
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Научная статья

УДК 614.841.2; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-193-208

ТЕХНОГЕННЫЕ ПОЖАРЫ ПРИ УГЛЕДОБЫЧЕ КАК ИСТОЧНИКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА

✉Тимофеева Светлана Семеновна;

Смирнов Григорий Иванович;

Зуева Валерия Александровна.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

✉[ssstimofeeva@mail.ru](mailto:sstimofeeva@mail.ru)

Аннотация. Рассмотрена проблема эндогенных пожаров при угледобыче, вызванных самовозгоранием угля и сопровождающихся неконтролируемым выбросом дыма, аэрозольных частиц черного углерода (сажи). Эндогенные пожары создают экологические риски для населения, способствуют накоплению углерода в атмосфере Земли и обеспечивают климатические изменения на больших территориях благодаря аэрозольному эффекту. Представлены результаты экспериментальных исследований по оценке дымообразующей способности углей, массе черного углерода (сажи), его фракционного состава. Установлено, что дымообразующая способность и, соответственно, содержание аэрозоля зависит от природы угля, его фракционного состава, а также непосредственно процесса горения. Масса продуктов горения зависит от природы угля, максимум оксидов серы выделяется в процессах тления каменного угля Черемховского месторождения, а оксидов азота и углерода – бурых углей Азейского и Бородинского разрезов. Максимальное количество аэрозольных частиц – черного углерода образуется в процессах тления каменных углей. Следовательно, с точки зрения экологических рисков для населения наибольшую опасность представляют эндогенные пожары на каменноугольных месторождениях. Полученные авторами настоящей публикации экспериментальные данные по оценке дымообразующей массы разных углей, массе чёрного углерода (сажи), образующейся в режиме горения и тления, фракционном составе, могут быть использованы в прогнозных оценках экологических последствий самовозгорания углей, возникающих на предприятиях, а также проблем изменения климата.

Ключевые слова: угледобыча, каменные и бурые угли, эндогенные пожары, мелкодисперсные взвешенные частицы, аэрозоли, дымообразующая способность, черный углерод, сажа, экологические риски

Для цитирования: Тимофеева С.С., Смирнов Г.И., Зуева В.А. Техногенные пожары при угледобыче как источники экологического риска // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 1 (77). С. 193–208. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-193-208

Scientific article

TECHNOGENIC FIRES IN COAL MINING AS SOURCES OF ENVIRONMENTAL RISK**Timofeeva Svetlana S.;****Smirnov Grigory I.;****Zueva Valeria A.****Irkutsk national research technical university, Irkutsk, Russia****[✉sstimofeeva@mail.ru](mailto:ssstimofeeva@mail.ru)**

Abstract. The problem of endogenous fires in coal mining caused by spontaneous combustion of coal and accompanied by uncontrolled emission of smoke, aerosol particles of black carbon (soot) is considered. Endogenous fires create environmental risks for the population, contribute to the accumulation of carbon in the Earth's atmosphere and provide climate change over large areas due to the aerosol effect. The results of experimental studies on the assessment of the smoke-forming capacity of coals, the mass of black carbon (soot), its fractional composition are presented. It has been established that the smoke-forming capacity and, accordingly, the aerosol content depend on the nature of coal, its fractional composition, and the combustion process itself. The mass of combustion products depends on the nature of coal, the maximum of sulfur oxides is released in the processes of smoldering of coal from the Cheremkhovskoye deposit, and nitrogen and carbon oxides – brown coals from the Azeysky and Borodinsky open-pit mines. The maximum amount of aerosol particles – black carbon – is formed in the processes of smoldering of coal. Consequently, from the point of view of environmental risks for the population, endogenous fires in coal deposits pose the greatest danger. The experimental data obtained by the authors of this publication on the assessment of the smoke-forming mass of different coals, the mass of black carbon (soot) formed in the combustion and smoldering mode, fractional composition, can be used in predictive assessments of the environmental consequences of spontaneous combustion of coals occurring at enterprises, as well as climate change problems.

Keywords: coal mining, hard and brown coals, endogenous fires, fine suspended particles, aerosols, smoke-forming capacity, black carbon, soot, environmental risks

For citation: Timofeeva S.S., Smirnov G.I., Zueva V.A. Technogenic fires in coal mining as sources of environmental risk // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 1 (77). P. 193–208. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-193-208

Введение

Несмотря на предпринимаемые усилия по уменьшению негативного влияния на природу и предупреждению чрезвычайных происшествий, угроза экологической безопасности сохраняется повсеместно. Среди основных мировых проблем – изменения климата, истощение природных запасов, снижение биоразнообразия и ухудшение здоровья населения вследствие загрязнения среды обитания. Особенно остро данные факторы сказываются на жителях крупных промышленных центров и районов, прилегающих к промышленным предприятиям. Учёные разных стран активно ищут пути решения этих масштабных экологических вопросов, исследуя различные направления науки и практики.

В России угледобыча, несмотря на существенное её сокращение, остаётся мощным источником экологических рисков [1], поскольку Россия обладает значительными угольными ресурсами, входит в четвёрку крупнейших стран по объёмам запасов, уступая лишь США, Австралии и Китаю. Общие российские запасы угля оцениваются примерно в 113 млрд т, что соответствует примерно 11 % общемировых резервов. Основное сосредоточение запасов приходится на южные регионы Сибири, включая Канско-Ачинский и Кузнецкий бассейны.

Среди отечественных загрязнителей природной среды угольная отрасль занимает шестое место, выделяя около 3 % атмосферных загрязнений, 7 % сброса вредных веществ в водоёмы и оказывая негативное воздействие на использование земельных ресурсов страны, составляющее порядка 9 % общей площади изъятых земель [2, 3].

Иркутская обл., наряду с Кузбассом, выступает крупным поставщиком каменного и бурого угля на экспорт, и это сопровождается существенными экологическими рисками. Основной угрозой является загрязнение воздуха, возникающее главным образом при открытой разработке месторождений. Во время взрыва пород и непосредственной добыче выделяется значительное количество пыли, а транспортировка горных масс ведёт к выбросам выхлопных газов. Под руководством профессора С.С. Тимофеевой ранее проводились исследования зон загрязнения, связанных с деятельностью Черемховского и Тулунского угольных разрезов [4].

При подземной добыче угля ситуация усугубляется наличием опасных компонентов, попадающих в атмосферу. Это включает выделение метана, тяжёлых металлов (таких как ртуть, свинец, кадмий, мышьяк), формальдегидов, серы и двуокиси кремния. В периоды аварий и возгораний в шахтах образуются выбросы токсичных летучих соединений, сажевых частиц, золошлаковых отходов, а также углекислого и угарного газов [5, 6].

Особое внимание заслуживает проблема эндогенных пожаров, вызванных самонагреванием угля, что создаёт серьёзные экологические угрозы. Самопроизвольное воспламенение породы на заброшенных и действующих карьерах представляет значительную опасность [7–11]. Пожары приводят к значительным выбросам дыма, содержащего аэрозольные частицы, которые в литературе называют сажей или чёрным углеродом, способствуют накоплению углерода в атмосфере Земли и образованию региональных климатических воздействий благодаря аэрозольному эффекту. Токсичные вещества, содержащиеся в дымовых шлейфах, распространяются на большие расстояния, охватывая значительные территории. Установлено, что чёрный углерод фиксируют даже в Арктике [12, 13]. Сажа с точки зрения атмосферного загрязнения представляет твёрдые частицы, известные как PM10 и PM2,5, с диаметром 10 и 2,5 мкм и меньше. Сажа состоит из углерода и адсорбированных токсичных веществ, прежде всего бенз(а)пирена. Попадая в атмосферу, сажа вызывает резкое снижение видимости и оказывает токсическое действие, при этом состав сажи зависит от вида сгорающего вещества. Микроскопические частицы сажи способны проникать глубоко в лёгкие в процессе дыхания и приводить к развитию лёгочных заболеваний, таких как бронхит, астма, хроническая обструктивная болезнь лёгких, пневмокониоз и др. [14].

Учёными Иркутского национального исследовательского технического университета в течение многих лет проводились исследования по оценке неучтенной экологической нагрузки, в том числе валовых выбросов сажи и канцерогенных веществ от лесных, техногенных пожаров, эндогенных угольных пожаров на территории Байкальского региона, Кузбасса. Установлено, что в год в атмосферу может поступать до 21 тыс. т оксида углерода, 18,9 тыс. т сажи и 210,5 тыс. т метана, не учитываемых стационарными постами наблюдения. Суммарный выброс может составить 250,5 тыс. т/год, что составляет примерно 18 % вредных веществ от учтённых валовых выбросов стационарных источников загрязнений [15, 16].

С точки зрения прикладной техносферной рискологии при оценке потенциальных рисков на территории следует учитывать вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций, таких как эндогенные пожары при угледобыче. Для их оценки нужны исходные данные, которые можно получить как аналитическим, так и экспериментальным путём.

Цель настоящей работы заключается в апробации методики оценки аэрозольного воздействия на атмосферу путём лабораторных исследований дымообразующих характеристик углей, добываемых в Иркутской обл., Республике Бурятия, а также проведении прогностической оценки потенциальных экологических рисков для окружающей среды и здоровья населения.

Имеющиеся в литературе данные о процессе дымообразования и влияющих на него факторах крайне разрознены и не систематизированы. Существующие лабораторные методы экспериментального определения характеристик пожарной опасности материалов во многом носят сравнительный характер и не отражают реального поведения материала при пожаре. Построение модели задымления при заданных условиях усложняется за счёт того, что в настоящее время методы оценки дымообразующей способности различных веществ и материалов все ещё далеки от совершенства, при этом точность измерения согласно ГОСТ 12.1.044–2018 «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения»¹ оценивается в пределах 15 % [17].

Для оценки дымообразующей способности используется множество методов, которые можно разделить на две основные группы – гравиметрические (измерение массы частиц дыма, осевших на фильтре) и оптические (определение плотности дыма путём измерения поглощения света). Оптический метод используется в России согласно ГОСТ 12.1.044–2018, где в статическом режиме определяется один показатель – массовый коэффициент дымообразования D_m (измеряется в $\text{м}^2/\text{кг}$). Этот коэффициент вычисляется по минимальному значению величины светопропускания, зафиксированной в режимах тления или пламенного горения, который соответствует максимальному значению оптической плотности дыма. По этому показателю горючие материалы подразделяются на 3 группы:

- Д1 – материалы с малой дымообразующей способностью (менее $50 \text{ м}^2/\text{кг}$);
- Д2 – материалы с умеренной дымообразующей способностью (от 50 до $500 \text{ м}^2/\text{кг}$);
- Д3 – материалы с высокой дымообразующей способностью (более $500 \text{ м}^2/\text{кг}$).

За рубежом наибольшее распространение получил оптический метод NFPA и его модификация LLL (Louyence Livermore Lab). Эти методы позволяют испытывать материалы, подвергаемые радиационному нагреву или воздействию пламени. При испытании дымообразующей способности материалов по методу LLL предложено дополнительно определять новый показатель – индекс непрозрачности дыма (SOI).

В США действует стандарт NFPA 263 «Метод определения скорости выделения тепла и дыма при горении твердых материалов и изделий», который описывает метод экспериментального определения скорости выделения тепла и дымообразующих веществ твёрдых материалов в лабораторных условиях. Испытания по NFPA 263 проводят в проточном воздушном калориметре, снабжённом вытяжной трубой и радиационной панелью в виде четырёх стержней карбида кремния, обеспечивающем плотность теплового потока на испытуемый образец от 0 до $100 \text{ кВт}/\text{м}^2$, системой измерения оптической плотности продуктов горения, системой измерения разности температур входящего воздуха и отходящих газов, пилотной горелкой для зажигания образца и двумя держателями образца: вертикальным и горизонтальным. Тепловая радиация воздействует только на одну поверхность плоского образца, размерами $150 \times 150 \text{ мм}$ или $110 \times 150 \text{ мм}$, поэтому все измерения относятся на единицу площади образца. Прибор определяет способность выделения тепла до $533 \text{ кВт}/\text{м}^2$ [18].

В Австралии действует стандарт AS 1530, согласно которому вертикальный образец размерами $300 \times 300 \text{ мм}$ подвергается воздействию тепловой радиации, интенсивность которой постепенно увеличивается. При проведении испытаний регистрируется время от начала опыта до возгорания и изменение пропускания света через продукты горения, отводимые от горящего образца в вытяжную трубу. Показателем дымообразования считается оптическая плотность дыма [19].

В Австрии действует стандарт ONORM B 3800 «Поведение строительных материалов и деталей при пожаре», где п. 3.2. «Образование дыма при сгорании» регламентирует метод испытаний строительных материалов на дымообразование [20]. Испытания по ONORM B 3800 проводятся на однокамерной испытательной установке, в рабочей камере которой располагается фотоэлектрическое измерительное устройство, горелка с держателем,

¹ ГОСТ 12.1.044–2018. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. М.: Стандартинформ, 2018. 195 с.

на котором крепится испытуемый образец. Показателем, по которому происходит измерение дымообразования, является величина максимального помутнения показаний источника света, измеряемых в процентах.

В странах Европейского союза действует стандарт ISO/TR 5924. Испытательная установка по ISO/TR 5924 состоит из измерительной и огневой камер, источника и приемника света, электронагревательной панели и горелки. Сущность метода состоит в определении плотности дыма (задымляемости) по отношению I/T светового потока (I), падающего на дым, и световому потоку (T), прошедшему через дым в контрольных условиях [21].

В Великобритании проводился анализ различных методов измерения дымообразующей способности веществ и материалов, который показал, что данные методы измерения дымообразования имеют низкую корреляцию. Учитывая важность такого опасного фактора пожара, как дым, работы в области совершенствования методов исследования дымообразующей способности признаны одной из наиболее перспективных задач в области пожарной безопасности [22].

Основными недостатками основного метода, существующего на настоящее время в Российской Федерации, являются следующие:

- отсутствие динамического контроля интенсивности дымообразования;
- лишь начальная масса материала без учёта конечной степени разложения и не рассматривается общее количество дыма, образующееся за время термодеструкции образца;
- размеры образца слишком малы для того, чтобы можно было представить достоверную модель распространения дыма в реальных условиях.

В настоящее время существующий метод не предполагает внесения каких-либо изменений, проведение натурных экспериментов является слишком сложным и дорогостоящим, поэтому наиболее перспективным представляется усовершенствование метода и создание алгоритма, способного более достоверно и обоснованно смоделировать распространение дыма в реальных условиях.

Для этих целей авторами была разработана методика и проведены испытания, позволяющие установить зависимость коэффициента дымообразования от размеров образцов на примере различных марок угля, а также выяснить фракционный состав сажи и выполнить прогнозную оценку экологического риска для населения, проживающего в районах с высокой вероятностью пожаров на угольных карьерах и шахтах, отвалах.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили на базе испытательной пожарной лаборатории Главного управления МЧС России по Иркутской обл. на установке, представленной на рис. 1 по методике².

Установка для определения коэффициента дымообразования состоит из камеры сгорания и измерительной камеры. Камера сгорания выполнена из нержавеющей стали, внутренняя поверхность которой теплоизолирована асбосилитовыми плитами и покрыта алюминиевой фольгой. В камере сгорания на верхней стенке под углом 45° к горизонтали установлены электронагревательная панель и держатель образца. Держатель образца закреплен на дверце камеры сгорания. В держателе установлен вкладыш из асбосилита, в центре которого имеется углубление для размещения лодочки с образцом (углубление во вкладыше выбрано таким образом, чтобы нагреваемая поверхность образца находилась на расстоянии 60 мм от электронагревательной панели). В камере сгорания имеются верхнее и нижнее отверстия, соединяющие ее с камерой измерений, запальная горелка (в данном эксперименте не использовалась).

² ГОСТ 12.1.044–2018. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. М.: Стандартинформ, 2018. 195 с.

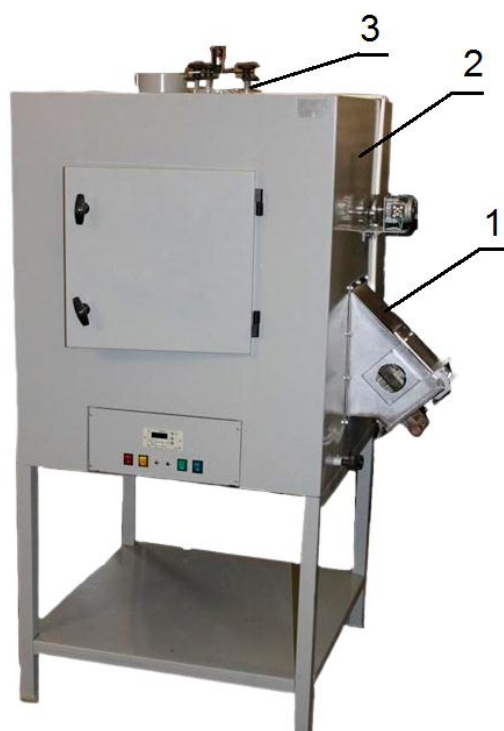


Рис. 1. Установка для определения коэффициента дымообразования:
1 – камера сгорания; 2 – камера измерений; 3 – источник света

Камера измерений, изготовленная из нержавеющей стали, имеет в верхней стенке отверстия для возвратного клапана продувки, источника света и предохранительной мембраны. На боковой стенке камеры установлен вентилятор. На передней стенке камеры имеется дверца с уплотнением из мягкой резины по периметру. В днище камеры имеются отверстия для приёмника света и возвратного клапана продувки.

Фотометрическая система состоит из источника и приёмника света. Источник света (гелий-неоновый лазер мощностью 2–5 мВт) расположен на верхней стенке камеры измерений, приёмник света (фотодиод) расположен в днище камеры. Между источником света и камерой измерений установлено защитное кварцевое стекло.

Испытания углей проводили в двух режимах – тления и горения, при этом образец помещали в лодочку, нагревали до максимальной температуры, при которой не происходит самовозгорания (для режима тления) или до самовозгорания образца (режим горения), затем определяли минимальное значение светопропускания для каждого испытания.

Были исследованы образцы угля четырех месторождений Иркутской обл. – Головинского и Черемховского (каменный уголь), Азейского и Мугунского (бурый уголь), а также угли Республики Бурятия. Каждая марка угля была представлена различными размерами фракций – крупная (7–10 мм), средняя (1–3 мм) и мелкая (менее 0,3 мм). Для каждого образца проводили по 5 испытаний, результаты обрабатывали статистически. По результатам каждого опыта вычислялся коэффициент дымообразования D_m в $\text{м}^2/\text{кг}$ по формуле:

$$D_m = \frac{V}{L \cdot m} \cdot \ln(T_0/T_{min}),$$

где V – вместимость камеры измерения, м^3 ; L – длина пути луча света в задымленной среде, м; m – масса образца, кг; T_0 , T_{min} – соответственно значения начального и конечного светопропускания, %.

Для количественной оценки сажи и продуктов горения в камеру дополнительно разместили датчики газоанализатора «ОКА-Т» на оксид углерода, диоксида серы и азота, а также аллонж с фильтрами АФА ВП-20 для сбора чёрного углерода и с последующим гравиметрическим анализом. Дополнительно в камеру измерений поместили:

– датчики при фиксации минимального значения светопропускания для каждого испытания фиксировались максимальные значения оксида углерода, диоксида серы и двуокиси азота;

– аллонжа с двойным фильтром типа АФА ВП-20 электрического аспиратора «Экотех-Урал» ПА-300М для отбора воздуха на содержание примеси сажи.

Объём аспирируемого воздуха составлял 20 дм³; длительность отбора каждой пробы в отдельности составляла 1 мин; температура воздуха в месте отбора пробы, 23 °С.

Массовую концентрацию сажи (чёрного углерода) в отдельных пробах (K_n , мг/м³) рассчитывали по формуле:

$$K_n = \frac{(m_n - m_0) \cdot 1000}{V_{20}},$$

где K_n – концентрация чёрного углерода в отдельной пробе, мг/м³; m_0 – масса фильтра до отбора пробы, мг; m_n – масса фильтра после отбора проб, мг; V_{20} – объём воздуха, отобранный для анализа и приведенный к стандартным условиям, дм³.

Приведение объёма воздуха к стандартным условиям при температуре 293 К (20 °С) и атмосферном давлении 101,33 кПа (760 мм рт. ст.) производили по формуле:

$$V_{20} = \frac{V_t \cdot 293 \cdot P}{(273 + t) \cdot 101,33},$$

где V_t – объём воздуха, отобранный для анализа, дм³; P – барометрическое давление в месте отбора проб, кПа (101,33 кПа = 760 мм рт. ст.); T – температура воздуха в месте отбора пробы, °С.

Фракционный состав чёрного углерода изучали с использованием метода мембранной фильтрации, основанного на использовании мембран с различными размерами пор для выделения фракций частиц с целью их последующего изучения. Фильтры АФА-ВП обрабатывали деионизованной водой, полученную суспензию фракционировали на мембранных фильтрах типа МФАС – ВА с отверстиями диаметром 0,8, 0,6, 0,45, 0,3 и 0,22 мкм производства ЗАО НТЦ «Владипор».

Результаты и их обсуждение

Аэрозольная нагрузка на атмосферу, обусловленная процессами самовозгорания угля и пожарами, возникающими на шахтах и разрезах, обусловлена, прежде всего, чёрным углеродом (сажей) – продуктом неполного сгорания угля, который выбрасывается непосредственно в атмосферу в виде мелких частиц (размером менее 2,5 микрон) и оказывает негативное воздействие на здоровье людей и природные экосистемы. Кратковременное и долговременное воздействие взвешенных частиц РМ_{2,5} приводит к возникновению респираторных и сердечно-сосудистых заболеваний, а также к преждевременной смерти. Частицы чёрного углерода попадают в организм человека через лёгкие в процессе дыхания, через желудочно-кишечный тракт с водой и пищей, а также через кожу и слизистые оболочки. Кроме того, чёрный углерод оказывает существенное влияние на климат, способствует прогреву атмосферы, загрязняет поверхности, влияет на стабильность облаков и выпадение осадков.

Экспериментальными исследованиями установлено, что дымообразующая способность и, соответственно, содержание аэрозоля зависит от природы угля, его фракционного состава, а также непосредственно процесса горения (табл. 1).

Таблица 1

Дымообразующая способность углей, добываемых на территории Иркутской обл.

	Каменные угли				Бурые угли			
	Головинский		Черемховский		Азейский		Мугунский	
	Горение	Тление	Горение	Тление	Горение	Тление	Горение	Тление
	м ² /кг	м ² /кг	м ² /кг	м ² /кг	м ² /кг	м ² /кг	м ² /кг	м ² /кг
Мелкий	241	475	152	219	148	216	119	166
Средний	274	565	201	289	195	345	131	214
Крупный	266	642	281	553	254	451	138	225

Также для каждой группы испытуемых образцов рассчитывалась средняя потеря массы (табл. 2).

Таблица 2

Потеря массы образцов исследованных углей

	Каменные угли				Бурые угли			
	Головинский		Черемховский		Азейский		Мугунский	
	Горение	Тление	Горение	Тление	Горение	Тление	Горение	Тление
	%	%	%	%	%	%	%	%
Мелкий	41,35	42,06	36,71	31,90	43,20	39,01	53,47	56,12
Средний	42,22	45,12	37,48	29,81	37,58	34,54	52,30	49,20
Крупный	48,70	40,61	43,23	36,70	43,42	36,22	53,33	58,03

Установлено, что потеря массы в основном зависит от марки угля, а не от размера фракций и режима горения, и в среднем составляет 43 % от начальной массы образца.

Зависимость коэффициента дымообразования от размеров фракций угля имеет сходную картину для всех исследованных образцов угля (рис. 2). Во всех случаях при тлении коэффициент дымообразования был выше, чем при пламенном горении в среднем в 1,8 раза, причём с увеличением размеров фракций угля эта разница увеличивалась (от 1,5 до 2 раз). Доказано, что с увеличением размеров фракций увеличивается и коэффициент дымообразования и по результатам испытаний достигает величины более 600 м²/кг, что характеризует уголь как горючий материал с высокой дымообразующей способностью.

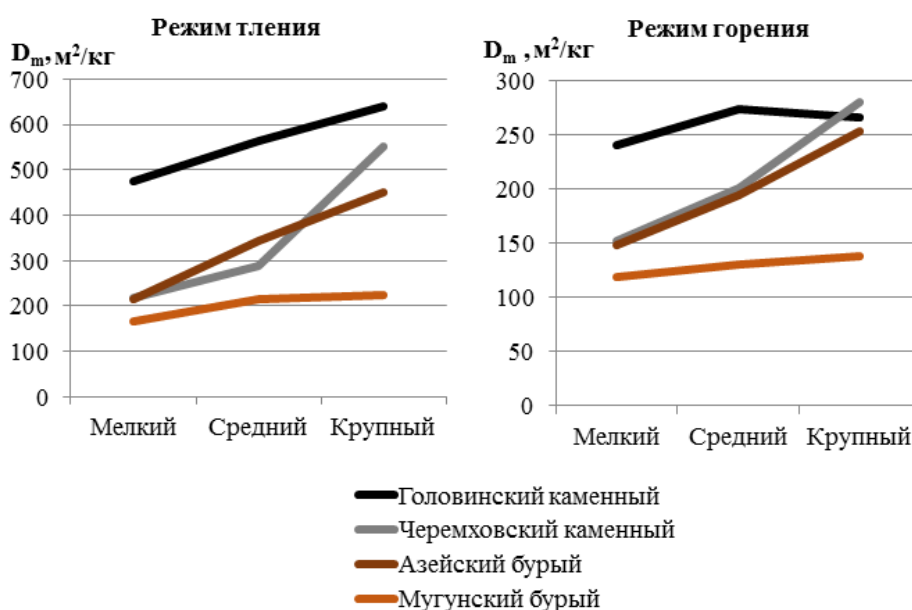


Рис. 2. Зависимость коэффициента дымообразования от размеров фракций угля

На основании экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

– повышение коэффициента дымообразования с увеличением размера фракций угля можно объяснить тем фактом, что в случае минимального размера частиц угля происходит наиболее его полное сгорание, что обусловлено относительно большей площадью поверхности горючего вещества и обеспечивает максимальный приток кислорода. В случае сгорания более крупных кусков суммарная площадь поверхности меньше и из-за недостатка кислорода полного сгорания не происходит, в результате чего в виде дыма выделяется большее число сажи и несгоревших частиц угольной массы;

– при расчётах величинами D_m для пламенного горения можно пренебречь, учитывать только коэффициент для режима тления. Это обусловлено, во-первых, большими величинами коэффициента, во-вторых тем, что, как правило, угольные пожары возникают именно в режиме тления и лишь через некоторое время может возникнуть пламенное горение;

– учитывая специфику угольных пожаров, предлагается для расчётов при построении модели задымления использовать величину коэффициента $D_m=650 \text{ м}^2/\text{кг}$, максимальную величину, полученную в результате испытаний. Данное предложение обусловлено тем, что, несмотря на множество различных теорий самовозгорания угля, все они сходятся в одном – очаг самовозгорания не возникает в цельной массе угля, это явление всегда происходит в случае нарушения целостности угольной массы и окисления мелких фракций. В связи с этим авторы считают возможным для расчётов использовать полученное экспериментальным путём значение коэффициента дымообразования, тем более что при значительном увеличении размеров фракций возможно только пламенное горение (а не тление), а в режиме пламенного горения коэффициент D_m возрастает с меньшей интенсивностью. Таким образом, несмотря на полученное экспериментальным путем подтверждение предположения о возрастании коэффициента D_m с увеличением размера фракций, в случаях, связанных с определением коэффициента дымообразования угля, лабораторные результаты можно считать достоверными при построении модели задымления.

В режиме тления были изучены закономерности выделения продуктов горения и чёрного углерода с разными углями. В табл. 3 приведены усреднённые значения (среднее из 10 определений) дымообразующей способности, газов и аэрозольных (взвешенных) частиц в процессе тления.

Таблица 3

Средняя дымообразующая способность при тлении 3, 10 г рассматриваемых марок угля

№ п/п	Исследуемые образцы	ср. D_m , $\text{м}^2/\text{кг}$	Потеря массы, %	Продукты горения			
				NO_2 , $\text{мг}/\text{м}^3$	CO , $\text{мг}/\text{м}^3$	SO_2 , $\text{мг}/\text{м}^3$	Массовая концентрация взвешенных частиц, Кп , $\text{мг}/\text{м}^3$
Рядовой каменный уголь, марки Д							
1	Черемховское месторождение	282	23	0,7	2	30	0,004
2	Олень- Шибирское месторождение	314	35	0,6	8	8	0,006
3	Никольское месторождение	457	10	0,5	7	13	0,004
Угольный концентрат, марки Д							
4	Олень-Шибирское и Никольское месторождение (Тугнуйской ОФ)	472	28	0,6	8	13	0,004
5	Черемховское месторождение (Касьяновская ОФ)	489	30	0,9	2	35	0,005

№ п/п	Исследуемые образцы	ср. D_m , м ² /кг	Потеря массы, %	Продукты горения			
				NO ₂ , мг/м ³	CO, мг/м ³	SO ₂ , мг/м ³	Массовая концентрация взвешенных частиц, Кп, мг/м ³
Рядовой бурый уголь, марки Б							
6	Азейское месторождение (АО «Разрез Азейский»)	135	54	1,4	1	13	0,002
7	Канско-Ачинский угольный бассейн («Разрез Бородинский им. М.И. Щадова»)	229	60	0,8	9	31	0,003

Как следует из приведённых данных, масса продуктов горения зависит от природы угля, максимум оксидов серы выделяется в процессах тления каменного угля Черемховского месторождения, а оксидов азота и углерода – при тлении бурых углей Азейского и Бородинского разрезов.

Максимальное количество взвешенных частиц – чёрного углерода образуется в процессах тления каменных углей.

Следовательно, с точки зрения экологических рисков для населения наибольшую опасность представляют эндогенные пожары на каменноугольных месторождениях.

Авторами детально исследованы взвешенные частицы, образующиеся при тлении каменного угля. На рис. 3 представлены микрофотографии взвешенных частиц, образовавшихся в процессе тления угольного концентрата, производимого на Тугнуйской обогатительной фабрике. Фото получено на сканирующем электронном микроскопе Jeol JIB-Z4500.

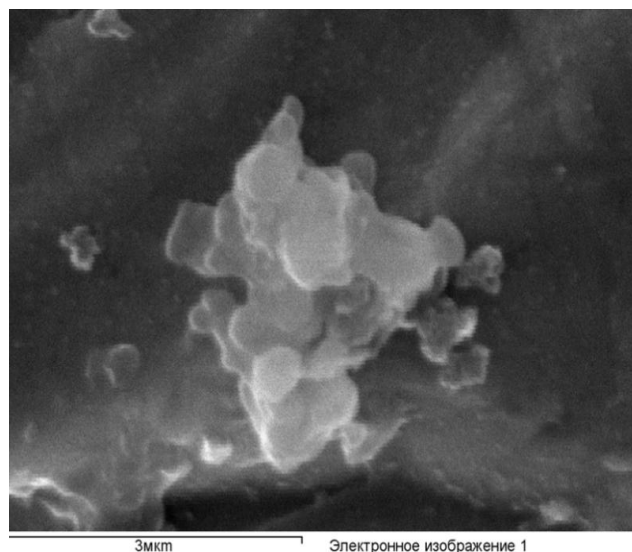


Рис. 3. Микрочастицы, образовавшихся в процессе тления угля (угольный концентрат, марка Д, место отбора – Тугнуйская обогатительная фабрика (Олонь-Шибирское и Никольское месторождение))

Фракционный состав взвешенных частиц, образовавшихся в процессе тления угля, определяли на сканирующем электронном микроскопе Jeol JIB-Z4500 с помощью энергодисперсионного детектора X-max 80 мм² фирмы OXFORD INSTRUMENTS, снабжённого дополнительной установкой анализатора EDS (энергодисперсионный рентгеновский спектрометр) (рис. 4).

В табл. 4 представлен элементный состав взвешенных частиц, образовавшихся в процессе тления угля на примере угольного концентрат, марка Д, место отбора – Тугнуйская обогатительная фабрика (Олонь-Шибирское и Никольское месторождение), и установлено, что одним из основных компонентов этого фракционного состава является углерод (сажа) (75,49 %).

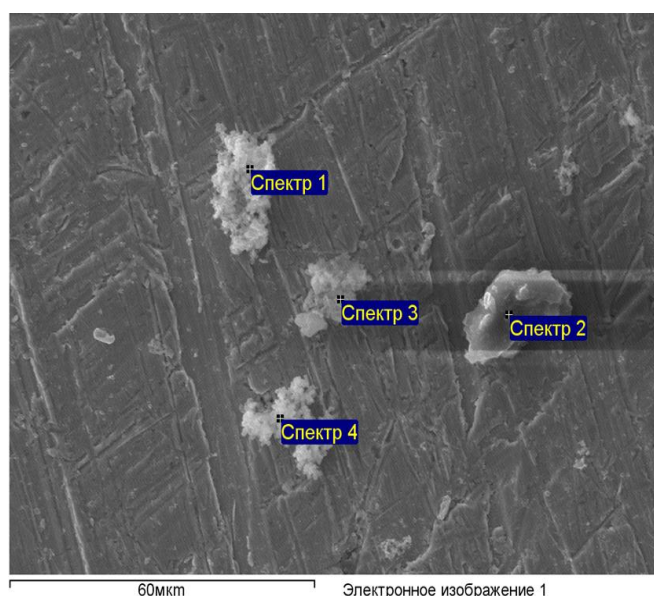


Рис. 4. Определение элементарного взвешенных частиц, образовавшихся в процессе тления угля, на сканирующем электронном микроскопе Jeol JIV-Z4500 (угольный концентрат, марка Д, место отбора – Тугнуйская обогатительная фабрика (Олонь-Шибирское и Никольское месторождение)

Таблица 4

Элементный состав взвешенных частиц, образовавшихся в процессе горения угля на примере угольного концентрат, марка Д, место отбора – Тугнуйская обогатительная фабрика (Олонь-Шибирское и Никольское месторождение), % (масс.)

Спектр	С	О	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	Итог
Спектр 1	75,49	24,51								100,00
Спектр 2	53,40	18,40	8,71	15,91		2,27		0,39	0,91	100,00
Спектр 3	67,92	28,48	0,63	0,89	0,97		0,21		0,91	100,00
Спектр 4	60,60	34,95		0,29	1,08				3,08	100,00
Макс.	75,49	34,95	8,71	15,91	1,08	2,27	0,21	0,39	3,08	
Мин.	53,40	18,40	0,63	0,29	0,97	2,27	0,21	0,39	0,91	

Образование чёрного углерода (ЧУ) при тлении каменного угля оценивается в весьма широких пределах, от 2,10–4 до 1,10–3 г ЧУ на 1 кг горящего угля.

При изучении фракционного состава ЧУ методом мембранной фильтрации установлено, что содержание наночастиц колеблется в от 6 до 8 % от общей массы микрочастиц (рис. 5 и табл. 5).

Таблица 5

Содержание наноразмерных частиц сажи в продуктах, образующихся в процессах тления каменных и бурых углей, исследуемых методом мембранной фильтрации

Наименование образцов	Размер частиц d, мкм				
	0,8	0,6	0,45	0,3	0,22
Содержание частиц, %					
Черемховское месторождение	2,6	3	0,51	0,4	0,1
Олонь-Шибирское месторождение	2,5	1,8	0,4	0,2	0,1
Никольское месторождение	2,6	2	0,5	0,3	0,1
Олонь-Шибирское и Никольское месторождения (Тугнуйской ОФ)	2,6	4,3	0,5	0,2	0,2

Наименование образцов	Размер частиц d, мкм				
	0,8	0,6	0,45	0,3	0,22
Черемховское месторождение (Касьяновская ОФ)	2,5	2,9	0,4	0,3	0,1
Азейское месторождение (АО «Разрез Азейский»)	2,1	1,5	0,5	0,3	0,1
Канско-Ачинский угольный бассейн («Разрез Бородинский имени М.И. Щадова»)	2,6	4,3	0,5	0,2	0,2



Рис. 5. Черный углерод (сажа) размером 0,8–0,22 мкм, осаждённая на мембранном фильтре типа МФАС – ВА отверстиями диаметром от 0,8 до 0,22 мкм производства ЗАО НТЦ «Владипор» (угольный концентрат, марка Д, место отбора – Тугнуйская обогатительная фабрика (Олонь-Шибирское и Никольское месторождение)

Учитывая высокую канцерогенность чёрного углерода (сажи) и зная экспериментально полученные концентрации, выделяемые при тлении углей, можно спрогнозировать канцерогенные риски на территориях, подверженных действию пожаров:

– средняя концентрация химического вещества, воздействующая в период экспозиции, $C - 2,04 \cdot 10^{-6}$;

– суточное потребление воздуха, $CR - 20, \text{ м}^3/\text{сут}$;

– частота воздействий, число, $EF - 365 \text{ дн./год}$;

– масса тела: средняя масса тела в период экспозиции, $BW - 70 \text{ кг}$;

– период усреднения экспозиции, $AT - 365 \text{ дн.}$;

– средняя суточная доза поступления химического вещества в организм человека,

$$I = \frac{C \cdot CR \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT} - 2,9 \cdot 10^{-6};$$

– фактор канцерогенного потенциала, $SF - 3,9 \text{ мг/кг день}^{-1}$;

– индивидуальный канцерогенный риск, $CR = LADD \cdot SF - 1,131 \cdot 10^{-5}$;

– средняя численность человек населения города – 34,9 тыс. чел.;

– оценка величины популяционного канцерогенного риска – 0,39.

Рассчитана величина популяционного канцерогенного риска, способного возникнуть на протяжении жизни вследствие ингаляционного воздействия чёрного углерода (сажи) и привести к злокачественным новообразованиям для населения, проживающего вблизи от эндогенных пожаров на угольных месторождениях.

Самонагревание угля опасно для жизни персонала, аварийно-спасательные служб и населения прилегающих территорий, так как они одни из первых встречаются с негативным воздействием токсических продуктов горения.

Заключение

На сегодняшний день проблема пожаров на объектах угледобычи в России остаётся закрытой, отсутствуют официально опубликованные данные об оценке экологического риска при пожарах, вызванных самовозгоранием угля. Полученные авторами экспериментальные данные по оценке дымообразующей массы разных углей, массе чёрного углерода (сажи), образующейся в режиме горения и тления, фракционном составе, могут быть использованы в прогнозных оценках экологических последствий самовозгорания углей, возникающих на предприятиях, а также проблем изменения климата. По оценкам М. Якобсона, от 15 до 30 % глобального потепления обусловлено именно эмиссией сажевых частиц [23]. В воздухе сажа поглощает солнечную энергию и излучает инфракрасную (тепловую) радиацию, а после выпадения на земную поверхность увеличивает количество поглощённой солнечной энергии поверхностью, тем самым способствуя её дополнительному разогреву. Наиболее критично это в зонах, покрытых снегом и льдом (в полярных областях и горных районах), где ускоряется таяние льдов.

Список источников

1. Тимофеева С.С., Смирнов Г.И. Риски самовозгорания угля и технологии их индикации // XXI век. Техносферная безопасность. 2022. Т. 7. № 3. С. 264–274. DOI: 10.21285/2500-1582-2022-3-264-274
2. Забелин В.И., Ондар С.О. Экологические риски при разработке месторождений каменного угля в Туве // Проблемы анализа риска. 2020. Т. 17. № 3. С. 16–29. DOI: 10.32686/1812-5220-2020-17-3-16-29
3. Чистникова И.В. Устойчивое развитие угольной промышленности России // Уголь. 2022. № 11. С. 25–31. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-11-25-31
4. Тимофеева С.С. Экологические и профессиональные риски при добыче угля открытым способом // Уголь. 2010. № 1. С. 25–26.
5. Луговцова Н.Ю. Оценка вклада горящих угольных отвалов в радиоэкологическую обстановку Кемеровской области // Безопасность в техносфере. 2017. Т. 6. № 4. С. 31–36.
6. Гендлер С.Г., Братских А.С. Актуальные проблемы возгорания угольных скоплений в породных отвалах // Горная промышленность. 2024. № 5S. С. 71–77. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5S-71-77
7. Северина В.А., Тимофеев С.С. Оценка экологической нагрузки при пожарах при добыче и транспортировке углей // XXI век. Техносферная безопасность. 2020. № 5 (2). С. 187–197. DOI: 10.21285/2500-1582-2020-2-187-19
8. Lugovtsova N.Yu. Studies of total harmful gas flows on the ground surface from spontaneous mine fires in Kuzbass // Eurasian mining. 2017. № 2. P. 43–48. DOI: 10.17580/em.2017.02.11
9. Study on the evolution characteristics of coal spontaneous combustion and gas coupling disaster region in goaf / Yu. Zheng [et al.] // Fuel. 2023. Vol. 349. P. 128505. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.128505
10. Vegetation growth status as an early warning indicator for the spontaneous combustion disaster of coal waste dump after reclamation: An unmanned aerial vehicle remote sensing approach / H. Ren [et al.] // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 317. P. 115502. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115502
11. Transformation and migration of key elements during the thermal reaction of coal spontaneous combustion / Yu. Zhang [et al.] // Energy. 2024. Vol. 290. P. 130212. DOI: 10.1016/j.energy.2023.130212
12. Гендлер С.Г., Степанцова А.Ю., Попов М.М. Обоснование безопасной эксплуатации закрытого угольного склада по газовому фактору // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16519. С. 72–82. URL: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16519/16330> (дата обращения: 30.05.2025).

13. Горбанев С.А., Никанов А.Н., Чашин В.П. Актуальные проблемы медицины труда в Арктической зоне Российской Федерации // Медицина труда и промышленная экология. 2017. № 9. С. 50–51.

14. Chen J., Hoek G. Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis // Environment International. 2020. Vol. 143. P. 105974. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105974

15. Белых Л.И., Гармышев В.В., Тюкалова О.В. Выбросы бенз(а)пирена и оксида углерода от лесных пожаров как источник загрязнения атмосферы Иркутской области // Экология и промышленность России. Т. 28 № 5 (2024). С. 54–59. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-5-54-59

16. Тимофеева С.С., Гармышев В.В., Астраханцева А.Ю. Сравнительный анализ экологических рисков природных пожаров на территории Байкальского региона // Безопасность техногенных и природных систем. 2022. № 4. С. 22–29. DOI: 10.23947/2541-9129-2022-4-22-29

17. Способ определения дымообразующей способности твердых веществ и материалов: пат. 2418294 Рос. Федерация № 2009140559/28; заявл. 02.11.09; опубл. 10.05.11, Бюл. № 13. 2 с.

18. Ипатьев А.В., Яглов В.Н. Дымообразующая способность веществ и материалов (физико-химические процессы, методы исследований, способы управления). Минск: Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований, 2002. 72 с.

19. Мустафин В.М., Пузач С.В. Методы определения дымообразующей способности веществ и материалов. Особенности измерения // Проблемы техносферной безопасности: материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных и специалистов. 2021. № 10. С. 56–61.

20. ONORM B 3800-1. Behaviour of building materials and components in fire; building materials: definitions, requirements, tests. W., 1979. 20 p.

21. ISO/TR 5924:1989. Fire tests – Reaction to fire – Smoke generated by building products 1 (dual-chamber test). G.: International Organization for Standardization. 13 p.

22. Fire behaviour and smoke modelling: model improvement and measurement needs for next-generation smoke research and forecasting systems / Yu. Liu [et al.] // International Journal of Wildland Fire. 2019. № 28 (8). P. 570–588. DOI: 10.1071/WF18204

23. Jacobson M.Z. Atmospheric pollution: History, Science and Regulation. C.: Cambridge university press. URL: <https://catdir.loc.gov/catdir/samples/cam033/2001037645.pdf> (дата обращения: 31.05.2025).

References

1. Timofeeva S.S., Smirnov G.I. Riski samovozgoraniya uglya i tekhnologii ih indikacii // XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2022. Т. 7. № 3. С. 264–274. DOI: 10.21285/2500-1582-2022-3-264-274

2. Zabelin V.I., Ondar S.O. Ekologicheskie riski pri razrabotke mestorozhdenij kamennogo uglya v Tuve // Problemy analiza riska. 2020. Т. 17. № 3. С. 16–29. DOI: 10.32686/1812-5220-2020-17-3-16-29

3. Chistnikova I.V. Ustojchivoe razvitie ugol'noj promyshlennosti Rossii // Ugol'. 2022. № 11. С. 25–31. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-11-25-31

4. Timofeeva S.S. Ekologicheskie i professional'nye riski pri dobyche uglya otkryтым sposobom // Ugol'. 2010. № 1. С. 25–26.

5. Lugovcova N.Yu. Ocenka vklada goryashchih ugol'nyh otvalov v radioekologicheskuyu obstanovku Kemerovskoj oblasti // Bezopasnost' v tekhnosfere. 2017. Т. 6. № 4. С. 31–36.

6. Gendler S.G., Bratskih A.S. Aktual'nye problemy vozgoraniya ugol'nyh skoplenij v porodnyh otvalah // Gornaya promyshlennost'. 2024. № 5S. С. 71–77. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5S-71-77

7. Severina V.A., Timofeev S.S. Ocenka ekologicheskoy nagruzki pri požarah pri dobyche i transportirovke uglej // XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2020. № 5 (2). S. 187–197. DOI: 10.21285/2500-1582-2020-2-187-19
8. Lugovtsova N.Yu. Studies of total harmful gas flows on the ground surface from spontaneous mine fires in Kuzbass // Eurasian mining. 2017. № 2. R. 43–48. DOI: 10.17580/em.2017.02.11
9. Study on the evolution characteristics of coal spontaneous combustion and gas coupling disaster region in goaf / Yu. Zheng [et al.] // Fuel. 2023. Vol. 349. P. 128505. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.128505
10. Vegetation growth status as an early warning indicator for the spontaneous combustion disaster of coal waste dump after reclamation: An unmanned aerial vehicle remote sensing approach / H. Ren [et al.] // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 317. P. 115502. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115502
11. Transformation and migration of key elements during the thermal reaction of coal spontaneous combustion / Yu. Zhang [et al.] // Energy. 2024. Vol. 290. P. 130212. DOI: 10.1016/j.energy.2023.130212
12. Gendler S.G., Stepancova A.Yu., Popov M.M. Obosnovanie bezopasnoj ekspluatacii zakrytogo ugol'nogo sklada po gazovomu faktoru // Zapiski Gornogo instituta. 2025. T. 272. № 16519. S. 72–82. URL: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16519/16330> (data obrashcheniya: 30.05.2025).
13. Gorbanev S.A., Nikanov A.N., Chashchin V.P. Aktual'nye problemy mediciny truda v Arkticheskoy zone Rossijskoj Federacii // Medicina truda i promyshlennaya ekologiya. 2017. № 9. C. 50–51.
14. Chen J., Hoek G. Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis // Environment International. 2020. Vol. 143. P. 105974. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105974
15. Belyh L.I., Garmyshev V.V., Tyukalova O.V. Vybrosoy benz(a)pirena i oksida ugleroda ot lesnyh požarov kak istochnik zagryazneniya atmosfery Irkutskoj oblasti // Ekologiya i promyshlennost' Rossii. T. 28. № 5 (2024). S. 54–59. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-5-54-59
16. Timofeeva S.S., Garmyshev V.V., Astrahanceva A.Yu. Sravnitel'nyj analiz ekologicheskikh riskov prirodnyh požarov na territorii Bajkal'skogo regiona // Bezopasnost' tekhnogennyh i prirodnyh sistem. 2022. № 4. S. 22–29. DOI: 10.23947/2541-9129-2022-4-22-29
17. Sposob opredeleniya dymoobrazuyushchej sposobnosti tverdyh veshchestv i materialov: pat. 2418294 Ros. Federaciya № 2009140559/28; zayavl. 02.11.09; opubl. 10.05.11, Byul. № 13. 2 s.
18. Ipat'ev A.V., Yaglov V.N. Dymoobrazuyushchaya sposobnost' veshchestv i materialov (fiziko-himicheskie processy, metody issledovaniy, sposoby upravleniya). Minsk: Belorusskij respublikanskij fond fundamental'nyh issledovaniy, 2002. 72 s.
19. Mustafin V.M., Puzach S.V. Metody opredeleniya dymoobrazuyushchej sposobnosti veshchestv i materialov. Osobennosti izmereniya // Problemy tekhnosfernoj bezopasnosti: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodyh uchyonyh i specialistov. 2021. № 10. S. 56–61.
20. ONORM V 3800-1. Behaviour of building materials and components in fire; building materials: definitions, requirements, tests. W., 1979. 20 p.
21. ISO/TR 5924:1989. Fire tests – Reaction to fire – Smoke generated by building products 1 (dual-chamber test). G.: International Organization for Standardization. 13 p.
22. Fire behaviour and smoke modelling: model improvement and measurement needs for next-generation smoke research and forecasting systems / Yu. Liu [et al.] // International Journal of Wildland Fire. 2019. № 28 (8). P. 570–588. DOI: 10.1071/WF18204
23. Jacobson M.Z. Atmospheric pollution: History, Science and Regulation. S.: Cambridge university press. URL: <https://catdir.loc.gov/catdir/samples/cam033/2001037645.pdf> (data obrashcheniya: 31.05.2025).

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 25.09.2025; одобрена после рецензирования: 11.11.2025; принята к публикации: 26.11.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 25.09.2025; approved after review: 11.11.2025; accepted for publication: 26.11.2025

Информация об авторах:

Тимофеева Светлана Семеновна, заведующая кафедрой промэкологии и БЖД Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83), доктор технических наук, профессор, e-mail: timofeevass@ex.istu.edu, <https://orcid.org/0000-0001-8427-3732>, SPIN-код: 8427-9622

Смирнов Григорий Иванович, учебный мастер 1 категории кафедры промэкологии и БЖД Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83), e-mail: smirnovgi@ex.istu.edu, <https://orcid.org/0000-0003-2939-005X>, SPIN-код: 8629-1347

Зуева Валерия Александровна, аспирант кафедры промэкологии и БЖД Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83), e-mail: lera.severina.94@mail.ru

Information about the authors:

Timofeeva Svetlana S., head of the department of industrial ecology and life safety of Irkutsk National research technical university (664074, Irkutsk, Lermontov Street 83), doctor of technical sciences, professor, e-mail: timofeevass@ex.istu.edu, <https://orcid.org/0000-0001-8427-3732>, SPIN: 8427-9622

Smirnov Grigory I., 1st category training master of the department of industrial ecology and life safety of Irkutsk national research technical university (664074, Irkutsk, Lermontov Str., 83), e-mail: smirnovgi@ex.istu.edu, <https://orcid.org/0000-0003-2939-005X>, SPIN: 8629-1347

Zueva Valeria A., postgraduate student of the department of industrial ecology and life safety of Irkutsk national research technical university (664074, Irkutsk, Lermontov Str., 83), e-mail: lera.severina.94@mail.ru