

Вестник Череповецкого государственного университета. 2023. № 1 (112). С. 59–78.
Cherepovets State University Bulletin, 2023, no. 1 (112), pp. 59–78.

Научная статья

УДК 669.1(07)

<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2023-1-112-5>

**Математическое моделирование и управление термомеханическим разрушением
одиночных кусков угля**

**Николай Николаевич Синицын¹, Наталья Владимировна Запатрина²,
Вера Николаевна Куценко^{3✉}**

^{1,3}Череповецкий государственный университет,
^{1,2}Военный ордена Жукова университет радиоэлектроники,
Череповец, Россия,

¹nnsinitcyn@chsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8919-0573>
^{3✉}verunkaD@yandex.ru

Аннотация. Разработана математическая модель прогрева одиночных образцов угля сферической формы в электропечи с учетом фазового перехода влаги и выхода летучих веществ. Представлены результаты влияния продолжительности и температуры термической подготовки на прочность образцов сферической формы. Показаны результаты расчета температурных полей по сечению образцов с учетом фазового перехода влаги. Полученные результаты свидетельствуют, что высокотемпературная термическая подготовка угля резко снижает прочность кусков топлива и дает возможность повысить лабораторный относительный коэффициент размоловоспособности топлива. Получены значения кинетической энергии разрушения при различных температурах в электропечи для различных диаметров образцов из угля сферической формы. Представлены алгоритмы расчета температурных полей по сечению образцов сферической формы с учетом фазового перехода влаги и выхода летучих веществ.

Ключевые слова: высокотемпературная термическая подготовка топлива, термомеханическое разрушение, образцы сферической формы из углей Канско-Ачинского бассейна, уравнение теплопроводности, фазовый переход воды, выход летучих веществ, температурные поля, влажность, прочность, критическая скорость разрушения, алгоритмы расчета

Для цитирования: Синицын Н. Н., Запатрина Н. В., Куценко В. Н. Математическое моделирование и управление термомеханическим разрушением одиночных кусков угля // Вестник Череповецкого государственного университета. 2023. № 1 (112). С. 59–78. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2023-1-112-5>.

Mathematical modeling and controlling thermomechanical destruction of single pieces of coal

Nikolay N. Sinitsyn¹, Natalia V. Zapatrina², Vera N. Kutsenko^{3✉}

^{1,3}Cherepovets State University,
Cherepovets, Russia,

^{1,2}Military Order of Zhukov University of Radio Electronics,
Cherepovets, Russia,

¹nnsinitcyn@chsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8919-0573>

³verunkaD@yandex.ru

Abstract. A mathematical model has been developed for heating single samples of spherical coal in an electric furnace, taking into account the phase transition of moisture and the release of volatile substances. The authors describe the influence of the duration and thermal preparation temperature on the strength of spherical samples; present the calculation of temperature fields over the cross-section of samples, taking into account the phase transition of moisture. The results obtained show that high-temperature thermal preparation of coal dramatically reduces the strength of fuel pieces and makes it possible to increase the laboratory relative coefficient of grinding capacity of fuel. The values of the kinetic energy of destruction at different temperatures in an electric furnace for different diameters of spherical coal samples are obtained. The authors also present algorithms for calculating temperature fields by cross-section of spherical samples, taking into account the phase transition of moisture and the release of volatile substances.

Keywords: high-temperature thermal preparation of fuel, thermomechanical destruction, spherical samples from the coals of the Kansk-Achinsk basin, thermal conductivity equation, phase transition of water, release of volatile substances, temperature fields, humidity, strength, critical rate of destruction, calculation algorithms

For citation: Sinitsyn N. N., Zapatrina N. V., Kutsenko V. N. Mathematical modeling and controlling thermomechanical destruction of single pieces of coal. *Cherepovets State University Bulletin*, 2023, no. 1 (112), pp. 59–78. (In Russ.). <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2023-1-112-5>.

Введение

Тонкость помола топлива находится в зависимости от его стоимости и реакционной способности, характеризуемой в основном выходом летучих веществ. Тонкость помола для различных углей выбирают на основе технико-экономических соображений. Уменьшение размеров пылинок приводит к росту удельной поверхности топлива, что улучшает его горение, это связано с увеличением расхода энергии на пылеприготовление. С угрублением помола расход энергии на пылеприготовление уменьшается, это увеличивает потери тепла с механическим недожогом. Размольные свойства топлива характеризует коэффициент размолоспособности $K_{л.о.}$, показывающий отношение расхода электроэнергии при размоле угля, принятого за эталон, к расходу электроэнергии при размоле данного угля. Уменьшение прочности угля приводит к увеличению производительности мельницы. В данной работе рассматривается возможность снижения прочности топлива при его высокотемпературной обработке до мельниц.

Основная часть

Одним из новых топочных устройств является низкотемпературная вихревая топка, позволяющая сжигать немолотое топливо с минимальным выходом оксидов азота¹. Такие типы оборудования реализованы на промышленных котлах. Экспериментальные данные по освоению этих топков для сжигания немолотых азейского бурого и черемховского каменного углей представлены в работах исследователей^{2,3}. Анализ

¹ Grigoryev K.A., Roundyguine Y.A., Skuditskii V.E., Anoshin R.G. Low-Temperature Swirl Fuel Combustion: Development and Experience // *Cleaner Combustion and Sustainable World* / Qi, H., Zhao, B. (eds). 2013. Pp. 999–1003; Paramonov A. P., Kadyrov M. R., Trinchenco A. A. Research on Influence of the Furnace Chamber Aerodynamics on Ecological Indicators of Boiler Plants (Part 1: Model of a Low-temperature Swirl Furnace) // *Procedia Engineering* 206. 2017. Pp. 546–551; Paramonov A. P., Kadyrov M.R., Trinchenco A. A. Research on Influence of the Furnace Chamber Aerodynamics on Ecological Indicators of Boiler Plants (Part 2: Results of a Low-temperature Swirl Combustion Practical ...) // *Procedia Engineering* 206. 2017/ 558–563; Paramonov A.P, Teixeira F.N. Thermal and environmental performance of a modern bagasse cogeneration boiler // *EES Lora. Zuckerindustrie*. 2004. Vol. 129 (12). Pp. 881–886; Shestakov S.M., Paramonov A.P. Calculation of the burning-out process of crushed fuel particles in furnace with low-temperature eddy at PK-24 boiler. *Engineering*. 1993. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Calculation-of-crushed-fuel-particle-burnout-in-a-a-Shestakov-Paramonov/295c8db6f00a3efd7db9779c8ea1e53e73d9d93a> (дата доступа: 01.12.2022); Trinchenco A. A., Paramonov A. P. Low-temperature swirl burning as technological method of simultaneous decrease in emissions of nitrogen and sulfur oxides (Part 1. Principles, organization and mathematical ... Model of Furnace Process) // *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT* / V. Murgul, Z. Popovic (eds). 2017. Pp. 1074–1082; Trinchenco A. A., Paramonov A. P. Introduction of low-temperature swirl technology of burning as a way of increase in ecological of low power boilers // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 90 (1), 012094; Trinchenco A., Paramonov A., Kadyrov M., Koryabkin A. Numerical research of reburning-process of burning of coal-dust torch // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 90 (1), 012012; Trinchenco A. A., Paramonov A. P. Implementation of low-temperature swirl burning for power use of bituminous coal // *J. Sci. and tech. sheets SPbSTU*. 2015. № 4 (231). Pp. 72–81.

² Материалы к совещанию по новым перспективным конструкциям парогенераторов для энергоблоков ТЭЦ и ТЭС (Ростов-на-Дону, июнь 1982 г.). Новосибирск, 1982. 16 с. Померанцев В. В. др. Опыт-промышленный котел БКЗ-420-140-9 с низкотемпературной вихревой топкой // *Энергомашиностроение*. 1985. № 8. С. 32–34; Померанцев В. В., Шестаков С. М., Дудукалов А. П., Усик Б. В. Проблемы разработки теории горения твердого топлива. Горение органического топлива: материалы Всесоюзной конференции. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1985. Ч. 1. С. 22–32; Серафим Ф. А., Шестаков С. М., Померанцев В. В. и др. Сжигание немолотых азейских бурых углей в низкотемпературной вихревой топке по схеме ЛПИ-ИТЭЦ-10 // *Теплоэнергетика*. 1983. №7. С. 36–41; Сеницын Н. Н. Исследование процесса термо-пневморазрушения частиц для повышения эффективности сжигания дробленого топлива в топке ЛПИ: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 1992. 192 с.

³ Любов В. К. Изучение особенностей горения крупных частиц натурального топлива с целью повышения эффективности работы вихревых топков ЛПИ: дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1984. 251 с.; Любов В. К., Сосенский А. И., Шестаков С. М. Экспериментальная установка для исследования тепло- и массообмена при прогреве и горении частиц твердого топлива. Ленинград: [Б. и.], 1984. 14 с.; Померанцев В. В., Финкер Ф. Э., Ветрова Н. В. Эксперимен-

работы низкотемпературной вихревой топки показывает, что в топочной камере крупные куски подвергаются процессу терморазрушения. С учетом результатов научно-исследовательских работ был разработан проект опытно-промышленного котла, паропроизводительностью 117 кг/с с низкотемпературной вихревой топкой, предназначенной для сжигания немолотого ирша-бординского бурого угля следующего

состава:
 $Q_H^P = (14,96 \div 16,87)$ МДж/кг, $W^P = (31 \div 32)$ %, $A^P = (4,2 \div 7,3)$ %, $V^{dag} = (44 \div 50)$ %¹.
Максимальный размер одиночных кусков достигает 60×10^{-3} м, $R_{1000} = (22 \div 31)$ %, механический недожог при нагрузках, близких к номинальному, достигает 4,1 %. Для определения условий, обеспечивающих явление терморазрушения, проводились стендовые исследования выгорания азейского бурого, черемховского каменного углей², в которых моделировались топочные условия. Исследования показали, что в период видимого горения летучих веществ происходит разрушение частиц, изготовленных из куса натурального топлива в форме шара. Для оценки поведения крупного куса топлива в топочной камере проведены исследования процесса термомеханического разрушения крупных кусков при их ударе о преграду. Проведенные исследования свидетельствуют, что прочность крупных кусков топлива при их нагреве резко уменьшается. Для прогнозирования процесса термомеханического разрушения необходим дополнительный математический анализ этого процесса, например, при сушке в трубе – сушилке, т. е. при движении в высокотемпературном потоке газа с последующим ударом о преграду.

Методом сбрасывания³ в работе М. С. Гофмана и К. П. Шабалина «О дроблении тел свободным ударом»⁴ установлено, что с уменьшением размера тела необходимая скорость разбивающего удара возрастает. Полученная в опытах зависимость разрушения материалов, изготовленных в форме шаров: высокопрочного гипса, портландцемента, глиноземного цемента, портландцемента с песком, имеет вид:

$$d = A/V^2,$$

где A – постоянная величина для данного материала; d – размер тела; V – скорость разбивающего удара.

тальные обоснования вихревой схемы сжигания фрезерного торфа // Труды ДВГУ. Вып. 1. Владивосток, 1976. С. 15–20.

¹ Любов В. К., Сосенский А. И., Шестаков С. М. Экспериментальная установка для исследования тепло- и массообмена при прогреве и горении частиц твердого топлива. Ленинград: [Б. и.], 1984. 14 с.

² Любов В. К. Изучение особенностей горения крупных частиц натурального топлива с целью повышения эффективности работы вихревых топок ЛПИ: дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1984. 251 с.

³ Андреев С. Е., Перов В. А., Зверевич В. В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Москва: Недра, 1980. 415 с.; Андреев С. Е. Законы дробления // Горный журнал. 1952. № 7. С. 36–38.

⁴ Гофман М. С., Шабалин К. П. О дроблении тел свободным ударом // Горный журнал. 1964. № 3. С. 64–67.

В работе Н. Н. Сеницына¹ представлены исследования процесса термомеханического разрушения крупных кусков топлива в форме шаров различных видов топлива. Методом сбрасывания исследовалось разрушение крупных кусков топлива в форме шаров ирша-бородинского и азейского бурых и черемховского каменного углей. На рис. 1 представлены экспериментальные зависимости критической скорости разрушения от массы образца. Под критической скоростью разрушения понимается скорость, при которой образец разрушается пополам.

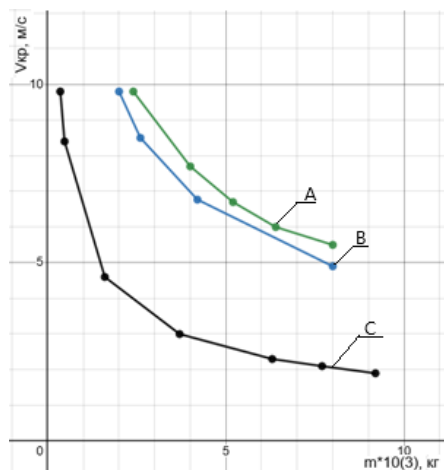


Рис. 1. Зависимость массы образца шаровой формы от критической скорости разрушения при $T = 293 \text{ К}$. А – ирша-бородинский бурый уголь: $W^p = 29 \%$, $A^p = 3,0 \%$; В – азейский бурый уголь: $W^p = 24 \%$, $A^p = 3,3 \%$; С – черемховский каменный уголь: $W^p = 7,46 \%$, $A^p = 13,9 \%$

Из рис. 1 видно, что прочность образцов зависит от влажности: чем больше влажность, тем больше критическая скорость разрушения. По свойствам исследуемые угли эквивалентны. Кривые А, В, С описываются уравнением:

$$A_{кр} = m \cdot V_{кр}^2,$$

где $A_{кр}$ – опытный коэффициент, равный для ирша-бородинского угля 0,23, азейского угля – 0,192, черемховского угля – 0,0333.

Для оценки влияния нагрева на разрушение частиц топлива при ударе была проведена серия опытов для частиц в форме шара из ирша-бородинского бурого угля диаметром 12 мм и массой 1 г со средней плотностью $\rho = 1106 \text{ кг/м}^3$. Обработка опытных данных для трех температур, при которых проводится нагрев образцов, $T = 633 \text{ К}$, 988 К и 1173 К , и разной продолжительности выдержки частиц при этих

¹ Сеницын Н. Н. Исследование процесса термо-пневморазрушения частиц для повышения эффективности сжигания дробленого топлива в топке ЛПИ: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 1992. 192 с.

температурах в печи от 5 до 100 с показали, что увеличение температуры в печи позволяет резко уменьшить прочность материала угля. При этом уменьшается критическая скорость при ударе частицы о преграду. За критическую скорость принималась скорость при ударе, при которой образец разрушается на две примерно равные части. Опыты по определению критической скорости проводились методом сбрасывания. Образцы выдерживались в печи с постоянной температурой и затем сбрасывались на преграду.

На рис. 2 представлены экспериментальные данные по определению критической скорости разрушения в зависимости от температуры греющей среды и продолжительности выдержки этих образцов в печи перед сбрасыванием.

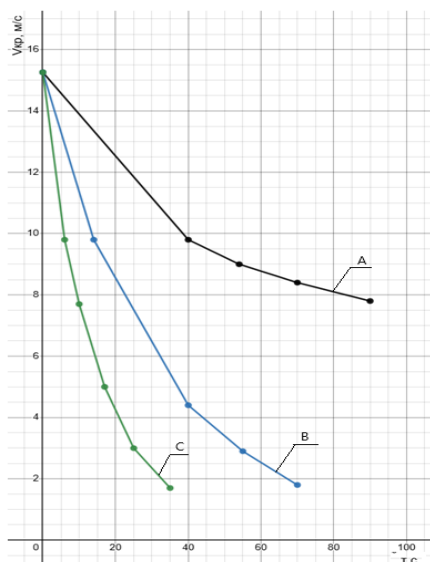


Рис. 2. Изменение критической скорости разрушения от продолжительности нагрева образца ирша-бординского бурого угля: $W^p = 29 \%$, $A^p = 3,0 \%$, масса образца $1 \cdot 10^{-3}$ кг, диаметр $12 \cdot 10^{-3}$ м. температура по кривой А – $T = 633$ К, по кривой В – $T = 988$ К, по кривой С – $T = 1173$ К

Так, например, при $V_{кр} = 9,8$ м/с увеличение температуры от 633 до 988 К снижает продолжительность необходимой термической обработки только с 10 до 5 с, т. е. вдвое.

Если рассматривать результаты при $V_{кр} = 5$ м/с, то можно отметить, что повышение температуры от 633 до 980 К уменьшает время термической обработки с 95 до 32 с, т. е. примерно в 3 раза, для температур от 988 до 1173 К – с 32 до 15 с, т. е. примерно вдвое. Зависимость критической скорости разрушения от продолжительности выдержки имеет вид:

- 1) $V_{кр} = 15,16 \cdot \exp(-7,51 \cdot 10^{-3} \cdot \tau)$, $\delta = 7,39 \%$;
- 2) $V_{кр} = 15,16 \cdot \exp(-3,035 \cdot 10^{-3} \cdot \tau)$, $\delta = 1,93 \%$;

3) $V_{кр} = 15,16 \cdot \exp(-6,23 \cdot 10^{-2} \cdot \tau)$, $\delta = 4,55 \%$;
где τ – время в секундах.

Серия опытов, проведенная для частиц шаровой формы из ирша-бородинского бурого угля со средними размерами $18,67 \cdot 10^{-3}$ м и $26,57 \cdot 10^{-3}$ м, масса частиц составляла $3,75 \cdot 10^{-3}$ кг и $10,7 \cdot 10^{-3}$ кг при температуре нагрева в печи, равной 988 К, также показала, что разрушение куска образца размером $18,67 \cdot 10^{-3}$ м при температуре 988 К, критическая скорость при комнатной температуре равна 23,9 м/с, а прогрев в течение 10 с дает значение критической скорости 5 м/с, т. е. снижение скорости в 4,5 раза. На рис. 3 представлена зависимость критической скорости разрушения образца от времени выдержки в печи и размера образца при температуре 988 К.

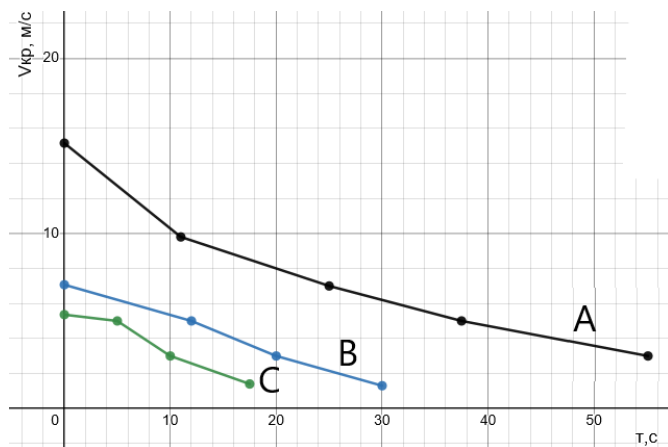


Рис. 3. Влияние продолжительности выдержки и размера образцов
от температуры выдержки, равной 988 К

А – масса образца $1 \cdot 10^{-3}$ кг; В – масса образца $3,77 \cdot 10^{-3}$ кг; С – масса образца $10,7 \cdot 10^{-3}$ кг

Из рис. 3 видно, что прогрев кусков угля снижает прочность образцов из ирша-бородинского бурого угля.

Из рис. 2 следует, что с увеличением температуры термической обработки прочность образцов резко снижается, т. е. снижается критическая скорость разрушения и уменьшается время выдержки образца в электропечи. А также с увеличением размера образца значение критической скорости разрушения уменьшается и уменьшается продолжительность выдержки образца при постоянной температуре (рис. 3).

Методика расчета температурных полей. В ходе работы проводился анализ прогрева образцов в печи с постоянной температурой по методике¹ с учетом фазового перехода влаги и выхода летучих веществ. Математическая модель одномерного

¹ Шестаков С. М., Любов В. К., Павлов А. М., Усик Б. В. Особенности низкотемпературного вихревого сжигания немолотых бурых и каменных углей // Горение органического топлива: материалы V Всесоюзной конференции ИТФ СО АН СССР. Новосибирск: СО АН СССР, 1985. Ч. 2. С. 225–234.

симметричного процесса прогрева угля в форме шара включает в себя сквозное уравнение теплопроводности, общее для влажной и сухой зон шара:

$$c(T)_{\text{эф}} \cdot \rho(T) \cdot (\delta T(r, \tau) / \delta \tau) = \delta / \delta r \cdot [\lambda(T) \cdot (\delta T(r, \tau) / \delta r)] + [2\lambda(T) / r \cdot (\delta T(r, \tau) / \delta r)]$$

интегрируемое в области:

$$0 \leq r \leq r_0; 0 \leq \tau \leq \tau_0; \quad (1)$$

начальные условия:

$$T|_{\tau=0} = T^0; \quad (2)$$

граничное условие:

при

$$r = 0, (\delta T(0, \tau) / \delta r) = 0, \quad (3)$$

при

$$r = r_0 - \lambda(T) \cdot (\delta T(r_0, \tau) / \delta r) = \alpha [T_{\text{ср}} - T(r_0, \tau)], \quad (4)$$

где $\rho(T)$ – плотность материала; $c(T)_{\text{эф}}$ – удельная теплоемкость материала; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности материала; $\alpha = \alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}}$ – коэффициент теплоотдачи; $\alpha_{\text{л}}$ и $\alpha_{\text{к}}$ – лучистый и конвективный коэффициенты теплоотдачи; r_0 – радиус шара; $T_{\text{ср}}$ – температура среды; T_0 – начальная температура материала; τ – время; r – текущий радиус, $T(r, \tau)$ – текущая температура.

$$dV^d / d\tau = k_{01} \cdot \exp [E_{01} / RT(r, \tau)] \cdot (1 - V^d), \quad (5)$$

$$dm_d / d\tau = dW_{\text{вл}} / d\tau + dV^r / d\tau, \quad (6)$$

где V^d – доля продуктов термолитиза, получившаяся за время $\Delta\tau$; k_{01} – коэффициенты скорости реакции; E_{01} – энергия активации реакции разложения; R – универсальная газовая постоянная; $T(r, \tau)$ – текущая температура; V^d – выход летучих на сухую массу. Для быстрого нагрева применяем значение кинетических характеристик: $E_{01} = 29,3$ МДж/кмоль и $k_{01} = 14,6$ с⁻¹; $W_{\text{вл}}$ – выход влаги; V^r – выход летучих на рабочую массу.

При этом выделение теплоты фазового перехода воды в уравнении (4) учитывается с помощью эффективной теплоемкости $c(T)_{\text{эф}}$, задаваемой уравнением:

$$c(T)_{\text{эф}} = \begin{cases} c_1(T), & \text{при } T > T_{\text{л}}; \\ c_2(T) \cdot \psi + c_1(T) \cdot (1 - \psi) \cdot gL / \Delta T, & T_{\text{с}} \leq T \leq T_{\text{л}}; \\ c_2(T), & \text{при } T < T_{\text{с}}; \end{cases} \quad (7)$$

где $T_{\text{с}} = (T_{\text{ср}} - \Delta T / 2)$, $T_{\text{л}} = (T_{\text{ср}} + \Delta T / 2)$ – фиктивные температуры начала и конца фазового перехода воды; $c_1(T)$ и $c_2(T)$ – удельные теплоемкости сухого и влажного

материала; g – доля влаги в элементарном объеме материала; L – удельная теплота фазового перехода влаги; ψ – доля влажного материала.

Коэффициент теплопроводности и плотности определяется по формуле:

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1(T), & \text{при } T > T_{\text{л}}; \\ \lambda_2(T) \cdot \psi + \lambda_1(T) \cdot (1 - \psi), & T_c \leq T \leq T_{\text{л}}; \\ \lambda_2(T), & \text{при } T < T_c; \end{cases} \quad (8)$$

$$\rho(T) = \begin{cases} \rho_1(T), & \text{при } T > T_{\text{л}}; \\ \rho_2(T) \cdot \psi + \rho_1(T) \cdot (1 - \psi), & T_c \leq T \leq T_{\text{л}}; \\ \rho_2(T), & \text{при } T < T_c; \end{cases} \quad (9)$$

где $\rho_1(T)$ и $\rho_2(T)$ – плотности сухого и влажного материала, $\lambda_1(T)$ и $\lambda_2(T)$ – коэффициенты теплопроводности сухого и влажного материалов.

Величина ψ определяется по формуле:

$$\psi = \begin{cases} 0, & \text{при } T > T_{\text{л}}; \\ (T_{\text{л}} - T) / (T_{\text{л}} - T_c), & T_c \leq T \leq T_{\text{л}}; \\ 1, & \text{при } T < T_c. \end{cases} \quad (10)$$

Плотность теплового потока на поверхности угля определяется:

$$q_{\text{л}} = c_0 \cdot [(T_{\text{ср}}/100)^4 - (T(r_0, \tau)/100)^4] \cdot \varepsilon_{1,2},$$

где $\varepsilon_{1,2} = 1/A_1 + (1/A_2 - 1) \cdot F_1/F_2$ – приведенный коэффициент теплопоглощения рассматриваемой системы; A_1 – коэффициент теплового излучения печи; A_2 – коэффициент теплового излучения куска угля; F_1 и F_2 – поверхности печи и угля; c_0 – излучательная способность абсолютно черного тела.

Коэффициент теплоотдачи излучением выражается как:

$$\alpha_{\text{л}} = q_{\text{л}} / [T_{\text{ср}} - T(r_0, \tau)].$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией при скорости обтекающего потока равен нулю, определяется по выражению при числе Нуссельта $Nu = 2$:

$$\alpha_{\text{к}} = 2\lambda_{\text{т}}/2r_0 = \lambda_{\text{т}}/r_0,$$

где $\lambda_{\text{т}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха.

Тестирование алгоритма расчета температурных полей. Система уравнений (1)–(10) в общем случае может быть решена только численным методом. При использовании метода конечных разностей с использованием явной схемы аппроксими-

мации производных значения температур определены в узлах расчетной области $i = 0, N + 1$, где N – количество узлов внутри расчетной области для дискретных моментов времени $\tau_n = \Delta\tau \cdot n$, $n = 0$; $(\tau_k / \Delta\tau)$ – моменты времени ($n = 0$ – начальный момент времени); $\Delta\tau$ – расчетный шаг по времени; расстояние между узлами определяется по формуле $\Delta r = r_0 / N$. 0 и $N+1$ – номера фиктивных узлов, находящихся за пределами расчетной области на расстоянии $\Delta r / 2$. Температуру в начальный момент времени задают по формуле:

$$T_i = T^0 \text{ для } i = \overline{0, N+1}.$$

Температуры в фиктивных узлах $i = 0, N+1$ в момент времени $n+1$ определяют по формулам:

$$T_0 = T_1; \quad T_{N+1} \cdot [(1-\kappa) \cdot T_N + 2\kappa \cdot T_{cp}] / (1+\kappa); \quad \kappa = \alpha \cdot \Delta r / 2\lambda,$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала при температуре поверхности.

Координата фронта испарения влаги определяется по температуре фазового перехода воды.

Границы перехода влаги из жидкого состояния в паровое определяются по температуре фазового перехода воды в цикле по $i = \overline{2 \dots N}$ из условия:

$$\text{Если } T_{i-1} \geq T_{\phi} \geq T_i; \quad \text{то } \varepsilon = \Delta r \cdot (i - 3/2) + \Delta r \cdot [(T_{i-1} - T_{\phi}) / (T_{i-1} - T_i)].$$

Здесь i – номер узла расчетной сети, Δr – приращение аргумента по координате.

Численное решение при явной схеме аппроксимации производной является условно устойчивым. В этом случае расчетный шаг по времени определяют по формуле:

$$\Delta\tau = \Delta r^2 / a(T) \cdot [(2i - 1) / (2i - 1)],$$

где $a(T) = \lambda(T) / [c(T) \cdot \rho(T)]$ – коэффициент теплопроводности.

Погрешность численного решения будет зависеть от настроечных параметров N и ΔT . Необходимо эти параметры выбирать таким образом, чтобы погрешность результатов моделирования не превосходила заданную.

Для выбора этих параметров выполнили тестирование численного решения задачи путем оценки баланса теплоты в теле в процессе моделирования реального объекта. Для этого составили уравнение баланса теплоты в момент времени τ :

$$Q_{np} = Q_{\tau} + Q_y,$$

где Q_{np} – количество теплоты, пришедшее в тело за время τ ; Q_{τ} – количество теплоты, оставшееся в теле к моменту времени τ ; Q_y – количество теплоты, ушедшее на испарение влаги. При использовании метода конечных разностей эти балансы вычисляются приближенно. Погрешности моделирования определяют по формуле:

$$\delta = [(|Q_{np} - Q_{\tau} - Q_y|) / Q_{np}] \cdot 100 \, \%.$$

Получены значения $\delta = 5,05 \%$ при $N=144$ и $\Delta T = 0,5$ К.

Анализ полученных данных по распределению температур по сечению тела показал удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных¹ по прогреву образцов из угля сферической формы.

Оценка времени прогрева образца до выхода летучих веществ. После выхода влаги сухой слой угля прогревается до температуры начала выхода летучих веществ. Температура начала выхода летучих веществ для бурых углей соответствует диапазону 440–470 К. Экспериментальные исследования продолжительности нагрева до воспламенения летучих обобщены уравнением вида², с:

$$\tau_{\text{вл}} = 49k_{\text{вл}} \cdot d_{\text{ч}}^{0,5} \cdot \{\exp(0,05 \cdot W^r) / [(T_r/1000)^4 \cdot (1 + 0,125 \cdot [W_{\text{п}}^{0,4} / (T_r/1000)^3])]\}, \quad (11)$$

где $k_{\text{вл}}$ – эмпирический коэффициент, имеющий для каменных углей следующие значения: черемховский – 1,02, кузнецкий Г и Д – 0,98, воркутинский – 1,0, интинский – 1,13, кузнецкий 2СС – 1,426; для бурых углей данный коэффициент составляет: азейский – 0,86, березовский – 1,12, ирша-бородинский – 1,3; для древесины (ель, сосна) – 1,164; $d_{\text{ч}}$ – диаметр частиц; T_r – температура газа; $W_{\text{п}}$ – скорость потока, равная 0,1...0,5 м/с; W^r – влажность топлива.

Сравнение продолжительности прогрева, рассчитанной по модели $\tau = 23,36$ с и по формуле (11) $\tau = 23,35$ с для частицы диаметром $12 \cdot 10^{-3}$ м, влажности $W^r = 29 \%$, температуре греющего газа $T_r = 1173$ К, скорости греющего газа $W_r = 0$ м/с, дает удовлетворительное совпадение.

Алгоритм расчета температурных полей в образце угля. На рис. 4 представлена блок-схема алгоритма расчета распределения температур по сечению образца из угля при прогреве в электропечи с учетом теплообмена излучением и конвекцией. При прогреве учитывается фазовый переход влаги из жидкого состояния в пар.

В блоке № 1 задаются исходные данные: радиус, коэффициенты теплопроводности влажного и сухого материала, плотность влажного и сухого материала, удельная теплоемкость влажного и сухого материала, температуры греющей среды и начальная температура материала, температуры начала и окончания фазового перехода влаги и фазового перехода, коэффициенты теплопроводности кинематической вязкости греющей среды, влажность материала на рабочую массу и содержание летучих на горючую массу. В блоке № 2 задается число узлов расчетной сетки, рассчитывается шаг по координате, присвоение начальных значений температур в узлах расчетной сетки, расчет коэффициентов теплопроводности. В блоке № 3 рассчитывается допустимый шаг по времени. В блоках № 4, 5 и 6 осуществляется выбор наименьшего шага по времени. В блоке № 7 проводится расчет плотности теплового потока излучением,

¹ Paramonov A. P., Kadyrov M. R., Trinchenco A. A. Research on Influence of the Furnace Chamber Aerodynamics on Ecological Indicators of Boiler Plants (Part 1: Model of a Low-temperature Swirl Furnace) // Procedia Engineering 206. 2017. Pp. 546–551.

² Там же.

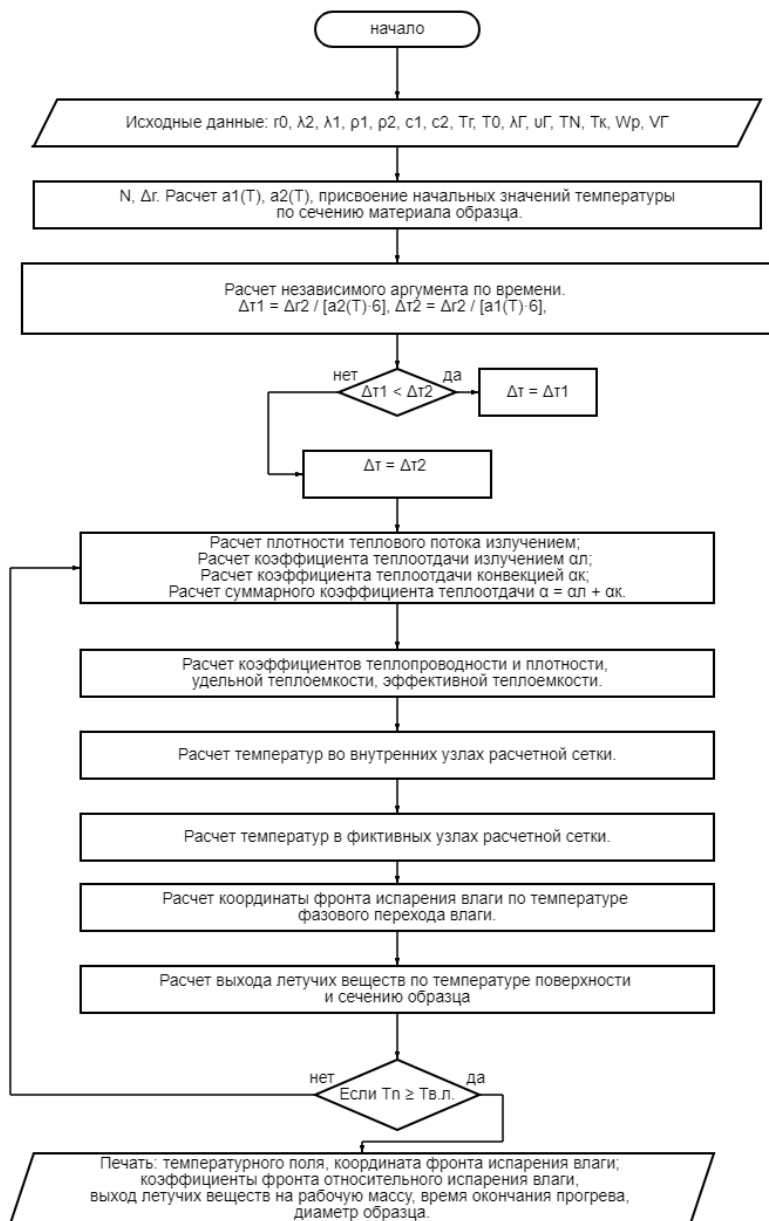


Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчета распределения температур по сечению образца из угля

коэффициентов теплоотдачи излучением и конвекцией, расчет суммарного коэффициента теплоотдачи. В блоке № 8 рассчитываются эффективные коэффициент теплопроводности, плотность, удельная теплоемкость. В блоке № 9 проводится расчет

температур во внутренних узлах расчетной сетки. В блоке № 10 рассчитываются температуры в фиктивных узлах расчетной сетки. В блоке № 11 рассчитываются координаты фронта испарения влаги по температуре фазового влаги. В блоке № 12 проводится расчет выхода летучих веществ по температурному полю. В блоке № 13 сравнивается температура поверхности образца – больше температуры начала выхода летучих или нет. Если меньше, то цикл повторяется, если больше или равно, выходные данные выводятся на печать.

Результаты исследования прогрева одиночных образцов угля. Расчет температурных кривых для условий прогрева (рис. 3) представлен на рис. 5.

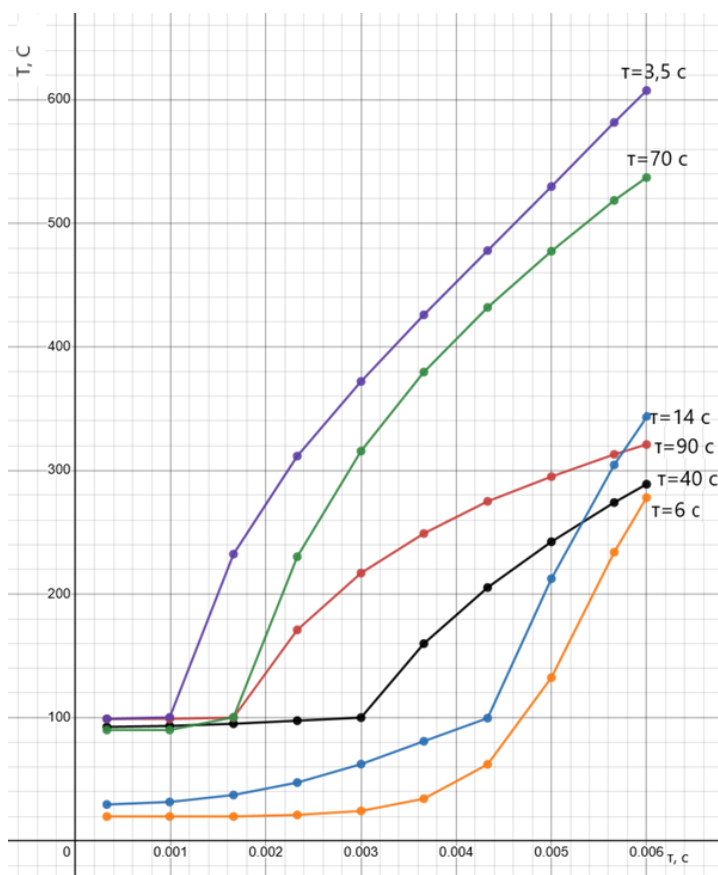


Рис. 5. Расчетные значения температур по сечению образца сферической формы в различные моменты времени

1 – $\tau = 40$ с, при температуре печи 633 К; 2 – $\tau = 90$ с, при температуре печи 633 К; 3 – $\tau = 14$ с, при температуре печи 988 К; 4 – $\tau = 70$ с, при температуре печи 988 К; 5 – $\tau = 6$ с, при температуре печи 1173 К; 6 – $\tau = 35$ с, при температуре печи 1173 К

Из рис. 5 видно, что фронт испарения влаги переместился на $1/3 g_0$, т. е. в момент удара о преграду поверхность материала абсолютно сухая.

Обработка экспериментальных данных по методике (1)–(10) показывает, что кинетическая энергия разрушения при критических скоростях удара о преграду уменьшается с увеличением продолжительности прогрева и размеров образцов.

На рис. 6 представлены расчетные данные по влиянию продолжительности нагрева образцов на кинетическую энергию разрушения при кинетической скорости разрушения.

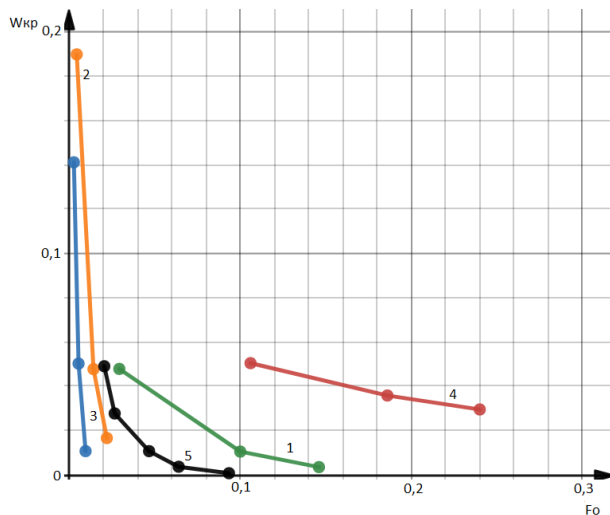


Рис. 6. Изменение кинетической энергии разрушения от времени выдержки в печи.

1 – масса образца $1 \cdot 10^{-3}$ кг, температура в печи 988 К, 2 – масса образца $3,77 \cdot 10^{-3}$ кг, температура в печи 988 К, 3 – масса образца $10,7 \cdot 10^{-3}$ кг, температура в печи 988 К, 4 – масса образца $1 \cdot 10^{-3}$ кг, температура в печи 633 К, 5 – масса образца $1 \cdot 10^{-3}$ кг, температура в печи 1173 К

Из рис. 6 видно, что с увеличением продолжительности прогрева образцов кинетическая энергия разрушения уменьшается. С увеличением размеров образцов кинетическая энергия разрушения уменьшается (кривые 1, 2, 3). Увеличение температуры в печи при прогреве образцов уменьшает кинетическую энергию разрушения (кривые 1, 4, 5).

Здесь $Fo = a_0 \cdot \tau / r_0^2$ – число Фурье; a_0 – начальное значение коэффициента теплопроводности.

На рис. 7 представлено изменение относительного фронта испарения влаги во времени и суммарного выхода летучих веществ (обработка экспериментальных данных).

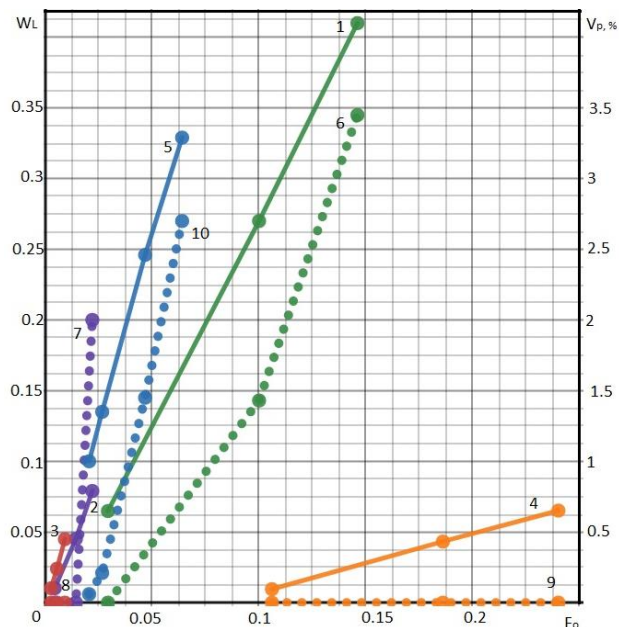


Рис. 7. Зависимость относительного фронта испарения влаги во времени и суммарного выхода летучих веществ. W_L , в долях — координата фронта испарения (сплошная линия —); V_p , в % — выход летучих веществ (пунктирная линия - - -); 1, 6 — масса образца $1 \cdot 10^{-3}$ кг, температура в печи 988 К; 2, 7 — масса образца $3.77 \cdot 10^{-3}$ кг, температура в печи 988 К; 3, 8 — масса образца $10.7 \cdot 10^{-3}$ кг, температура в печи 988 К; 4, 9 — масса образца $1 \cdot 10^{-3}$ кг, температура в печи 633 К; 5, 10 — масса образца $10.7 \cdot 10^{-3}$ кг, температура в печи 1173 К

На рис. 7 представлены результаты обработки экспериментальных данных (рис. 2, 3) по методике (1)–(10). С поверхностного слоя влага полностью вышла, и к концу прогрева из поверхностного слоя начинают выходить летучие вещества. С увеличением температуры прогрева и, следовательно, уменьшения продолжительности прогрева, суммарный выход летучих составляет до 5 %. При достижении поверхностью образца температуры воспламенения летучие могут загореться.

Обсуждение результатов исследования. Обработка опытных данных по прогреву образцов из ирша-бородинского бурого угля (рис. 2 и 3) по предложенной методике показывает, что кинетическая энергия разрушения образцов уменьшается при критических скоростях при ударе с увеличением размеров образцов и увеличением температуры прогрева в печи. При этом продолжительность прогрева меньше, чем время начала воспламенения летучих веществ, выходящих из образцов. Максимальное количество суммарного выхода летучих веществ составляет 7,12 %. При температуре в печи 633 К для образцов диаметром 0,012 м из материала выходит почти влага, а суммарный выход летучих веществ составляет 5,28 %. При продолжительности нагрева в течение 90 с кинетическая энергия разрушения образцов уменьшается в 3,8 раза.

При температуре в печи 988 К для образцов диаметром 0,012 м из образца уходит вся влага, а выход летучих составляет 7,12 %. При продолжительности нагрева 55 с кинетическая энергия разрушения образцов уменьшается в 25 раз.

При температуре в печи 1173 К для образцов диаметром 0,012 м выходит половина влаги, а выход летучих составляет 5,88 %. При продолжительности нагрева 35 с кинетическая энергия разрушения уменьшается в 117 раз.

При температуре в печи 988 К для образца диаметром 0,01867 м влаги выходит 38,8 %, а выход летучих составляет 3,21 %. При продолжительности нагрева 30 с кинетическая энергия уменьшается в 36 раз.

При температуре в печи 988 К для образца диаметром 0,02657 м влаги выходит 16,1 %, а выход летучих веществ составляет 0,495 %. При продолжительности нагрева 17,5 с кинетическая энергия уменьшается в 11 раз.

Результаты исследования можно использовать при проектировании устройств термической подготовки топлива перед мельницами. Использование устройств термической подготовки топлива позволит увеличить производительность мельниц и снизить удельные расходы энергии на производство конечного продукта.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования процесса термомеханического разрушения показали, что прочность образцов из угля при нагревании уменьшается. С увеличением продолжительности обработки и температуры, при которой производится прогрев образцов в печи, их прочность уменьшается более чем в три раза. С увеличением диаметра образцов прочность их также существенно уменьшается. Предложена математическая модель расчета температурных полей по сечению образцов во времени с учетом фазового перехода влаги и выхода летучих веществ при граничных условиях, учитывающих конвективный и лучистый теплообмен до воспламенения летучих веществ. Выделение теплоты фазового перехода воды учитывается с помощью эффективной теплоемкости. Координата фронта фазового перехода влаги определяется по температуре фазового перехода воды. Предложен алгоритм расчета температурных полей для образцов сферической формы при прогреве с учетом фазового перехода влаги и выхода летучих веществ. Обработка экспериментальных данных с помощью математической модели, протестированной и адаптированной по температуре и времени начала воспламенения летучих веществ, показала, что продолжительность термической обработки можно ограничить достижением температуры поверхности, равной температуре начала выхода летучих веществ. При этом значения кинетической энергии разрушения при высокотемпературной термической обработке уменьшается более чем в 10 раз. Установлено, что термомеханическое разрушение бурых углей позволяет увеличить производительность мельниц и снизить затраты энергии на производство конечного продукта.

Список источников

Андреев С. Е. Законы дробления // Горный журнал. 1952. № 7. С. 36–38.

Андреев С. Е., Перов В. А., Зверевич В. В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Москва: Недра, 1980. 415 с.

Гофман М. С., Шабалин К. П. О дроблении тел свободным ударом // Горный журнал. 1964. № 3. С. 64–67.

Любов В. К. Изучение особенностей горения крупных частиц натурального топлива с целью повышения эффективности работы вихревых топок ЛПИ: дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1984. 251 с.

Любов В. К., Сосенский А. И., Шестаков С. М. Экспериментальная установка для исследования тепло- и массообмена при прогреве и горении частиц твердого топлива. Ленинград: [Б. и.], 1984. 14 с.

Материалы к совещанию по новым перспективным конструкциям парогенераторов для энергоблоков ТЭЦ и ТЭС (Ростов-на-Дону, июнь 1982 г.). Новосибирск, 1982. 16 с.

Померанцев В. В. др. Опыт-промышленный котел БКЗ-420-140-9 с низкотемпературной вихревой топкой // Энергомашиностроение. 1985. № 8. С. 32–34.

Померанцев В. В., Финкер Ф. Э., Ветрова Н. В. Экспериментальные обоснования вихревой схемы сжигания фрезерного торфа // Труды ДВГУ. Вып. 1. Владивосток, 1976. С. 15–20.

Померанцев В. В., Шестаков С. М., Дудукалов А. П., Усик Б. В. Проблемы разработки теории горения твердого топлива. Горение органического топлива: материалы Всесоюзной конференции. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1985. Ч. 1. С. 22–32.

Серант Ф. А., Шестаков С. М., Померанцев В. В. и др. Сжигание немолотых азейских бурых углей в низкотемпературной вихревой топке по схеме ЛПИ-ИТЭЦ-10 // Теплоэнергетика. 1983. №7. С. 36–41.

Синицын Н. Н. Исследование процесса термо-пневморазрушения частиц для повышения эффективности сжигания дробленого топлива в топке ЛПИ: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 1992. 192 с.

Шестаков С. М., Любов В. К., Павлов А. М., Усик Б. В. Особенности низкотемпературного вихревого сжигания немолотых бурых и каменных углей // Горение органического топлива: материалы V Всесоюзной конференции ИТФ СО АН СССР. Новосибирск: СО АН СССР, 1985. Ч. 2. С. 225–234.

Grigoryev K.A., Roundyguine Y.A., Skuditskii V.E., Anoshin R.G. Low-Temperature Swirl Fuel Combustion: Development and Experience // Cleaner Combustion and Sustainable World / Qi, H., Zhao, B. (eds) . 2013. Pp. 999–1003.

Paramonov A. P., Kadyrov M. R., Trinchenko A. A. Research on Influence of the Furnace Chamber Aerodynamics on Ecological Indicators of Boiler Plants (Part 1: Model of a Low-temperature Swirl Furnace) // Procedia Engineering 206. 2017. Pp. 546–551.

Paramonov A. P., Kadyrov M.R., Trinchenko A. A. Research on Influence of the Furnace Chamber Aerodynamics on Ecological Indicators of Boiler Plants (Part 2: Results of a Low-temperature Swirl Combustion Practical ...) // Procedia Engineering 206. 2017. Pp. 558–563.

Paramonov A.P, Teixeira F.N. Thermal and environmental performance of a modern bagasse co-generation boiler // EES Lora. Zuckerindustrie. 2004. Vol. 129 (12). Pp. 881–886.

Shestakov S.M., Paramonov A.P. Calculation of the burning-out process of crushed fuel particles in furnace with low-temperature eddy at PK-24 boiler. Engineering. 1993. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Calculation-of-crushed-fuel-particle-burnout-in-a-a-Shestakov-Paramonov/295c8db6f00a3efd7db9779c8ea1e53e73d9d93a> (дата доступа: 01.12.2022)

Trinchenko A. A., Paramonov A. P. Implementation of low-temperature swirl burning for power use of bituminous coal // J. Sci. and tech. sheets SPbSTU. 2015. № 4 (231). Pp. 72–81.

Trinchenko A. A., Paramonov A. P. Introduction of low-temperature swirl technology of burning as a way of increase in ecological of low power boilers // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 90 (1), 012094.

Trinchenko A. A., Paramonov A. P. Low-temperature swirl burning as technological method of simultaneous decrease in emissions of nitrogen and sulfur oxides (Part 1. Principles, organization and mathematical ... Model of Furnace Process) // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT / V. Murgul, Z. Popovic (eds). 2017. Pp. 1074–1082.

Trinchenko A., Paramonov A., Kadyrov M., Koryabkin A. Numerical research of reburning-process of burning of coal-dust torch // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 90 (1), 012012.

References

Andreev S. E. Zakony drobleniia [Fracturing laws]. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 1952, no. 7, pp. 36–38.

Andreev S. E., Perov V. A., Zverevich V. V. *Droblenie, izmel'chenie i grokhochenie poleznykh iskopaemykh* [Fracturing, grinding and trommelling of minerals]. Moscow: Nedra, 1980. 415 p.

Gofman M. S., Shabalin K. P. O droblenii tel svobodnym udarom [On fracturing bodies with a free impact]. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 1964, no. 3, pp. 64–67.

Liubov V. K. *Izuchenie osobennostei gorenii krupnykh chastits natural'nogo topliva s tsel'iu povysheniia effektivnosti raboty vikhrevykh topok LPI* [Studying the features of burning large particles of natural fuel to increase the efficiency of swirl-type furnaces of LPI: Cand. thesis in Technical Sciences]. Leningrad, 1984. 251 p.

Liubov V. K., Sosenskii A. I., Shestakov S. M. *Eksperimental'naia ustanovka dlia issledovaniia teplo- i massoobmena pri progreve i gorenii chastits tverdogo topliva* [Experimental unit for studying heat and mass exchange during heating and combustion of solid fuel particles]. Leningrad, 1984. 14 p.

Materialy k soveshchaniu po novym perspektivnym konstruktsiiam parogeneratorov dlia energoblokov TETs i TES (Rostov-na-Donu, iun' 1982 g.) [Materials for the meeting on new promising structures of steam generators for CHPP and TPP power units (Rostov-on-Don, June 1982)]. Novosibirsk, 1982. 16 p.

Pomerantsev V. V. dr. Opytno-promyshlennyi kotel BKZ-420-140-9 s nizkotemperaturnoi vikhrevoi topkoi [Pilot industrial boiler BKZ-420-140-9 with a low-temperature swirl-type furnace]. *Energomashinostroenie* [Power Plant Engineering], 1985, no. 8, pp. 32–34.

Pomerantsev V. V., Finker F. E., Vetrova N. V. Eksperimental'nye obosnovaniia vikhrevoi skhemy szhiganiia freznogo torfa [Experimental justifications of the swirl scheme for burning milled peat]. *Trudy DVGU* [Proceedings of Far Eastern State University]. Vladivostok, 1976, iss. 1, pp. 15–20.

Pomerantsev V. V., Shestakov S. M., Dudukalov A. P., Usik B. V. *Problemy razrabotki teorii gorenii tverdogo topliva. Gorenii organicheskogo topliva: materialy Vsesoiuznoi konferentsii* [Problems of developing the theory of solid fuel combustion. Burning of organic fuel: Proceedings of the All-Union Conference]. Novosibirsk: ITF SO AN SSSR, 1985, Part 1, pp. 22–32.

Serant F. A., Shestakov S. M., Pomerantsev V. V. i dr. Szhiganie nemolotnykh Azeiskikh burykh uglei v nizkotemperaturnoi vikhrevoi topke po skheme LPI-ITETs-10 [Burning Azeisky old brown coals in a low temperature vortex furnace according to the scheme LPI-ITES-10]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 1983, no. 7, pp. 36–41.

Sinitsyn N. N. *Issledovanie protessa termo-pnevморазрушения chastits dlia povysheniia effektivnosti szhiganiia drobnogo topliva v topke LPI* [Studying the process of thermal-pneumatic destruction of particles to increase the efficiency of combustion of fragmented fuel in the LPI furnace: Cand. thesis in Technical Sciences]. St Petersburg, 1992. 192 p.

Shestakov S. M., Liubov V. K., Pavlov A. M., Usik B. V. Osobennosti nizkotemperaturnogo vikhrevogo szhiganiia nemolotyykh burykh i kamennykh uglei [Features of low-temperature swirl burning of non-ground brown and hard coals]. *Gorenie organicheskogo topliva: materialy V Vsesoiuznoi konferentsii ITF SO AN SSSR* [Burning of organic fuel: Proceedings of the V All-Union Conference of the Institute for Theoretical Physics SB Academy of Sciences of the USSR]. Novosibirsk: SO AN SSSR, 1985, part 2, pp. 225–234.

Grigoryev K.A., Roundyguine Y.A., Skuditskii V.E., Anoshin R.G. Low-Temperature Swirl Fuel Combustion: Development and Experience. *Cleaner Combustion and Sustainable World*, 2013, pp. 999–1003.

Paramonov A. P., Kadyrov M. R., Trinchenko A. A. Research on Influence of the Furnace Chamber Aerodynamics on Ecological Indicators of Boiler Plants (Part 1: Model of a Low-temperature Swirl Furnace). *Procedia Engineering*, 2017, no. 206, pp. 546–551.

Paramonov A. P., Kadyrov M.R., Trinchenko A. A. Research on Influence of the Furnace Chamber Aerodynamics on Ecological Indicators of Boiler Plants (Part 2: Results of a Low-temperature Swirl Combustion Practical ...). *Procedia Engineering*, 2017, no. 206, pp. 558–563.

Paramonov A.P, Teixeira F.N. Thermal and environmental performance of a modern bagasse co-generation boiler. *EES Lora. Zuckerindustrie*, 2004, vol. 129 (12), pp. 881–886.

Shestakov S.M., Paramonov A.P. Calculation of the burning-out process of crushed fuel particles in furnace with low-temperature eddy at PK-24 boiler. *Engineering*, 1993. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Calculation-of-crushed-fuel-particle-burnout-in-a-a-Shestakov-Paramonov/295c8db6f00a3efd7db9779c8ea1e53e73d9d93a> (accessed: 01.12.2022)

Trinchenko A. A., Paramonov A. P. Implementation of low-temperature swirl burning for power use of bituminous coal. *J. Sci. and tech. sheets SPbSTU*, 2015, no. 4 (231), pp. 72–81.

Trinchenko A. A., Paramonov A. P. Introduction of low-temperature swirl technology of burning as a way of increase in ecological of low power boilers. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, Vol. 90 (1), 012094.

Trinchenko A. A., Paramonov A. P. Low-temperature swirl burning as technological method of simultaneous decrease in emissions of nitrogen and sulfur oxides (Part 1. Principles, organization and mathematical model of furnace process). *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT*, 2017, pp. 1074–1082.

Trinchenko A., Paramonov A., Kadyrov M., Koryabkin A. Numerical research of reburning-process of burning of coal-dust torch. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017, Vol. 90 (1), 012012.

Сведения об авторах

Николай Николаевич Синицын – д-р техн. наук, профессор, nnsinitcyn@chsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8919-0573>, Череповецкий государственный университет (5, пр. Луначарского, 162600 г. Череповец, Россия), профессор кафедры математики, Военный ордена Жукова университет радиоэлектроники (д. 126, Советский проспект, 162622 Череповец, Россия); **Nikolay N. Sinitsyn** – Doctor of Technical Sciences, Professor; the Department of Mathematics, Military Order of Zhukov University of Radio Electronics; Cherepovets State University nnsinitcyn@chsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8919-0573>, (5, pr. Lunacharskogo, 162600 Cherepovets, Russian Federation), (126, pr. Sovetsky, 162622 Cherepovets, Russia).

Наталья Владимировна Запатрина – кандидат технических наук, заведующий кафедрой, ордена Жукова университет радиоэлектроники (д. 126, Советский проспект, 162622 Череповец, Россия); **Natalia V. Zapatrina** – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department, Military Order of Zhukov University of Radio Electronics (126, pr. Sovetsky, 162622 Cherepovets, Russia).

Вера Николаевна Куценко – аспирант, verunkaD@yandex.ru, Череповецкий государственный университет (5, пр. Луначарского, 162600 Череповец, Россия); **Vera N. Kutsenko** – Postgraduate student, Cherepovets State University (5, pr. Lunacharskogo, 162600 Cherepovets, Russian Federation).

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 19.07.2022; одобрена после рецензирования 06.12.2022; принята к публикации 20.12.2022.

The article was submitted 19.07.2022; Approved after reviewing 06.12.2022; Accepted for publication 20.12.2022.