых к учету. На третьем месте пожары, связанные с самовозгоранием угля при хранении на складе топлива, – 11,25 %, при транспортировке угля в железнодорожных вагонах этот показатель составляет 6,25 % от общего количества пожаров.

Главной особенностью натуральных твердых топлив является наличие в них трех составляющих: летучей части, кокса и золы. Летучие – это часть, газифицируемая при нагреве без участия окислителя (термическое разложение) с выделением горючих газов и аэрозолей. Кокс, по составу приближающийся к углероду, возгоняется при температуре 3000 °С. Горение кокса протекает гетерогенно, намного медленнее, чем выделение и горение летучих, поэтому при взрыве пыли его участие незначительное. Минеральная часть топлива зола (негорючая часть) играет роль, в основном, инертного материала, тормозящего самовозгорание, воспламенение и взрыв пыли.

Воспламенение и горение углей в виде топливной пыли происходит как в слое отложений (аэрогели) при температурах 100 °С и выше (низкотемпературное окисление в виде самонагревания с последующим самовозгоранием), так и в пылевоздушном потоке (аэрозоли) как высокотемпературное горение, в основном при наличии источника зажигания. Горение аэрогелей обычно протекает медленно в виде тления и обусловлено теплопроводностью и лучеиспусканием пламени. Однако при достижении условий, определяемых температурой окружающей среды, дисперсностью материала, диффузионным поступлением кислорода к поверхности частиц (гетерогенное взаимодействие кислорода с топливом), этот процесс может перейти в горение. При низкотемпературном окислении частицы топлива адсорбируют кислород из окружающего пространства, который вступает во взаимодействие с молекулярной структурой горючего вещества. Этим объясняется гетерогенный характер низкотемпературного окисления топлив, протекающего с участием летучих – продуктов термической и термоокислительной деструкции топлив, которые находятся в составе молекулы топлива и, не выделяясь в газовой фазе при сравнительно низких температурах, остаются в топливе до начала повышения температуры, близкой к 100 °С [3, 4].

Анализ поведения натуральных топлив при низкотемпературном окислении пыли показывает, что гетерогенное поглощение кислорода, происходящее в отложениях, идет интенсивнее у топлив с меньшим содержанием кислорода. Наоборот, выход летучих и образование гомогенной горючей газовой смеси, которыми определяется интенсивность взрыва, более быстро протекает у «молодых» топлив с большим содержанием кислорода.

В работе [5] указано на возможность самонагрева и самовозгорания в скоплениях разрыхленных масс угля, оставляемых в выработанных пространствах и деформированных целиках. В этом случае развитие процесса самовозгорания угля происходит отдельными очагами и может развиваться даже в небольших концентрированных массах (3–5 т) угля, практически всегда имеющих в выработанных пространствах при обработке пластов механическими системами для обрушения кровли. В этих обстоятельствах эндогенные пожары возникают не повсеместно, а только отдельными очагами. Это объясняется тем, что процесс самовозгорания может развиваться лишь при определенной скорости разогревания угля, зависящей от его химической активности, величины и продолжительности притока воздуха, содержания в нем кислорода. Такие явления, видимо, могут быть следствием и при самовозгорании небольших залежей угля или торфа при их расположении близко к поверхности земли. Например, Администрацией муниципального образования Киреевский район Тульской области обращается внимание на возникновение время от времени на землях поселения села Новоселебное множественных тлеющих очагов тления.

Цель работы заключается в анализе расчетных и экспериментальных данных условий теплового самовозгорания углей различных марок и расширении базы физико-химических и кинетических показателей для выполнения расчетов, направленных на определение условий теплового самовозгорания и предотвращение пожаров натуральных топлив на объектах защиты.

### **1. Расчетно-аналитические и экспериментальные исследования процесса самовозгорания различных видов углей**

Исследование процессов самовозгорания горючих веществ и материалов осуществляется в соответствии с разделом 18 «Метод экспериментального определения условий теплового самовозгорания» ГОСТ 12.1.044-2018 «ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения». Метод основан на современных представлениях о процессах самовоспламенения и теплообмена [3–10]. Его преимущество перед редакцией метода, разработанного ранее [3, 4], заключается в том, что он позволяет определить, насколько пожароопасным может быть режим производства, хранения или транспортирования вещества (материала) на реальном объекте защиты, размеры которого существенно больше испытанных в лабораторных условиях образцов. Оборудование, последовательность подготовки и проведения испытаний приняты в соответствии с ранее разработанным методом [3, 4]. Обработка полученных данных и их оценка выполняются по новой схеме, позволяющей определять кинетические параметры реакции окисления (энергия активации  $E$  и предэкспоненциальный множитель  $C$ ) и рассчитывать критические значения температуры самовозгорания, характерного размера компактной укладки материала, а также время индукции до самовозгорания. Примеры расчетов представлены в работах [3, 4, 11–13]. В работе сформирован банк данных  $E$  и  $C$ , необходимых для определения условий самовозгорания для различных марок и типов угля, который постоянно пополняется. В таблице представлены параметры кинетики процесса окислительной реакции ряда углей.

## Кинетические константы $E$ и $C$ для углей различных марок

Материал	Значение энергии активации $E$ , Дж · моль <sup>-1</sup>	Значение предэкспоненциального множителя $C$ , м · К/кг	Источник
Уголь сырец марки А	71 280	$4,31 \cdot 10^{11}$	[11]
Уголь ОУ-А	101 458	$2,82 \cdot 10^{15}$	[11]
Уголь ОУ-Б	97 650	$2,01 \cdot 10^{13}$	[11]
Уголь сырец (после сортировки)	101 450	$2,82 \cdot 10^{15}$	[11]
Углерод технический марки К 354	56 943	$4,343 \cdot 10^{12}$	[11]
Углерод технический марки Н 990	90 732	$5,665 \cdot 10^{14}$	[11]
Уголь активный отработанный марки СКД	56 943	$2,3 \cdot 10^7$	[4]
Каменный уголь (КУ)*	120	$10^{12}$	[14]

\* В книге [8] приводятся сведения о значениях  $E$  и  $C$  для марок Г, К, ПЖ и ПС каменного угля.

Данные, представленные в таблице, а также в книге [8], позволяют без предварительных определений использовать эти сведения для расчетов показателей критических значений температуры самовозгорания, характерного размера компактной укладки материала, а также время индукции до самовозгорания для углей с заданными физико-химическими свойствами (коэффициент теплопроводности; теплоемкость; тепловой эффект реакции; насыпная плотность материала др.) для реальных объектов защиты.

### **2. Анализ исследований по методу определения условий теплового самовозгорания материалов, учитывающего кинетику процесса окисления и реальные размеры, формы объектов защиты, используемых на практике**

Характерным является пример использования метода определения условий теплового самовозгорания материалов по ГОСТ 12.1.044-2018, учитывающего кинетику процесса окисления и реальные размеры, формы объектов защиты, применяемых на практике, при расчетах параметров самовозгорания угля активного отработанного СКД [4]. Результаты расчетов кинетических параметров, критической температуры самовозгорания, критического размера и времени индукции для активного углерода отработанного марки СКД, перевозимого в вагонах-хопперах железнодорожных платформ, показывают, что с учетом верхней границы диапазона климатического перепада температур воздуха на большей территории России, равной 40 °С, этот процесс при условии заполнения продуктом заданной в расчетах формы и размеров вагона-хоппера, является пожаробезопасным и не может привести к самовозгоранию в пути следования. Этот вывод является тем более важным, что при использовании результатов, полученных по предыдущей версии метода по ГОСТ 12.044-89, материал угля активного марки СКД отработанного был бы отнесен к самовозгорающимся, в том числе и для реальных условий транспортировки его в вагонах-хопперах по железной дороге или при его хранении массой и формой, сопоставимой с принятыми в расчетах.

Такой же вывод сделан по результатам исследования условий теплового самовозгорания технического углерода марки К 354 при транспортировании его

в железнодорожных вагонах [3]. При заполнении продуктом заданной в расчетах формы и размеров вагона его транспортирование при температуре 40 °С, близкой к максимальной на территории России, является пожаробезопасным и не может привести к самовозгоранию технического углерода в пути следования.

В работе [14] проведены экспериментальные исследования условий теплового самовозгорания каменного угля по методу и расчетной схеме, адаптированных к современным возможностям записи полученных результатов непосредственно на компьютер и (или) электронный носитель. Выполнен анализ самовозгорания «жирных» и «слабоспекающихся» каменных углей в зависимости от их формы и размера скопления. Исследования позволили определить наиболее пожаробезопасные условия транспортирования каменных углей водным транспортом (критические геометрические параметры трюмного пространства балкеров) и предложить наиболее безопасный способ их складирования в виде кубической (а не прямоугольной формы, как в железнодорожном транспорте) формы.

Следует отметить, что общие принципы предотвращения самовозгорания аэрогелей углей заключаются в применении методов и средств, которые снижают химическую активность реагирующих веществ, или обеспечивают стационарные условия теплообмена между материалом и окружающей средой при температуре ниже температуры самовозгорания для заданных условий эксплуатации [15].

К физическим методам профилактики самовозгорания веществ и материалов (если эти методы допустимы к применению в технологии обращения горючих веществ и материалов) также относятся:

увеличение (укрупнение) размеров частиц, снижение пористости, повышение плотности, а, следовательно, увеличение теплопроводности и ухудшение условий аккумуляции тепла в единице объема (массы) вещества;

повышение влажности, содержащейся в веществах (материалах) и в окружающей среде.

Важным показателем пожарной опасности веществ, склонных к самовозгоранию, является период индукции до самовозгорания, определяемый экспериментально или расчетом на основе экспериментальных данных. Если технологический цикл хранения, транспортирования или обработки вещества меньше времени периода индукции, по истечении которого может произойти самовозгорание, то такой технологический процесс следует считать безопасным.

### 3. Заключение

Представлен краткий обзор процессов воспламенения и горения углей в виде как топливной пыли (аэрозоли), так и в слое (аэрогели). Выполнен анализ расчетных и экспериментальных данных условий теплового самовозгорания углей различных марок для расширения базы данных физико-химических и кинетических показателей (в частности, сведений, касающихся данных энергии активации и предэкспоненциального множителя) при проведении расчетов, направленных на предотвращение пожаров натуральных топлив на объектах защиты. Данные расчетов позволяют сформулировать условия безопасного содержания и требования к форме оборудования для хранения углей. В частности, исследования позволили определить наиболее пожаробезопасные условия транспортирования каменных углей водным транспортом, выбрать критические геометрические параметры трюмного пространства (балкеров) и предложить наиболее

безопасный способ их складирования в виде кубической (а не прямоугольной формы, как в железнодорожном транспорте) формы. В другом случае расчетом показано, что при транспортировании угля активной марки СКД отработанного железнодорожным транспортом оптимальной формой складирования является форма вагона-хоппера.

### Список литературы

1. *Калайгорода В.В., Никулин Н.Ю., Простов С.М., Шабанов Е.А., Крупина Н.В.* Мониторинг зоны самовозгорания породугольного массива георадиолокационным методом // Известия вузов. Горный журнал. 2022. № 3. С. 95–103. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-95-103.
2. *Тимофеева С.С., Смирнов Г.И.* Риски самовозгорания угля и технологии их индикации // XXI век. Техносферная безопасность. 2022. Т. 7. № 3. С. 264–274. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2022-3-264-274>.
3. *Вогман Л.П., Простов Е.Е., Корольченко И.А.* Расчет условий теплового самовозгорания с использованием параметров кинетики термоокисления горючих дисперсных веществ // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 7. С. 5–10.
4. *Вогман Л.П., Простов Е.Е., Долгих Д.В.* Экспериментальные исследования и расчет условий теплового самовозгорания отработанного активного угля марки СКД // Пожарная безопасность. № 1 (98). 2020. С. 30–40.
5. *Попов В.Б., Ли Хи Ун, Тайлаков О.В., Соболев В.В., Кравченко С.Н.* Оценка эндогенной пожароопасности выемочных участков // Уголь. 2022. № 7. С. 56–59.
6. *Семенов Н.Н.* О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. Москва: Издательство АН СССР, 1958.
7. *Корольченко А.Я.* Пожаровзрывоопасность промышленной пыли. Москва: Химия. 1986. 216 с.
8. *Померанцев В.В., Шагалова С.Л., Резник В.А., Кушнарченко В.В.* Самовозгорание и взрывы пыли натуральных топлив. Ленинград: Энергия. Ленинградское отделение, 1978. 144 с.
9. Nusselt W. Schlagwetterschutz – Explosionsschutz. Z. VDI, Bd.68, № 10, 1924.
10. *Тодес О.М., Гольцикер А.Д., Чивилихин С.А.* Радиационный механизм формирования и развития фронта пламени в аэродисперсных системах. Докл. АН СССР, 1973. Т. 213, № 2.
11. Методика обеспечения пожарной безопасности перевозки самовозгорающихся грузов. Москва: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2006. 38 с.
12. Методика определения условий теплового самовозгорания веществ и материалов. Москва: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2004. 65 с.
13. Методика обеспечения пожарной безопасности складирования самовозгорающихся материалов. Москва: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2008. 33 с.
14. Исследование характеристик самовозгорания каменного угля / *В.А. Радионов, И.Л. Скрипник, С.Г. Ивахнюк, Т.Т. Каверзнева* // Безопасность труда в промышленности. 2025. № 3.
15. *Горшков В.И.* Самовозгорание веществ и материалов. Москва: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003. 444 с.

**Статья поступила в редакцию 25.03.2026;  
одобрена после рецензирования 27.04.2026;  
принята к публикации 22.05.2026.**

**Вогман Леонид Петрович** – доктор технических наук, главный научный сотрудник. E-mail: 3.5.2@vniipo.ru; **Болодьян Иван Ардашевич** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник. E-mail: 3.5.3@vniipo.ru; **Долгих Дмитрий Вадимович** – начальник сектора; **Простов Евгений Евгеньевич** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.

Всероссийский ордена “Знак Почета” научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), г. Балашиха, Московская область, Россия.

**Leonid P. Vogman** – Doctor of Technical Sciences, Main Researcher. E-mail: 3.5.2@vniipo.ru; **Ivan A. Bolodyan** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Main Researcher, E-mail: 3.5.3@vniipo.ru; **Dmitry V. Dolgikh** – Chief of Sector; **Evgeny E. Prostov** – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher.

All-Russian Research Institute for Fire Protection (VNIIPO), the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia), Balashikha, Moscow region, Russia.