

Актуальные проблемы возгорания угольных скоплений в породных отвалах

С.Г. Гендлер, А.С. Братских✉

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ khodyreva.anastasia.26@gmail.com

Резюме: В статье подчеркивается актуальность проблемы возникновения эндогенных пожаров в угольных отвалах. Несмотря на значительные трудовые, экологические и экономические потери, связанные с самовозгоранием, компании зачастую пренебрегают превентивными мероприятиями. Исследование осуществлялось путем систематического анализа научных публикаций, размещенных в базах данных Web of Science, Scopus, Google Scholar и Elibrary, а также в специализированных журналах и на научных ресурсах. Анализ показывает, что предупреждение самовозгорания более эффективно по сравнению с ликвидацией последствий. Разработка эффективных превентивных мероприятий возможна только при понимании сочетанного воздействия факторов, влияющих на процесс возникновения и развития эндогенных пожаров. На сегодняшний день сформирована широкая экспериментальная и теоретическая база данных, описывающая влияние отдельных факторов на развитие эндогенных пожаров, однако до сих пор отсутствует методика оценки сочетанного воздействия влияющих факторов. В рамках дальнейших исследований планируется разработка математической модели для оценки сочетанного воздействия метеорологических и горно-геологических факторов на развитие эндогенных пожаров.

Ключевые слова: эндогенные пожары, самовозгорание угля, породный отвал, горное дело, безопасность труда, риск-ориентированный подход, окисление угля, пожар, склонность к самовозгоранию

Для цитирования: Гендлер С.Г., Братских А.С. Актуальные проблемы возгорания угольных скоплений в породных отвалах. *Горная промышленность*. 2024;(5S):71–77. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-71-77>

Actual problems of coal accumulations ignition in rock dumps

S.G. Gendler, A.S. Bratskih✉

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation
✉ khodyreva.anastasia.26@gmail.com

Abstract: The article emphasizes the relevance of the problem of spontaneous fires in coal dumps. Despite significant labor, environmental, and economic losses associated with spontaneous combustion, companies often overlook preventive measures. The study was done through a systematic analysis of research publications published on the Web of Science, Scopus, Google Scholar and Elibrary databases, as well as in dedicated journals and academic resources. However, analysis shows that preventing spontaneous combustion is more effective compared to dealing with its consequences. The development of effective preventive measures is only possible with an understanding of the combined impact of factors influencing the occurrence and development of spontaneous fires. A broad experimental and theoretical database has already been created that describes the effects of individual factors on the development of spontaneous fires. However, there is still no methodology to assess the combined effects of the impact factors. Further research is planned to develop a mathematical model for assessing the combined effect of meteorological and mining-geological factors on the development of spontaneous fires.

Keywords: spontaneous fires, spontaneous combustion of coal, waste rock dump, mining, occupational safety, risk-oriented approach, oxidation of coal, fire, propensity for spontaneous combustion

Acknowledgments: The article was prepared within the framework of the state assignment on the topic No. FMEZ-2022-0009.

For citation: Gendler S.G., Bratskih A.S. Actual problems of coal accumulations ignition in rock dumps. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):71–77. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-71-77>

Введение

Горная добыча, будучи одной из наиболее опасных видов промышленной деятельности, сталкивается с рядом серьезных проблем, среди которых особое внимание привлекает возникновение эндогенных пожаров в породных отвалах. Процесс самовозгорания угля происходит медленно, поскольку уголь обладает низкой способностью адсорбировать кислород в обычных климатических условиях [1; 2]. Для достижения температур в диапазоне 80–120 °C требуется длительное время, где продолжительность может варьироваться от 30 до 150 дней и зависит от ряда факторов [3]. Ключевым условием для начала самовоспламенения является непрерывное поступление кислорода к угольным отложениям и сопутствующим породам. Эндогенные пожары способны возникать даже в минералах, где содержание угля составляет 10–20% [4]. Очаг самовозгорания формируется в области, где разница между образующимся и рассеиваемым теплом достигает максимума. Главными источниками тепла в процессе самовозгорания являются реакции окисления горючих элементов, таких как углерод, водород и сера, что приводит к выделению опасных газов, включая угарный газ, сероводород и сернистый ангидрид [5; 6].

Одной из ключевых задач горного дела является обеспечение безопасности труда, экологической защиты и непрерывности технологических процессов. Однако развитие эндогенных пожаров, которых на отдельных разрезах фиксируется до 300 в год, осложняет горные работы и увеличивается с ростом добычи угля и расширением областей вскрытия угольных пластов [7]. Самовозгорание отвалов сопровождается выделением токсичных газов и аэрозолей, что негативно влияет на здоровье работников, вызывая заболевания дыхательных путей, такие как бронхит, астма, хроническая обструктивная болезнь легких, пневмокониоз, а также приводит к травмам от ожогов и ингаляционных повреждений [8–10].

С точки зрения экологической безопасности самовозгорание углей является источником значительных выбросов углекислого газа CO₂, что усиливает риск лесных пожаров и загрязняет реки продуктами горения [11; 12]. Данный процесс ведет к утрате земель и нарушению экосистем, а выбросы парниковых газов в глобальном масштабе могут влиять на изменение климата [13]. Кроме того, летучие элементы, такие как мышьяк, фтор, ртуть и селен, выделяются при горении и могут представлять опасность для жителей через ингаляцию или попадание в пищевые цепи.

Методы

Исследование осуществлялось путем систематического анализа академических статей, научных публикаций и других доступных источников данных, связанных с темой исследования. Поиск литературы осуществлялся в базах данных Web of Science, Scopus, Google Scholar и Elibrary, а также в специализированных журналах и на научных ресурсах.

Для определения актуальности и релевантности исследуемой проблематики были использованы ключевые слова и фразы, такие как эндогенные пожары, самовозгорание угля, окисление угля, угольные отвалы. Затем проведен отбор и анализ литературы с целью выделения наиболее значимых исследований, содержащих информацию, соответствующую целям и задачам литературного обзора. Проведен анализ 102 статей, из которых 38 внесены в данный аналитический обзор.

Анализ литературных данных включал в себя сортировку и категоризацию источников, выделение основных тем, концепций и результатов, а также критическую оценку методологии исследований. Полученные результаты были суммированы, интерпретированы и представлены в данном обзоре.

Результаты

Зачастую компании применяют исключительно реактивные мероприятия, при этом разработка и внедрение превентивных мер игнорируются ввиду своей недостаточной эффективности и существенной экономической нагрузки. Тем не менее критически важно сосредоточиться на способах предупреждения эндогенных пожаров, поскольку только в этом случае возможно предотвратить возникновение аварий и несчастных случаев, снижая потенциальные угрозы для здоровья работников. Для обнаружения процесса самовозгорания угля применяется контроль температуры штабелей посредством пирометров, тепловизоров и контактных термометров [13; 14]. Однако указанные приборы фиксируют только заметные температурные аномалии в связи с низкой теплопроводностью угля и вмещающих пород [15]. Таким образом, данный метод позволяет обнаружить исключительно существующие очаги возгорания и не может относиться к превентивным.

Существующие мероприятия способны решить проблему, но их эффективность характеризуется краткосрочностью. Более того, несмотря на ряд преимуществ, они часто сопряжены с одним общим недостатком – значительными экономическими затратами [16–18]. Компании склонны рассматривать ликвидацию последствий пожаров как более экономически обоснованный подход нежели применение превентивных мероприятий [19]. В данном контексте результативным может считаться подход, направленный на борьбу с источниками самовозгорания, а не с его последствиями. Для обоснованного выбора применяемых мероприятий необходимо понимать факторы, определяющие эндогенную пожароопасность разрезов, а также механизм и степень их проявления.

Процесс самонагревания и самовозгорания скопления угля проходит в несколько стадий, различающихся как температурой, так и механизмом окисления. Устойчивому горению предшествуют три стадии: низкотемпературное окисление, самонагревание и самовозгорание (рис. 1) [20].

Авторы работы «Моделирование самовозгорания угля» [21] представили математическую модель возникновения самовоспламенения угля. Выведенные формулы преимущественно опираются на сочетанное воздействие физико-химических свойств угля, теплопередачи, окислителя, водяного пара и содержания влаги в угле.

Данная модель основана на следующих предположениях:

- модель одномерная;
- рассматривается отвал горизонтальный цилиндрической формы;
- на внешних поверхностях отвала происходят потери тепла;
- рассматривается только вынужденная конвекция воздуха;
- отвал однородный и изотропный с однородными сферическими частицами угля;
- плотность угля остается постоянной в процессах окисления, испарения и конденсации;

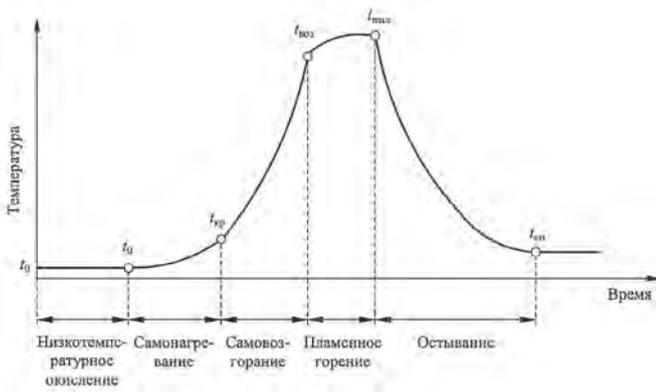


Рис. 1
Стадии эндогенного пожара:
 t_0 – естественная температура угля;
 $t_{кр}$ – критическая температура;
 $t_{воз}$ – температура возгорания;
 t_{max} – максимальная температура очага;
 $t_{сн}$ – температурный критерий потушенного пожара

Источник: [20]

Fig. 1
Stages of a spontaneous fire:
 t_0 – natural coal temperature;
 $t_{кр}$ – critical temperature;
 $t_{воз}$ – ignition temperature;
 t_{max} – maximum hearth temperature;
 $t_{сн}$ – temperature criterion of extinguished fire

Source: [20]

– изменение расхода газа за счет потребления кислорода, образования CO и CO₂, испарения и конденсации не учитывается;

– теплота смачивания по сравнению с теплотой конденсации незначительна;

– скорость потребления кислорода, описываемая уравнением Аррениуса, предполагается первой по концентрации кислорода.

Авторы предлагают моделирование отвала посредством шести одномерных дифференциальных уравнений, зависящих от времени. Это сохранение кислорода, влаги и энергии для газовой и твердой фаз.

Сохранение массы кислорода в газовой фазе:

$$(1-\alpha) \frac{\partial \rho_{1o}}{\partial t} + V \frac{\partial \rho_{1o}}{\partial x} = D_{1o}^{(e)} (1-\alpha) \frac{\partial^2 \rho_{1o}}{\partial x^2} - \alpha \varepsilon \rho_{1o} k. \quad (1)$$

Массовый баланс кислорода в угольной частице:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{20}^{(e)} \frac{\partial \rho_{20}}{\partial r} r^2 \right) = \rho_{1o} k. \quad (2)$$

Сохранение влаги в газовой фазе:

$$(1-\alpha) \frac{\partial \rho_{1w}}{\partial t} + V \frac{\partial \rho_{1w}}{\partial x} = D_{1w}^{(e)} (1-\alpha) \frac{\partial^2 \rho_{1w}}{\partial x^2} + \alpha r_w. \quad (3)$$

Сохранение влаги в твердой фазе:

$$-\rho_s \frac{W'_0}{W_0} \frac{\partial w}{\partial t} = r_w = \rho_s K_w (w^* - w). \quad (4)$$

Сохранение энергии для твердой фазы:

$$\alpha \rho_s c_p \frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha \lambda_s^{(e)} \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{3}{R} \alpha h (T_g - T_s) - \alpha \Delta H_w r_w + \alpha \varepsilon \Delta H_0 \rho_{10} k - \frac{4}{\Phi} K_{sur} (T_s - T_a), \quad (5)$$

Сохранение энергии для газовой фазы:

$$(1-\alpha) \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g c_g + \rho_w c_w) T_g + V \frac{\partial}{\partial x} (\rho_g c_g + \rho_w c_w) T_g = (1-\alpha) \lambda_g^{(e)} \frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2} - \frac{3}{R} \alpha h (T_g - T_s). \quad (6)$$

Номенклатура уравнений (1)–(6):

c_p – удельная теплоемкость;

D – коэффициент диффузии;

ΔH_0 – теплота реакции кислорода с углем;

ΔH_w – теплота испарения воды;

k – скорость реакции;

r_w – скорость конденсации водяного пара;

T – температура;

V – скорость газа;

w – влажность угля;

w^* – баланс влаги;

W_0 – начальная влажность угля по влажному основанию;

W'_0 – начальная влажность угля по сухому основанию;

α – степень уплотнения угольного пласта;

ε – коэффициент эффективности окисления;

λ – теплопроводность;

α – плотность;

ρ – диаметр колонны отвала.

Индексы в уравнениях (1)–(6):

g – газ;

s – твердая фаза;

w – водяной пар;

o – кислород;

a – условия окружающей среды;

1 – газовая фаза;

2 – твердая фаза.

Можно утверждать, что процесс окисления угольных частиц при низких температурах определяется как скоростью химической реакции, так и темпом диффузии в порах. В этом состоянии кислород способен достигать центра частицы, однако по мере повышения температуры или увеличения размера частиц в их внутренней структуре возникает градиент концентрации кислорода. Эффект изменения общей скорости окисления в зависимости от размеров частиц и температуры можно охарактеризовать посредством коэффициента эффективности. Этот коэффициент представляет собой соотношение между фактической объемной скоростью окисления и ее максимальным значением. Коэффициент эффективности определяется через аналитическое решение уравнения, описывающего баланс массы кислорода внутри частицы.

Анализ научной литературы позволяет представить следующую классификацию факторов, влияющих на процессы самовозгорания: горно-геологические и климатические [22]. Горно-геологические условия определяются породами, а также геологическим строением месторождения.

Метаморфизм углей существенно влияет на склонность

породных отвалов к самовозгоранию. Бурые угли, характеризующиеся наименьшей критической температурой самонагревания, обладают наибольшей склонностью к возгоранию, в то время как с ростом степени метаморфизма эта склонность уменьшается из-за изменений физических и химических свойств углей [23].

Химический состав отвала, включая содержание галогенов и сульфидной серы, влияет на окислительные процессы: низкое содержание галогенов снижает вероятность возгорания, тогда как высокая концентрация серы, особенно более 4%, увеличивает риск [24]. Зольность свыше 16% способствует самовозгоранию за счет улучшения теплоотделения и доступа кислорода [25].

На склонность угольных отвалов к самовозгоранию, помимо химического состава, влияют физико-механические свойства углей, такие как пористость, влажность, газоносность и теплопроводность [26; 27]. Теплопроводность угля важна, поскольку уголь аккумулирует и передает тепло, образующееся при окислении, а высокая концентрация минеральных веществ повышает теплопроводность за счет более эффективного распределения тепловой энергии.

Пористость вмещающей породы определяет циркуляцию газов и важна для возникновения эндогенных пожаров. Размер обломков породы влияет на контакт с кислородом: крупные обломки, находящиеся в нижней части отвала, создают пустоты, через которые воздух проникает внутрь и активизирует окисление [28].

Климатические факторы также играют значительную роль, способствуя активации химических реакций и самовоспламенению внутри отвала. Скорость окислительных процессов угля увеличивается с ростом окружающей температуры, что особенно важно для угольных отвалов в теплых климатических зонах. Уголь, не склонный к самовозгоранию при обычных условиях, может возгораться при высоких температурах на отвалах. Например, на южных склонах Кузбасса в жаркие дни температура достигает 41–42 °С, что значительно ускоряет окислительные процессы.

Осадки также влияют на возникновение эндогенных пожаров. Колебания влажности, особенно в периоды высыхания и увлажнения, усиливают самовозгорание, так как дегидратация угля увеличивает его пористость [29–31]. В Кемеровской области, где годовые осадки превышают 300 мм (на юге – 450 мм), процесс дегидратации наиболее интенсивен в засушливые периоды, такие как конец мая и июнь.

Мировая практика последних десятилетий демонстрирует значительный объем успешных комплексных исследований, направленных на изучение изменений органической и минеральной частей твердых топлив в процессе окисления в естественных условиях с учетом разнообразия внутренних и внешних факторов. Тем не менее до сих пор отсутствует методика оценки сочетанного воздействия влияющих факторов. Таким образом, одной из центральных задач разработки мероприятий по борьбе с самовозгоранием угольных отвалов является систематизация и обобщение накопленных экспериментальных и теоретических данных.

Обсуждение результатов

Изучение проблемы самовозгорания угольных отвалов подчеркивает сложность ситуации, поскольку факторов, влияющих на этот процесс, настолько много, что каждый

отвал фактически представляет собой уникальное сочетание воздействий. По этой причине общие мероприятия по борьбе с самовозгоранием не демонстрируют должной эффективности. Это обуславливает необходимость определения характеристик отвала и влияющих факторов с целью разработки и применения наиболее эффективных методов предупреждения самовоспламенения. Рассматриваемый подход не только повышает безопасность, но и обеспечивает экономическую выгоду, поскольку общие мероприятия демонстрируют свою эффективность только при использовании больших ресурсных объемов, то время как индивидуальные методы более целенаправленны и, соответственно, эффективны.

В свете вышеупомянутого требуется разработать математическую модель, описывающую процесс возникновения эндогенных пожаров в угольных отвалах при сочетанном воздействии метеорологических и горно-геологических факторов. Этот подход позволит глубже понять и предсказывать динамику пожароопасности в отвалах, что является важным направлением для дальнейших исследований.

Г.И. Коршунов в исследовании «Разработка рекомендаций по управлению профессиональными рисками работников горно-обогатительного комбината» [31] подчеркивает, что решение проблемы возникновения эндогенных пожаров возможно только посредством комплексного подхода. Автор утверждает, что нормативные требования в области применения риск-ориентированного подхода, могут привести к положительным результатам, как это показывает зарубежный опыт. Оценка риска позволит структурировать и приоритезировать факторы, оказывающие наибольшее влияние на пожароопасность отвала [33–35]. Данный подход имеет ряд преимуществ, среди которых возможность оперативного реагирования на изменение условий и более точная оценка возможных последствий как в контексте безопасности труда, так и в экономической и экологической областях.

Заключение

Таким образом, возникновение эндогенных пожаров в угольных отвалах является актуальной проблемой горной промышленности. Практика показывает, что компании зачастую пренебрегают превентивными мероприятиями, ссылаясь на существенные экономические потери. Однако, учитывая степень негативного воздействия последствий эндогенных пожаров на здоровье работников и жителей близлежащих населённых пунктов, экологический ущерб и экономические потери вследствие нарушения технологического процесса, превентивные мероприятия в значительной степени результативнее реактивных. Существующие превентивные мероприятия, такие как применение изолирующего материала, нагнетание воды в отвал или перевалка, требуют больших экономических затрат, а также характеризуются своей краткосрочностью. В связи с этим необходимо точно понимать природу возникновения самовозгорания и определять факторы, влияющие на развитие эндогенных пожаров. Анализ научной литературы позволяет классифицировать факторы горно-геологические и климатические. На сегодняшний день сформирована широкая экспериментальная и теоретическая база данных, описывающая влияние отдельных факторов на развитие эндогенных пожаров, однако до сих пор отсутствует методика оценки сочетанного воздействия влияющих факторов. Таким образом, в рамках дальнейших

исследований планируется разработать математическую модель, описывающую процесс возникновения эндогенных пожаров в угольных отвалах при сочетании воздействия метеорологических и горно-геологических факторов. Также предполагается разработка методики оценки

риска возникновения эндогенного пожара при сочетании действия метеорологических и горно-геологических факторов, поскольку данный подход позволит приоритезировать риски и наиболее эффективно распределить ресурсы.

Вклад авторов

С.Г. Гендлер – формулировка идеи и целей исследования, предоставление материалов для проведения исследования, проверка результатов исследования, редактирование.

А.С. Братских – разработка методологии или отдельных методов, обработка материалов.

Author's Contribution

Gendler S.G.: formulation of the idea and research objectives, provision of materials for the research, verification of the research results, editing.

Bratskih A.S.: development of methodology or separate methods, processing of materials.

Список литературы / References

1. Yan H., Nie B., Liu P., Chen Z., Yin F., Gong J. et al. Experimental assessment of multi-parameter index gas correlation and prediction system for coal spontaneous combustion. *Combustion and Flame*. 2022;247:112485. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112485>
2. Yan H., Nie B., Kong F., Liu Y., Liu P., Wang Y. et al. Experimental investigation of coal particle size on the kinetic properties of coal oxidation and spontaneous combustion limit parameters. *Energy*. 2023;270:126890. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126890>
3. Tompa E., Verbeek J., van Tulder M., de Boer A. Developing guidelines for good practice in the economic evaluation of occupational safety and health interventions. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*. 2010;36(4):313–318. <https://doi.org/10.5271/sjweh.3009>
4. Портола В.А., Протасов С.И., Бобровникова А.А., Серегин Е.А. Оценка длительности инкубационного периода самовозгорания углесодержащих пород отвалов. *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2020;(4):36–41.
Portola V.A., Protasov S.I., Bobrovnikova A.A., Seregin E.A. Dump coal-bearing rock spontaneous combustion incubation period duration estimation. *Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety)*. 2020;(4):36–41. (In Russ.)
5. Мешков С.А., Сидоренко А.А., Алексеев В.Ю. Обеспечение пожаробезопасной разработки угольных пластов, склонных к самовозгоранию. *Горный информационный аналитический бюллетень*. 2019;(S6):156–163. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-4-6-156-163>
Meshkov S.A., Sidorenko A.A., Alekseev V.Ju. Ensuring fire-safe of mining of the spontaneous-combustion coal seams. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(S6):156–163. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-4-6-156-163>
6. Зубов В.П., Голубев Д.Д. Перспективы использования современных технологических решений при отработке пологих пластов угля с учетом опасности формирования очагов его самовозгорания. *Записки Горного института*. 2021;250:534–541. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.6>
Zubov V.P., Golubev D.D. Prospects for the use of modern technological solutions in the flat-lying coal seams development, taking into account the danger of the formation of the places of its spontaneous combustion. *Journal of Mining Institute*. 2021;250:534–541. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.6>
7. Холоднякова В.А. *Снижение пожароопасности бурогольных разрезов на примере Коркинского и Харанорского: отчет о научно-исследовательской работе*. СПб.: АО «Гипропроруда»; 2019. 30 с. Режим доступа: <https://nauchkor.ru/pubs/snizhenie-pozharoопасности-burougolnyh-razrezov-na-primere-korkinskogo-i-haranorskogo-5ceeee57966e10545e774bc> (дата обращения: 21.04.2024).
8. Sun S., Gura D., Dong B. Fire safety assessment models based on machine learning methods for the coal industry. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2022;231:104693. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2022.104693>
9. Корнев А. В., Спицын А. А., Займенцева Л. А., Зубко М. В. Исследование физико-химических свойств гидрогеля как средства пылевзрывозащиты и снижения запыленности в угольных шахтах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):180–198. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_180
Kornev A. V., Spitsyn A. A., Zaimentseva L. A., Zubko M. V. Research of the physico-chemical properties of hydrogel as a means of dust-explosion protection and dust reduction in coal mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):180–198. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_180

10. Гендлер С.Г., Степанцова А.Ю., Попов М.М. Обоснование безопасной эксплуатации закрытых угольных складов по газовому фактору. *Записки Горного института*. 2024;1–11. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16519/16330> (дата обращения: 30.09.2024).
Gendler S.G., Stepantsova A.Y., Popov M.M. Justification on the safe exploitation of closed coal warehouse by gas factor. *Journal of Mining Institute*. 2024;1–11. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16519/16330> (accessed: 30.09.2024).
11. Родионов В.А., Турсенев С.А., Скрипник И.Л., Ксенофонтов Ю.Г. Результаты исследования кинетических параметров самовозгорания каменноугольной пыли. *Записки Горного института*. 2020;246:617–622. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.6.3>
Rodionov V.A., Tursenev S.A., Skripnik I.L., Ksenofontov Y.G. Results of the study of kinetic parameters of spontaneous combustion of coal dust. *Journal of Mining Institute*. 2020;246:617–622. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.6.3>
12. Zheng Y., Li S., Xue S., Jiang B., Ren B., Zhao Y. Study on the evolution characteristics of coal spontaneous combustion and gas coupling disaster region in goaf. *Fuel*. 2023;349:128505. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128505>
13. Ren H., Zhao Y., Xiao W., Zhang J., Chen C., Ding B., Yang X. 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. *Journal of Environmental Management*. 2022;317:115502. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115502>
14. Zhang Y., Hou Y., Yang D., Deng J. Transformation and migration of key elements during the thermal reaction of coal spontaneous combustion. *Energy*. 2024;290:130212. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.130212>
15. Ereemeeva A.M., Ilyashenko I.S., Korshunov G.I. The possibility of application of bioadditives to diesel fuel at mining enterprises. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(10-1):39–49. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_1_01_0_39
16. Liu H., Li Z., Yang Y., Miao G. Type of the study: Original research article relationship between temperature rise characteristics and the emission of carbon oxides during the spontaneous combustion latency of coal. *Journal of Cleaner Production*. 2023;420:138380. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138380>
17. Douglas G.B., Ancel A., Saille V., Lamontagne S., Boulemant A., Bourrat X., Trefry M.G. Thermal flux, fugitive gas emission and geotechnical instability in a complex tailings legacy site. *Chemosphere*. 2021;263:128068. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128068>
18. Жданова А. Н. Опасность самовозгорания штабелей угля. В кн.: Костюк С.В. (ред.). *Экологические проблемы промышленно развитых и ресурсодобывающих регионов: пути решения: сб. тр. 3-й Всерос. молодежной науч.-практ. конф., г. Кемерово, 21–22 дек. 2018 г.* Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева; 2018. С. 207.1–207.4.
19. Han B., Zhang Y., Zou Z., Wang J., Zhou C. Study on controlling factors and developing a quantitative assessment model for spontaneous combustion hazard of coal gangue. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024;54:104039. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104039>
20. Калайгорода В.В., Простов С.М., Шабанов Е.А. Инструментальный мониторинг при локации очагов эндогенных пожаров в борту угольного разреза. *Известия высших учебных заведений Горный журнал*. 2023;(2):124–135. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2023-2-124-135>
Kalaigoroda V.V., Prostov S.M., Shabanov E.A. Instrumental monitoring for the location of endogenous fires in the coal mine wall. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2023;(2):124–135. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2023-2-124-135>
21. Arisoy A., Beamish B.B., Cetegen E. Modelling spontaneous combustion of coal. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*. 2006;30(3):193–201. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/43456128> (accessed: 30.09.2024).
22. Jun D., Jingyu Z., Yanni Z., Ruilin G. Study on coal spontaneous combustion characteristic temperature of growth rate analysis. *Procedia Engineering*. 2014;84:796–805. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.498>
23. Smith T.D., DeJoy D.M., Dyal M.-A. Safety specific transformational leadership, safety motivation and personal protective equipment use among firefighters. *Safety Science*. 2020;131:104930. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104930>
24. Смирняков В.В., Родионов В.А., Смирнякова В.В., Орлов Ф.А. Влияние формы и размеров пылевых фракций на их распределение и накопление в горных выработках при изменении структуры воздушного потока. *Записки Горного института*. 2022;253:71–81. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.12>
Smirnyakov V.V., Rodionov V.A., Smirnyakova V.V., Orlov F.A. The influence of the shape and size of dust fractions on their distribution and accumulation in mine workings when changing the structure of air flow. *Journal of Mining Institute*. 2022;253:71–81. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.12>
25. Панов Б.С., Проскурня Ю.А. Модель самовозгорания породных отвалов угольных шахт Донбасса. В кн.: *Геология угольных месторождений: межвуз. науч. темат. сб. Екатеринбург; 2002*. С. 274–281. Режим доступа: <https://masters.donntu.ru/2008/ggeo/solovyova/library/2.html> (дата обращения: 30.09.2024).
26. Qing G., Wanxing R., Risk evaluation of coal spontaneous combustion from the statistical characteristics of index gases. *Thermochemica Acta*. 2022;715:179287. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179287>

27. Кабанов Е.И., Туманов М.В., Сметанин В.С., Романов К.В. Инновационный подход к профилактике травм на горнодобывающих предприятиях на основе управления человеческим фактором. *Записки Горного института*. 2023;263:774–784. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16013> (дата обращения: 30.09.2024).
Kabanov E.I., Tumanov M.V., Smetanin V.S., Romanov K.V. An innovative approach to injury prevention in mining companies through human factor management. *Journal of Mining Institute*. 2023;263:774–784. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16013> (accessed: 30.09.2024).
28. Глушенков Е.В., Сидоренко А.А. Предотвращение самовозгорания угля при отработке мощных крутых пластов Кузбасса. *Записки Горного института*. 2004;159:32–35. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/8708> (дата обращения: 30.09.2024).
Glushenkov E.V., Sidorenko A.A. Prevention of coal spontaneous ignition during mining of thick steep seams in Kuzbass. *Journal of Mining Institute*. 2004;159:32–35. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/8708> (accessed: 30.09.2024).
29. Li Z.-J., Zhu Z.-J., Zhou K., Xu Y. Law of characteristic gases production in the low-temperature oxidation stage of spontaneous combustion of sulfide ores. *Fuel*. 2025;380:133195. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133195>
30. Chao J., Wei S., Shen L., Han X., Pan R., Li J. et al. Oxidation and spontaneous combustion characteristics of particulate coal under stress–heat–gas interactions. *Science of The Total Environment*. 2024;947:174567. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174567>
31. Zhang H., Wang P., Wang Y., Thanh H.V., Ngo I., Lu X. et al. Investigate on spontaneous combustion characteristics of lignite stockpiles considering moisture and particle size effects. *Energy*. 2024;309:133193. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133193>
32. Коршунов Г. И., Никулин А. Н., Красноухова Д. Ю. Разработка рекомендаций по управлению профессиональными рисками работников горно-обогатительного комбината. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):199–214. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_199
Korshunov G. I., Nikulin A. N., Krasnoukhova D. Yu. Development of recommendations for professional risk management of employees of the mining and processing plant. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):199–214. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_199
33. Гридина Е.Б., Боровиков Д.О. Выявление причин травматизма на основе карт оценки профессиональных рисков на угольном разрезе. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(6-1):114–128. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_114
Gridina E.B., Borovikov D.O. Identification of the causes of injuries based on occupational risk assessment maps at the open-pit coal. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(6-1):114–128. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_114
34. Шувалов Ю.В., Михайлова Н.В. Оценка и управление риском травматизма работников горнодобывающей промышленности. *Записки Горного института*. 2002;152:103–106. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/9341> (дата обращения: 30.09.2024).
Shuvalov Y.V., Mikhailova N.V. Estimation and management of the risk of traumatism of workers in the mining industry. *Journal of Mining Institute*. 2002;152:103–106. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/9341> (accessed: 30.09.2024).
35. Сафиуллин Р.Н., Сафиуллин Р.Р., Сорокин К.В. Метод оценки и прогнозирования технического состояния ресурсных элементов карьерных самосвалов на основе контрольных карт Шухарта. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(7):111–124. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_7_0_111
Safiullin R.N., Safiullin R.R., Sorokin K.V. Assessment and prediction of technical condition of dump truck life components using the Shewhart control charts. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(7):111–124. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_7_0_111

Информация об авторах

Гендлер Семен Григорьевич – доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: sgendler@mail.ru

Братских Анастасия Сергеевна – аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: khodyreva.anastasia.26@gmail.com

Information about the authors

Semen G. Gendler – Dr. Sci. (Eng.), Professor, The St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: sgendler@mail.ru

Anastasiya S. Bratskih – Postgraduate Student, The St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: khodyreva.anastasia.26@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию: 02.09.2024

Поступила после рецензирования: 08.10.2024

Принята к публикации: 15.10.2024

Article info

Received: 02.09.2024

Revised: 08.10.2024

Accepted: 15.10.2024