

Научная статья
УДК 662.6/.9 + 519.87
DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-92-99

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУШКИ ПЛОТНОГО СЛОЯ КУСКОВ УГЛЯ, ПРОДУВАЕМОГО ОТХОДЯЩИМИ ГАЗАМИ КОТЛОАГРЕГАТОВ

Николай Николаевич Синицын^{1✉}, **Наталья Владимировна Запатрина**²,
Юлия Владимировна Грибкова³, **Ирина Анатольевна Сарычева**⁴,
Елена Викторовна Голицына⁵, **Ксения Александровна Шушкова**⁶

^{1,6} Череповецкий государственный университет, Череповец, Россия

^{1,2,3,4,5} Военный ордена Жукова университет радиоэлектроники Минобороны России,
Череповец, Россия

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

² z_natalia777@mail.ru

³ 150475@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2370-1251>

⁴ sariranat@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8925-209X>

⁵ e_golitsyna@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9602-2114>

⁶ ka.shushkova1@severstal.com

Аннотация. В статье предложена методика расчета аэродинамического сопротивления плотного слоя натурального твердого топлива для прогнозирования размеров сушильной установки с учетом фазового перехода влаги из жидкого состояния в паровое и продолжительность сушки отходящими газами котлоагрегата слоя разной высоты. Представлен алгоритм и выполнен расчет температурных полей материала и газа в продуваемом движущемся плотном слое угля с учетом аэродинамического сопротивления плотного слоя при изменении скорости газов, проходящих через слой.

Ключевые слова: плотный слой, нагрев, твердое топливо, математическая модель, температурное поле, отходящие газы котлоагрегата

Для цитирования: Синицын Н. Н., Запатрина Н. В., Грибкова Ю. В., Сарычева И. А., Голицына Е. В., Шушкова К. А. Математическое моделирование сушки плотного слоя кусков угля, продуваемого отходящими газами котлоагрегатов // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 2. С. 92–99. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-92-99.

Original article

MATHEMATICAL MODELING OF DRYING DENSE COAL LAYER VENTILATED BY BOILER UNITS' EXHAUST GASES

Nikolay N. Sinitsyn^{1✉}, **Natalya V. Zapatrina**², **Yuliya V. Gribkova**³, **Irina A. Sarycheva**⁴,
Elena V. Golitsyna⁵, **Kseniya A. Shushkova**⁶

^{1,6} Cherepovets State University, Cherepovets, Russia

^{1,2,3,4,5} Military Order of Zhukov University of Radio Electronics, Cherepovets, Russia

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

² z_natalia777@mail.ru

³ 150475@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2370-1251>

⁴ sariranat@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8925-209X>

⁵ e_golitsyna@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9602-2114>

⁶ ka.shushkova1@severstal.com

Abstract. The article proposes a method for calculating air resistance of a dense layer of natural solid fuel in order to forecast the drying installation size while taking into account the moisture phase change from

liquid to steam and duration of drying process of various height layers with boiler unit's exhaust gases. An algorithm is presented and temperature patterns of material and gas in ventilated moving dense coal layer is calculated considering air resistance of a dense layer when velocity of gas passing through the layers changes.

Keywords: dense layer, heating, solid fuel, mathematical model, temperature pattern, boiler unit's exhaust gases

For citation: Sinitsyn N. N., Zapatrina N. V., Gribkova Yu. V., Sarycheva I. A., Golitsyna E. V., Shushkova K. A. Mathematical modeling of drying dense coal layer ventilated by boiler units' exhaust gases. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(2):92–99. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-92-99.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из путей решения проблемы экономии топлива и повышения энергоэффективности котельных установок является разработка глубокой утилизации теплоты уходящих газов из котлов [1–4]. Методы расчета температурных полей в плотном слое железорудных окатышей при перекрестном токе газа и материала представлено в [5, с. 152–175], аналитическое решение температурного поля плотного слоя окатышей представлено в [6]. Твердое топливо при сжигании в камерных топках предварительно измельчают и в виде пыли в смеси с воздухом вдувают в топочную камеру котлоагрегатов, где оно сгорает. Недостатком сжигания топлива в пылевидном состоянии является сложность, громоздкость и в большинстве случаев высокая стоимость оборудования пылеприготовления, а также значительный расход на него электроэнергии. Для улучшения размола топлива, хранения и транспортировки пыли, а также интенсификации ее зажигания и горения топливо подсушивают. Сушка топлива повышает его теплотворную способность, позволяет эффективно использовать низкосортное топливо в различных топочных устройствах и промышленных печах, требующих высокотемпературного режима. На электростанциях имеются отходящие газы котлов, используя которые на сушку

топлива можно значительно уменьшить расход тепла на 1 кг испаренной влаги при испарении ее в топке парового котла.

В данной работе рассматривается возможность сушки твердого топлива отходящими дымовыми газами котельного агрегата. Процесс сушки проводится в движущемся плотном поперечно продуваемом слое угольного топлива. Для моделирования процесса необходимо разработать математическую модель прогрева плотного продуваемого слоя твердого натурального топлива и провести моделирование прогрева этого слоя при температурах отходящих газов из котлоагрегатов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве математического аппарата при такого рода расчетах используются решения Шумана и Анцелиуса [7, 8]. Они позволяют найти температурное поле в нагреваемом неподвижном плотном слое, в продуваемом газом слое или в поперечно продуваемом движущемся плотном слое. Приводимые решения справедливы для случаев, когда начальная температура во всех точках слоя одинакова, а температура газа на входе в слой постоянна во времени.

На рис. 1 представлена расчетная схема для температурного поля плотного движущегося продуваемого слоя материала.

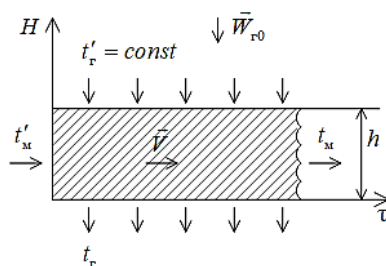


Рис. 1. Расчетная схема для температурного поля плотного продуваемого движущегося слоя материала

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Здесь t'_r – температура газа на входе в слой; t_r – температура газа на выходе из слоя в момент времени τ ; t'_m – начальная температура материала в слое; t_m – температура материала в момент времени τ ; $\vec{W}_{r0}$ – вектор скорости газа на входе в слой; $\vec{V}$ – вектор скорости слоя; h – высота слоя.

Плотный слой угля расположен на продуваемой цепкой решетке. Отходящие дымовые газы котлоагрегатов продувают поперечно движущийся слой угля. Температура горячего газа t'_r постоянна по всей площади слоя. Температура материала на входе в слой также постоянна. Слой топлива высотой h движется с постоянной скоростью $\vec{V}$.

Для этих условий решения задачи Шумана в наиболее удобной для расчетов форме представляются следующими выражениями [8]:

$$\theta_m = \frac{t'_m - t'_r}{t'_r - t'_m} = e^{-Y} \int_0^Z e^{-\varepsilon} I_0(2\sqrt{Y\varepsilon}) d\varepsilon; \quad (1)$$

$$\theta_r = \frac{t_r - t'_m}{t'_r - t'_m} = 1 - e^{-Z} \int_0^Y e^{-\varepsilon} I_0(2\sqrt{Z\varepsilon}) d\varepsilon, \quad (2)$$

в которых относительная температура для материала θ_m и для газа θ_r определяются безразмерными числами высоты слоя Y и времени

$$Z: Y = \frac{k_v \cdot h}{C_r \cdot W_{r0}}; Z = \frac{k_v \cdot \tau}{C_m \cdot (1-f)}, \text{ а } I_0(x) \text{ является}$$

функцией Бесселя первого рода от мнимого аргумента;

$$k_v = \left(\frac{1}{\alpha_v} + \frac{d_m^2}{A(1-f)\lambda_m} \right)^{-1} -$$

суммарный коэффициент теплопередачи, Вт/(м³К); $\alpha_v = \alpha_F \cdot F$ – объемный коэффициент теплопередачи, Вт/(м³К); α_F – коэффициент теплообмена Вт/(м²К);

$$F = \frac{6(1-f)}{d_m}, \text{ м}^2 -$$

для кусков сферической формы, а для кусков неправильной формы

$$F = \frac{7,5(1-f)}{d_m}, \text{ м}^2;$$

d_m – диаметр куска, м; λ_m – коэффициент теп-

лопроводности материала, Вт/(мК); $A = 60$ для частиц сферической формы и $A = 75$ для кусков неправильной формы; h – высота слоя, м; f – порозность слоя; C_r – объемная теплоемкость газа, Дж/(м³К); W_{r0} – скорость газа на свободное сечение при нормальных условиях, м/с; C_m – кажущаяся теплоемкость слоя материала, Дж/(м³К), учитывающая испарение влаги; τ – время прогрева, с.

Для частиц правильной сферической или близкой к ней формы расчет коэффициентов теплоотдачи α_F при нагреве термически тонких частиц, для которых число Био не превышает 1, выполнен по уравнениям [7, 8]:

$$Nu = 0,61 \cdot Re^{0,67} \text{ (для } Re > 200), \quad (3)$$

$$Nu = 0,106 \cdot Re \text{ (для } Re \leq 200), \quad (4)$$

где $Nu = \frac{\alpha_F \cdot d_m}{\lambda_r}$; $Re = \frac{W_{r0} \cdot d_m}{\nu_t}$; λ_r – коэффициент теплопроводности газов; ν_t – коэффициент кинематической вязкости газа. Свойства газа выбирают для средней температуры системы.

Расчет кажущейся теплоемкости C_m проводят по выражению (5):

$$C_m = \rho_{\text{нас}} \cdot C_c + \frac{(\rho_{\text{нас}} \cdot W \cdot R_t + \rho_{\text{нас}} \cdot W \cdot C_{H_2O} \cdot \Delta t)}{\Delta t}, \quad (5)$$

где $\rho_{\text{нас}} = 800 \text{ кг/м}^3$ для каменных углей; C_c – удельная теплоемкость сухого угля; Δt – интервал температур нагрева; W – влажность угля в долях; R_t – теплота испарения влаги, равная 2 256,8 кДж/кг; C_{H_2O} – удельная теплоемкость воды, равная 4,2 кДж/кг; порозность слоя угля определяется по формуле

$$f = 1 - \frac{\rho_{\text{нас}}}{\rho_m}; \rho_m = \rho_{m1} \cdot \frac{100 - w_1^r}{100 - w_2^r}; \rho_{m1} = \rho_{k0} \cdot (1 + K \cdot A^d);$$

$\rho_{k0} = 1205 \text{ кг/м}^3$; $K = 0,0095$ [9] для кузнечного каменного угля; A^d – зольность на сухую массу, равная по опытным данным 3,3...5,8 % [9]; w_1^r и w_2^r – влажность в состоя-

нии 1 и в состоянии 2 в % масс. Для кузнецкого угля $\lambda_m = 0,201$ Вт/(мК).

Начало выхода летучих веществ $T_{\text{лет}}^{\text{вых}} = 320$ °С.

Теплоемкость материала угля рассчитывается по формуле (6):

$$C_2 = \frac{(100 - w^r) \cdot C_c + C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot w^r}{100}, \quad (6)$$

где w^r – влажность материала угля, %.

Примем для определенности каменный кузнецкий газовый уголь. Температура начала выхода летучих веществ 320 °С. Расчетный расход воздуха на горение $V^0 = 6,88$ м³/кг, дымовых газов $V_r^0 = 7,42$ м³/кг [10]. Для котлов производительностью до 12 т/ч температура уходящих газов принимается 160–180 °С. Коэффициент избытка в уходящих $\alpha_{yx} = 1,6$, количество газов на выходе $V_r = 13,87$ м³/кг.

Из уравнения теплового баланса определяется расход топлива по выражению [10]:

$$B = \frac{D \cdot (i_{\text{пп}} - i'_{\text{пв}})}{Q_H^P \cdot \eta_{\text{ка}}} \cdot 100, \text{ кг/с}, \quad (7)$$

где D – паропроизводительность; $i_{\text{пп}}$ и $i'_{\text{пв}}$ – энтальпии перегретого пара и питательной воды; Q_H^P – теплота сгорания топлива, Дж/кг; $\eta_{\text{ка}}$ – коэффициент полезного действия котлоагрегата.

Объем воздуха и продуктов сгорания определяются по [10]. Количество сжигаемого твердого топлива в топке котла производительностью, например, 12 т/ч = 0,3476 т/с. Количество уходящих дымовых газов $V_{yx} = 7,42 \cdot 1,6 \cdot 0,3476 = 4,335$ м³/с.

При ширине конвейерной ленты 0,5 м и скорости газа $W_{r0} = 0,6$ м/с площадь поперечного сечения потока отходящих дымовых газов равна $F = 7,225$ м². Длина конвейерной ленты:

$$L = \frac{F}{0,5} = 14,45 \text{ м}. \quad (8)$$

Местное сопротивление поперечно продуваемого слоя рассчитывается по формуле [11]:

$$\Delta h_m = \xi_{\text{сл}} \cdot \frac{W_{r0}^2}{2} \cdot \rho_r, \quad (9)$$

где ρ_r – плотность газа от средней для системы температуры имеет вид (табл. 1) [10]:

Таблица 1

Зависимость плотности газа от температуры

t, °С	0	100	200	300
ρ_r , кг/м ³	1,295	0,950	0,748	0,617

Примечание: составлено авторами.

Сопротивление движущегося поперечно продуваемого слоя потоку газов определяется по формуле [11]:

$$\xi_{\text{сл}} = \xi_0 \cdot h \cdot \frac{a}{f^3}, \quad (10)$$

где $\xi_0 = \frac{36,3}{\text{Re}_a} + 0,4$.

Число Рейнольдса:

$$\text{Re}_a = \frac{4W_{r0}}{\nu_r \cdot a}, \quad (11)$$

где W_{r0} – скорость фильтрации продуваемой среды, м/с принимается равной скорости потока в сечении, свободном от сыпучего материала; $a = \frac{6}{d_m}(1 - f)$ – удельная поверхность нагрева (на единицу объема), м²/м³; d_m – диаметр частиц сыпучего материала, м; m – порозность (доля пустот в слое).

По производительности V_r и потере давления Δh_m производится выбор дымососа по методике [11].

Алгоритм расчета температурного поля.

На рис. 2 представлена блок-схема расчета температурного поля материала слоя и газа в поперечно продуваемом движущемся плотном слое.

В блоке № 1 осуществляется ввод исходных данных. В блоке № 2 рассчитываются теплофизические свойства газа. В блоке № 3

осуществляется расчет числа Рейнольдса, плотности материала в зависимости от влажности, кажущейся теплоемкости материала слоя.

В блоке № 4 сравнивается число Рейнольдса с критическим значением. В блоках № 5, 6, 7 проводится расчет коэффициентов теплоотдачи α_F и α_V .

В блоке № 8 выполняется расчет коэффициента теплопередачи в слое, безразмерная величина слоя и безразмерное время.

В блоке № 9 определяются безразмерные температуры газа и материала слоя.

В блоке № 10 печатаются результаты расчетов.

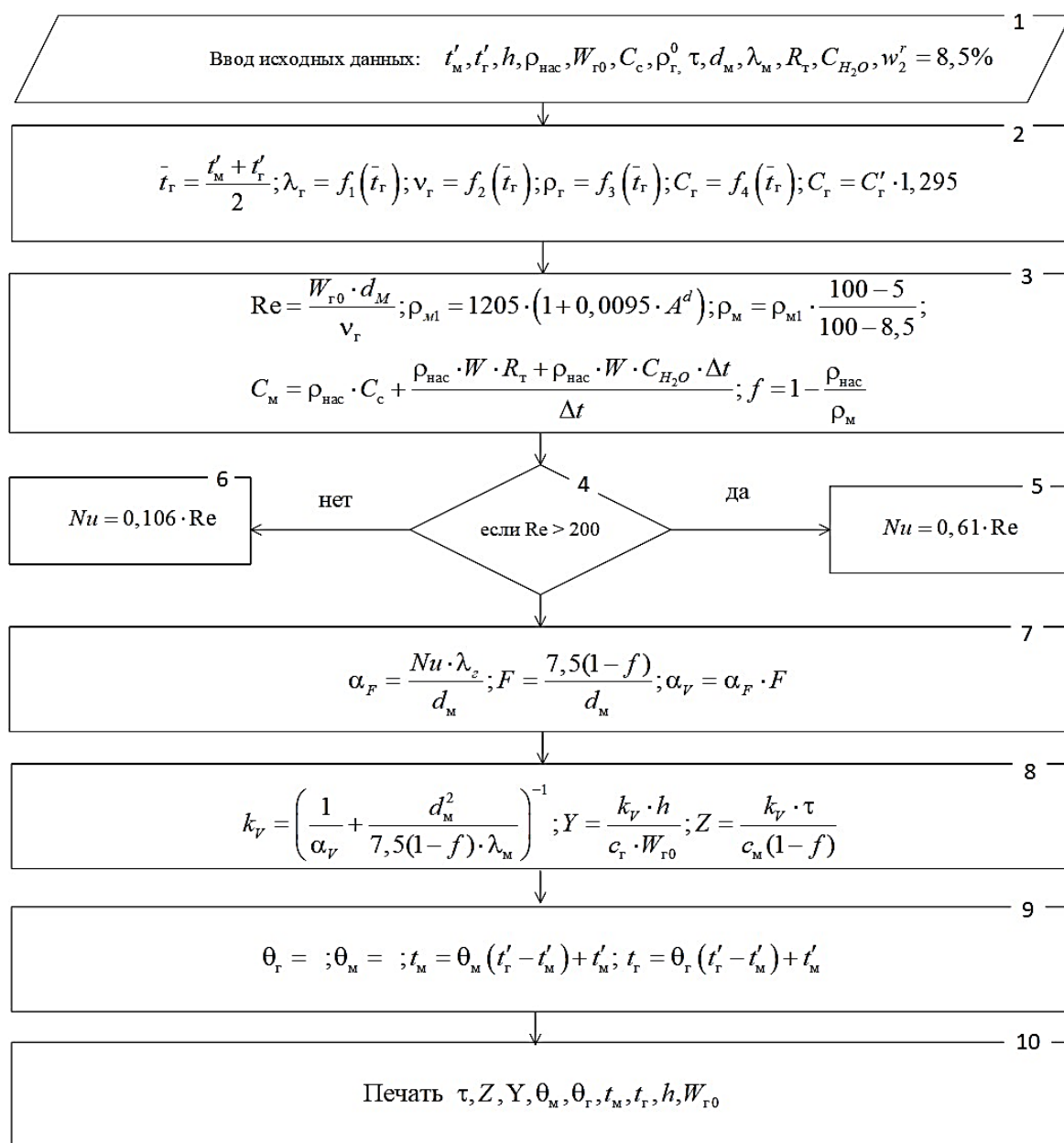


Рис. 2. Блок-схема расчета температурных полей газа и материала в движущемся поперечно продуваемом плотном слое

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 3 представлено температурное поле материала слоя при температуре газа на входе в слой $t'_r = 180^\circ\text{C}$ при $W_{r0} = 0,67$ м/с.

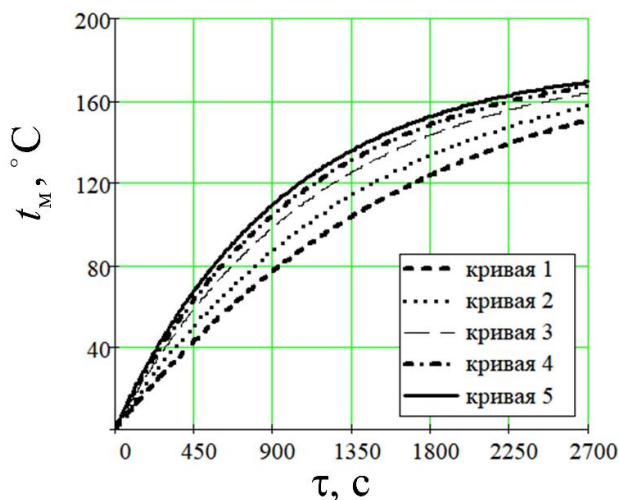


Рис. 3. Температура материала слоя:

1 – $h = 0,3$; 2 – $h = 0,2$; 3 – $h = 0,1$; 4 – $h = 0,05$; 5 – $h = 0,01$

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Из рис. 3 видно, что при скорости газа при $W_{r0} = 0,67$ м/с материал высушивается через 1 125 с при высоте слоя $h = 0,3$ м.

На рис. 4 представлено температурное поле материала слоя при температуре газа на входе в слой $t'_r = 180^\circ\text{C}$ при $W_{r0} = 0,1$ м/с.

Из рис. 4 видно, что материал высушивается через 2 450 с при высоте слоя $h = 0,3$ м.

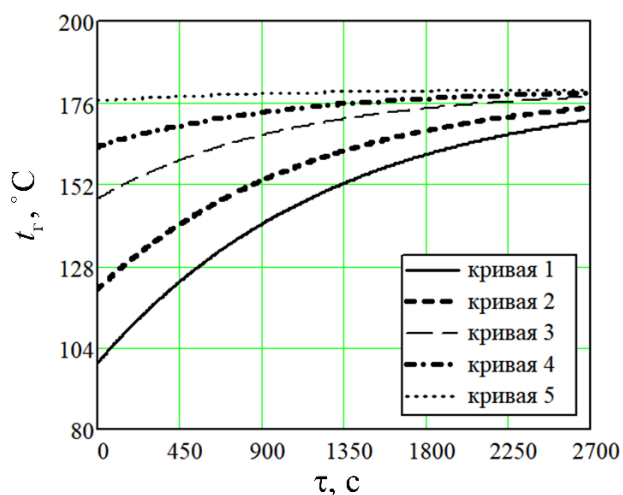


Рис. 4. Температура материала слоя:

1 – $h = 0,3$; 2 – $h = 0,2$; 3 – $h = 0,1$; 4 – $h = 0,05$; 5 – $h = 0,01$

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 5 представлено температурное поле газа на выходе из слоя при температуре газа на входе в слой $t'_r = 180^\circ\text{C}$ и $W_{r0} = 0,67 \text{ м/с}$.

Высота слоя $h = 0,3 \text{ м}$. Температура газа на выходе из слоя через 1 125 с равна $t_m = 150^\circ\text{C}$.

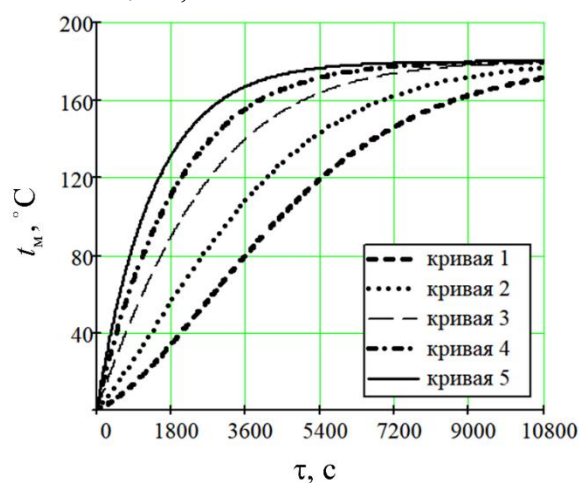


Рис. 5. Температура газа на выходе из слоя:
1 – $h = 0,3$; 2 – $h = 0,2$; 3 – $h = 0,1$; 4 – $h = 0,05$

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанная математическая модель прогрева движущегося поперечно продуваемого плотного слоя твердого натурального топлива позволяет получать температурные поля материала слоя и проходящего через слой газа с учетом фазового перехода влаги из жидкого состояния в паровое. Разработан алгоритм расчета температурных полей в поперечно продуваемом плотном слое. Температурное поле материала слоя позволяет определить продолжительность прогрева и сушки слоя, содержащего твердое натуральное топливо (рис. 3) при характерных скоростях на живое сечение при нормальных условиях газового потока (рис. 3–4), а также оценить температуру греющих газов на выходе плотного слоя в любой момент времени прогрева (рис. 5). Учет аэродинамики плотного слоя позволяет определить характерные размеры сушильной установки и подобрать

нагнетатель для преодоления сил аэродинамического сопротивления плотного слоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель прогрева плотного слоя топлива с учетом фазового перехода влаги отходящими газами котлоагрегата позволяет определить характерные размеры сушильной установки при проектировании. Полученные данные показывают, что топливо перед подачей в котельный агрегат можно нагреть и удалить часть или всю влагу. Удаление влаги топлива повышает теплотворность твердого натурального топлива. Утилизация теплоты отходящих газов котлоагрегатов повышает коэффициент полезного действия котельной установки. Для управления процессом сушки твердого натурального топлива необходимо разработать систему управления процессом сушки на промышленном объекте.

Список источников

1. Гарбер В., Козлов В., Кириллов К. Условия безопасной работы аппаратов термической сушки угля // Уголь. 2014. № 6. С. 62–65.
2. Шадек Е. Г. Оценка эффективности глубокой утилизации тепла продуктов сгорания котлов электростанций // Энергосбережение. 2016. № 2. С. 62–68.

References

1. Garber V., Kozlov V., Kirillov K. Conditions of safe operation of coal thermal drying units. *Ugol'*. 2014;(6):62–65. (In Russian).
2. Shaddek E. G. Evaluation of efficiency of deep recuperation of power plant boilers' combustion productions. *Energoberezhenie*. 2016;(2):62–68. (In Russian).

3. Мильто О. А., Калмыков К. С., Амосов Н. Т. Утилизация низкопотенциальной теплоты уходящих газов котельных агрегатов // Энергетические системы. 2018. № 1. С. 298–302.
4. Лунева С. К. Повышение энергоэффективности котельной путем утилизации тепловых потерь // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2016. № 1. С. 48–54.
5. Юрьев Б. П., Брук Л. Б., Спирин Н. А. и др. Основы теории процессов при обжиге железорудных окатышей : моногр. Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2018. 310 с.
6. Китаев Б. И., Тимофеев В. Н., Боковиков Б. А. и др. Тепло- и массообмен в плотном слое. М. : Metallurgiya, 1972. 430 с.
7. Казанцев Е. Н. Промышленные печи. М. : Metallurgiya, 1975. 368 с.
8. Зобнин Б. Ф., Казяев М. Д., Китаев Б. И. и др. Теплотехнические расчеты металлургических печей. М. : Metallurgiya, 1982. 358 с.
9. Любов В. К., Любова С. В. Повышение эффективности энергетического использования биотоплив. Архангельск : Солти, 2010. 495 с.
10. Тепловой расчет котлов: нормативный метод. СПб. : НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.
11. Аэродинамический расчет котельных установок: нормативный метод / под ред. С. Н. Мочана. Л. : Энергия, 1977. 256 с.
3. Milto O. A., Kalmykov K. S., Amosov N. T. Utilization of low-potential heat of exhaust gases of boiler room aggregates. *Energy System*. 2018;(1):298–302. (In Russian).
4. Luneva S. K. Increase of energy efficiency of the boiler room by utilization of thermal losses. *Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa*. 2016;(1):48–54. (In Russian).
5. Yuryev B. P., Bruk L. B., Spirin N. A. et al. *Osnovy teorii protsessov pri obzhige zhelezorudnykh okatyshei*. Monograph. Nizhny Tagil: STI (branch) UFU; 2018. 310 p. (In Russian).
6. Kitaev B. I., Timofeev V. N., Bokovikov B. A. et al. *Teplo- i massoobmen v plotnom sloe*. Moscow: Metallurgiya; 1972. 430 p. (In Russian).
7. Kazantsev E. N. *Promyshlennye pechi*. Moscow: Metallurgiya; 1975. 368 p. (In Russian).
8. Zobnin B. F., Kazyayev M. D., Kitaev B. I. et al. *Teplo- i tekhnicheskie raschety metallurgicheskikh pechei*. Moscow: Metallurgiya; 1982. 358 p. (In Russian).
9. Lyubov V. K., Lyubova S. V. *Povyshenie effektivnosti energeticheskogo ispolzovaniia biotopliv*. Arkhangelsk: Solti; 2010. 495 p. (In Russian).
10. *Teplovoi raschet kotlov: normativnyi metod*. St. Petersburg: NPO TsKTI; 1998. 256 p. (In Russian).
11. Mochan S. N., editor. *Aerodinamicheskii raschet kotelnnykh ustanovok: normativnyi metod*. Leningrad: Energiya; 1977. 256 p. (In Russian).

Информация об авторах

Н. Н. Синицын – доктор технических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования.

Н. В. Запатрина – кандидат технических наук, доцент.

Ю. В. Грибкова – кандидат технических наук.

И. А. Сарычева – кандидат технических наук.

Е. В. Голицына – кандидат технических наук, доцент.

К. А. Шушкова – аспирант.

Information about the authors

N. N. Sinitsyn – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Honored Worker of Higher Professional Education.

N. V. Zapatrina – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

Yu. V. Gribkova – Candidate of Sciences (Engineering).

I. A. Sarycheva – Candidate of Sciences (Engineering).

E. V. Golitsyna – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

K. A. Shushkova – Postgraduate.