

Моделирование процесса горения топлива в топке котла типа БКЗ 320-140

А.Д. Ульянов^а, М.И. Погодаев^б.

Братский государственный университет, Братск, Россия

^а coberul@gmail.com, ^б maks.pogodaev2012@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-4776-5030>, ^б <https://orcid.org/0009-0004-2226-6616>

Статья поступила 17.06.2025, принята 08.09.2025

Статья посвящена исследованию процесса горения топлива в топке котла типа БКЗ 320-140, который является одной из ключевых установок на теплоэлектростанциях в России. Рассматриваются конструктивные особенности котла, различные модификации, его производительность и возможность работы на различных видах топлива, включая природный газ, мазут и твёрдые виды топлива. Проведён анализ существующих моделей процесса горения топлива в котле. Особое внимание уделено методам моделирования этого процесса, таким как использование физических моделей и компьютерного моделирования с применением специализированных программных пакетов, например, MATLAB и ANSYS Fluent. Проведён обзор существующих методов моделирования, их преимуществ и недостатков, а также классификация подходов к построению моделей горения топлива. Актуальность данного исследования обусловлена рядом факторов: энергетической безопасностью, экологическим аспектом, повышением экономической эффективности, применением инновационных решений. Представлены результаты моделирования, показывающие влияние различных параметров на процесс горения, таких как состав топлива, температура. Полученные данные позволяют оптимизировать работу котла, повысить его энергоэффективность и сократить вредные выбросы в атмосферу. В заключении подчёркивается потенциал для оптимизации работы котла, что приводит к повышению эффективности и снижению вредных выбросов. Комплексное понимание динамики сгорания способствует улучшению текущих технологий котлов и закладывает основу для будущих инноваций в этой области. Представленная модель и её анализ являются собой ценные инструменты для инженеров и исследователей, а также могут быть использованы для оптимизации работы промышленных котлов, способствуя созданию более эффективных и устойчивых энергетических решений.

Ключевые слова: горение топлива; моделирование процесса; котёл БКЗ 320-140; анализ.

Modeling of the fuel combustion process in the BKZ 320-140 Boiler Furnace

A.D. Ulianov^а, M.I. Pogodaev^б

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^а coberul@gmail.com, ^б maks.pogodaev2012@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-4776-5030>, ^б <https://orcid.org/0009-0004-2226-6616>

Received 17.06.2025, accepted 08.09.2025.

The article is devoted to studying the combustion process of fuel in the furnace of the BKZ 320-140 boiler, which is one of the key installations at thermal power plants in Russia. It examines the design features of the boiler, its modifications, capacity, and ability to operate on various types of fuel, including natural gas, fuel oil, and solid fuels. An analysis of existing models of the fuel combustion process in the boiler has been carried out. Special attention is paid to modeling methods, such as the use of physical models and computer simulations employing specialized software packages MATLAB and ANSYS Fluent. A review of existing modeling methods, their advantages and disadvantages, as well as a classification of approaches to constructing combustion models have also been provided. The relevance of this research stems from several factors: energy security, environmental considerations, economic efficiency, and the implementation of innovative solutions. The simulation results show the impact of various parameters on the combustion process, such as fuel composition and temperature. These data allow optimizing boiler operation, increasing energy efficiency, and reducing harmful emissions into the atmosphere. The conclusion emphasizes the potential for optimizing boiler operation, leading to enhanced efficiency and lower harmful emissions. Comprehensive understanding of combustion dynamics helps improve current boiler technologies and provides a foundation for future innovations in this field. The developed model and its analysis offer valuable tools for engineers and researchers to optimize industrial boiler operation, contributing to more efficient and sustainable energy solutions.

Keywords: fuel combustion; modeling; BKZ 320-140 boiler; analysis.

Введение. Котлы серии БКЗ, производимые Барнаулским котельным заводом, представляют собой мощные энергетические установки, которые в основном применяются на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ). На сегодняшний день котлы данного типа составляют около 20 % от общего количества котлов, установленных на ТЭС в РФ [1]. Эти котлы обладают вертикально-

водотрубной конструкцией с естественной циркуляцией и однобарабанной конфигурацией. Для создания тяги используется сбалансированный подход, при этом некоторые модели дополнительно оснащены наддувом. Шлак, образующийся при сжигании твёрдого топлива, может иметь как твёрдую, так и жидкую форму. Расположение нагревательных поверхностей может быть вы-

полнено в *U*-образной, *T*-образной или башенной компоновке. В котлах данного типа могут сжигаться такие виды топлива, как природный газ, коксовый газ, каменный и бурый уголь, лигнит, антрацит, доменный газ и мазут. Существуют физические системы котлов производительностью пара около 500 тонн в час, использующие новую технологию для использования твёрдого топлива в циркулирующем кипящем слое [2–4].

В данном исследовании рассматривается моделирование процесса горения топлива в топке котла типа БКЗ 320-140. Котлы данного типа широко используются в России для производства электроэнергии и тепла. Стоит принять во внимание, что такие котлы имеют высокую мощность, что позволяет им обеспечивать значительные объёмы производства электроэнергии и тепла. Кроме того, БКЗ 320-140 известны своей надёжностью и долговечностью, что позволяет им работать в течение многих лет без значительных поломок. Немаловажно отметить, что котлы типа БКЗ 320-140 могут работать на различных типах топлива, что позволяет им адаптироваться к изменяющимся условиям энергетического рынка.

Паровой котлоагрегат БКЗ-320-140 (Е-320-13,8-560ГМ) выпускается в нескольких модификациях в зависимости от используемого топлива [5–7]:

- БКЗ 320-140 ГМ-8 для газа и мазута;
- БКЗ 340-140/29М-2 для мазута;
- БКЗ 320-140/25 для антрацита.

В модели БКЗ-320-140 можно использовать как природный газ, так и мазут. Котёл имеет вертикальную водотрубную конструкцию с одним барабаном, *U*-образную компоновку, естественную циркуляцию и газонепроницаемую конструкцию. Установленный котёл закрыт. В топке имеется шесть газомазутных горелок, по три в каждом ярусе, которые расположены на передней стенке. Это позволяет планировать процесс горения [8–10] (см. рис. 1).

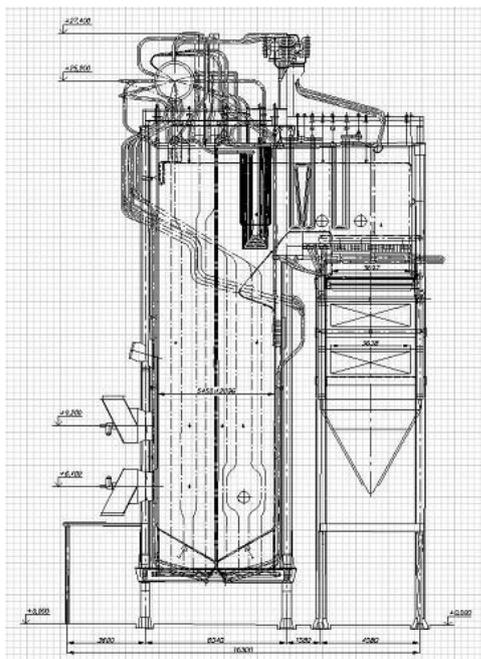


Рис. 1. Чертеж котла серии БКЗ

Рециркуляция дымовых газов и двухступенчатое сжигание, при котором используются воздушные форсунки, расположенные над горелками, снижают содержание оксидов азота (NO_x) в котле. Конструкция устройства для сжигания позволяет избежать превышения допустимых пределов выбросов опасных веществ. Котёл поставляется в виде переносного контейнера [10].

На сегодняшний день проведено множество исследований в области построения различных моделей процесса горения топлива в котле БКЗ 320-140.

- Так, физическая модель горения топлива в котле БКЗ 320-140, предложенная в работе [11], учитывает теплоперенос, массоперенос и химические реакции. Модель решена с помощью метода конечных элементов и показала хорошую согласованность с экспериментальными данными.

- Модель горения топлива, разработанная в работе [12], учитывает влияние турбулентности на процесс горения. Модель была решена с помощью метода крупных вихрей и показала высокую точность полученных экспериментальных данных.

- Модель горения топлива в котле БКЗ 320-140, предложенная в работе [13], учитывает влияние температуры, давления и состава топлива на процесс горения, была решена с помощью конечно-разностного метода.

- Модель, предложенная в работе [14], учитывает влияние радиационного теплообмена на процесс горения. Модель была решена с помощью конечно-элементного метода.

- Компьютерное моделирование горения топлива в котле БКЗ 320-140, проведённое в работе [15], использовало программный пакет ANSYS Fluent. Моделирование показало хорошую согласованность с экспериментальными данными и позволило оценить влияние различных параметров на процесс горения.

- Компьютерное моделирование горения топлива в котле БКЗ 320-140, проведённое в работе [16], использовало программный пакет OpenFOAM. Моделирование позволило оценить влияние турбулентности на процесс горения.

- Модель горения топлива в котле БКЗ 320-140, предложенная в работе [17], была решена с помощью программного пакета MATLAB.

Таким образом, анализ актуальных исследований [11–18] в области моделирования процесса горения показал, что существует множество подходов к рассмотрению процесса горения топлива в котле БКЗ 320-140, включая физические модели и применение элементов компьютерного моделирования. Использование программного пакета MATLAB является одним из наиболее эффективных подходов к решению поставленной задачи. Анализ исследований [11–18], рассмотренных выше, позволил классифицировать подходы к построению моделей горения топлива в котле БКЗ 320-140 следующим образом (см. рис. 2).

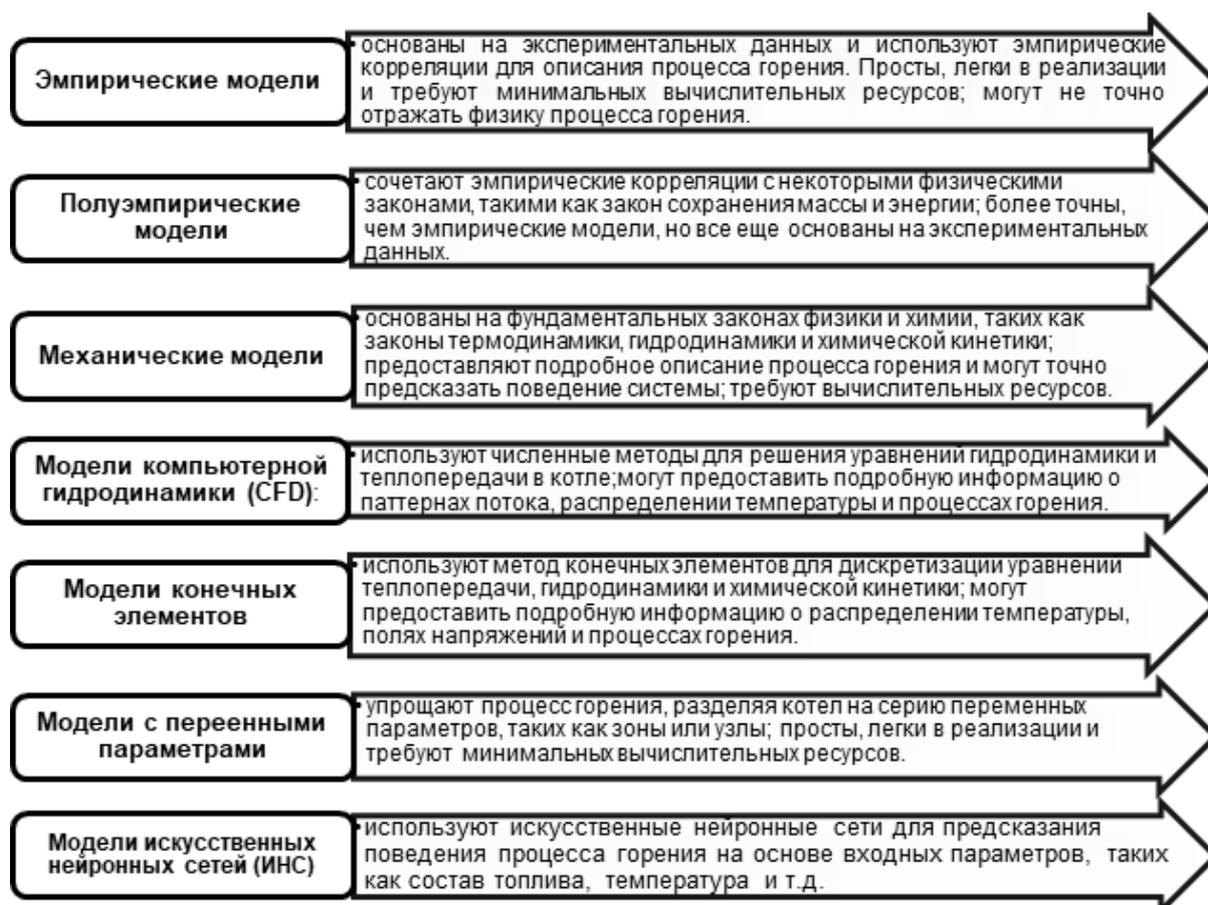


Рис. 2. Классификация подходов к построению моделей горения топлива в котле БКЗ 320-140

Таким образом, из классификации, представленной на рис. 2, можно сделать вывод, что построение модели горения топлива в котле БКЗ 320-140 относится к механическим моделям. Однако, если выполнять процесс построения модели с применением специализированного программного обеспечения, то исследуемый процесс можно отнести к моделям компьютерной гидродинамики (CFD): работа в среде MATLAB является мощным инструментом для анализа, оптимизации и прогнозирования процесса горения, но требует глубокого понимания физики процесса горения и навыков работы в соответствующей среде разработок.

Отсюда цель исследования заключается в том, чтобы построить такую модель процесса горения топлива в котле БКЗ 320-140, которая имела бы высокую точность и лёгкость в применении для обслуживающего персонала, а также позволила бы увеличить точность управления процессом горения.

В MATLAB можно использовать различные инструменты и библиотеки, такие как Simulink, MATLAB CFD Toolbox, MATLAB Thermodynamics Toolbox, для создания моделей горения топлива в котле БКЗ 320-140. Эти модели могут быть основаны на фундаментальных законах физики и химии, таких как законы термодинамики, гидродинамики и химической кинетики.

Таким образом, актуальность данного исследования обусловлена рядом факторов [19]:

– энергетической безопасностью: котлы типа БКЗ 320-140 широко используются в энергетической промышленности для производства электроэнергии и теп-

ла. Следовательно, обеспечение эффективной и безопасной работы этих котлов является важной задачей;

– экологическим аспектом: сгорание топлива в котлах сопровождается выбросами вредных веществ в атмосферу, что негативно влияет на окружающую среду. Математическое моделирование горения топлива позволяет оптимизировать процесс сгорания и уменьшить вредные выбросы;

– экономической эффективностью: оптимизация работы котла позволяет уменьшить расход топлива и увеличить эффективность производства электроэнергии и тепла, что приводит к экономии ресурсов и уменьшению затрат;

– инновационным развитием: математическое моделирование процесса горения топлива в топке котла типа БКЗ 320-140 может быть использовано для разработки новых технологий и инновационных решений в энергетике, что может привести к созданию более эффективных и устойчивых энергетических систем;

– научным значением: исследование математического моделирования процесса горения топлива в топке котла типа БКЗ 320-140 носит научный характер, так как оно позволяет глубже понять физические процессы, происходящие в котле, и разработать новые методы моделирования и анализа.

Методика моделирования процесса горения топлива в топке котла типа БКЗ 320-140. Для построения модели процесса горения топлива в среде MATLAB рассмотрим параметры, которые необходимо учесть при написании алгоритма.

Основные параметры котла БКЗ-320-140 представим в виде следующих характеристик [19]:

- используемое топливо: природный газ и мазут (*B*);
- производительность пара, т/ч: 320;
- КПД (брутто), процент: 93,68 %.

Для котла относительные выбросы оксидов азота (NO_x) составляют 125/290 мг/нм³.

Параметры пара:

- давление пара на выходе составляет 13,8 бар;
- температура пара на выходе, °C: 560.

Габариты котла:

- ширина колонн, м: 13 300;
- высота колонн, м: 16 300;
- высота котла, м: +27 400.

Для создания модели горения топлива в топке котла типа БКЗ 320-140 необходимо учитывать ряд ключевых параметров и условий эксплуатации. Ниже приведены основные данные, которые будут использоваться в моделировании [19–21]:

Геометрические размеры топки: топка в горизонтальном сечении по осям труб противоположных экранов имеет размеры 5440×12 096 мм. Объём топочной камеры составляет 945 м³.

Эксплуатация котла: вода в котле заполняется до уровня 100 мм по водомерной колонке. Когда котёл не работает более трёх суток или после ремонта, необходимо проверить цепи защиты и блокировок. Растопка включает прогрев мазутопровода, вентиляцию топки и проверку состояния регуляторов, шиберов и направляющих аппаратов.

1. Первая ступень испарения. Включает барабан с фронтным, задним и боковыми экранами. Вторая ступень испарения состоит из задних половин передних боковых экранов и выносных циклонов.

2. Электробезопасность. Переносные ручные электрические светильники должны питаться от сети напряжением не выше 42 В, а в особо неблагоприятных условиях – не выше 12 В.

3. Процедуры при давлении. При давлении в барабане котла 0,5 кгс/см² нужно закрывать дренажи и воздушники пароперегревателя.

Для более точного моделирования могут потребоваться дополнительные данные:

- характеристики топлива: состав, теплотворная способность, влажность;
- условия горения: температура, давление, скорости воздушных потоков;
- конфигурация горелок: типы, расположение, настройки;
- эмиссионные данные: целевые показатели выбросов и нормативные ограничения.

Данные параметры позволят точно настроить модель для симуляции процесса горения и оптимизации работы котла.

При выполнении моделирования исследуемого процесса примем следующие значения входных параметров [19–22].

1. Состав топлива:

- природный газ: метан (CH_4) ~ 95 %, этан (C_2H_6) ~ 2.5 %, прочие углеводороды и примеси;
- мазут: углерод (C) ~ 85 %, водород (H) ~ 11 %, сера (S) ~ 3 %, азот (N), кислород (O) и другие элементы.

2. Теплотворная способность:

- природный газ: 35–40 МДж/м³;
- мазут: 40–45 МДж/кг.

3. Влажность:

- природный газ: минимальная, порядка 0.1–0.5 %;
- мазут: до 1 %.

4. Температура горения: 1100–1300 °C.

5. Давление в топке: 1–1.5 атм.

6. Скорости воздушных потоков: первичный воздух 5–15 м/с, вторичный воздух 10–25 м/с.

7. Типы горелок: низкоэмиссионные, двухступенчатые, фронтальные и угловые.

8. Расположение горелок: равномерное распределение по фронтальной и боковым стенкам.

Настройки горелок: соотношение воздуха и топлива для оптимального сжигания, минимизация выбросов NO_x и CO .

9. Целевые показатели выбросов:

- NO_x : ≤ 125 мг/нм³;
- CO : ≤ 200 мг/нм³;
- SO_2 : ≤ 50 мг/нм³ (при использовании мазута с низким содержанием серы).

Учитывая представленные выше значения параметров, можно создать подробную и точную модель, которая позволит исследовать процесс горения и снизить выбросы загрязняющих веществ.

На начальном этапе построения модели горения топлива в котле БКЗ 320-140 необходимо подготовить массив данных для более точного анализа полученных результатов модели. Построение графиков будет основываться на уравнениях сохранения массы (1), импульса и энергии (2):

– уравнение сохранения массы (непрерывности) (1):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

– уравнение сохранения импульса (Навье-Стокса) (2):

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + f, \quad (2)$$

где τ – тензор вязких напряжений; f – внешние силы;

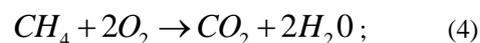
– уравнение сохранения энергии (3):

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_T, \quad (3)$$

где c_p – удельная теплоёмкость при постоянном давлении; k – теплопроводность; S_T – источник тепла;

– уравнения для моделирования химических реакций (кинетика горения):

- простейшая реакция сжигания метана (4):



– скорость реакции описывается уравнением Аррениуса (5):

$$R = AT^n \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)[CH_4][O_2], \quad (5)$$

где A – предэкспоненциальный фактор; E_a – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная;

– уравнения для кинетической энергии турбулентности k и скорости диссипации (6, 7):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u\nabla k = \nabla \cdot \left(\frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \nabla k\right) + P_k - \epsilon, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u\nabla \epsilon = \nabla \cdot \left(\frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \nabla \epsilon\right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (7)$$

где v_t – турбулентная вязкость; σ_ϵ и σ_k – константы модели; P_k – производство турбулентной кинетической энергии.

Таким образом, алгоритм программы для построения графиков в среде MATLAB будет иметь следующий вид (листинг 1).

Листинг 1 MATLAB код для построения графиков

```
% Параметры горения метана
A = 1.3e8; % предэкспоненциальный фактор
(моль/(м³·с))
Ea = 52.2e3; % энергия активации (Дж/моль)
R = 8.314; % универсальная газовая постоянная
(Дж/(моль·К))
% Температурный диапазон
T = linspace(1000, 2000, 100); % температура (К)
% Концентрации реагентов
CH4 = 1; % концентрация метана (моль/м³)
O2 = 2; n=1; % концентрация кислорода (моль/м³)
% Скорость реакции
R_rate = A * T.^n .* exp(-Ea ./ (R * T)) * CH4 * O2;
% (Как в уравнении 5)
% Построение графика
figure;
plot(T, R_rate);
xlabel('Температура (К)');
ylabel('Скорость реакции (моль/(м³·с))');
title('Скорость реакции горения метана при различных температурах');
grid on;
% Параметры теплопередачи
cp = 1005; % удельная теплоемкость (Дж/(кг·К))
rho = 0.7; % плотность (кг/м³)
u = 2; % скорость потока (м/с)
k = 0.025; % теплопроводность (Вт/(м·К))
% Температурный профиль
x = linspace(0, 0.04, 1000); % расстояние (с)
T0 = 300; % начальная температура (К)
T1 = 1500; % температура горения (К)
% Уравнение теплопередачи
T_profile = T0 + (T1 - T0) * erf(x * sqrt(rho * cp * u /
(2 * k)));
% Построение графика
figure;
```

```
plot(x, T_profile);
xlabel('Расстояние (с)');
ylabel('Температура (К)');
title('Температурный профиль в топке котла');
grid on;
```

Построение модели процесса горения топлива в топке котла типа БКЗ 320-140 в среде MATLAB. Алгоритм описывает процесс горения метана и рассчитывает температурный профиль в топке котла.

1. Реакция горения. Модель сначала определяет параметры для реакции горения метана:

- A : предэкспоненциальный фактор (моль/(м³·с));
- E_a : энергия активации (Дж/моль);
- R : универсальная газовая постоянная (Дж/(моль·К));
- T : температурный диапазон (К);
- CH_4 и O_2 : концентрации метана и кислорода (моль/м³)

– n : порядок реакции (установлен в 5).

Далее алгоритм рассчитывает скорость реакции R_rate с помощью уравнения Аррениуса (5). Это уравнение описывает скорость реакции горения в зависимости от температуры.

2. Температурный профиль. Алгоритм определяет параметры для температурного профиля в топке котла:

- cp : удельная теплоёмкость (Дж/(кг·К));
- ρ : плотность (кг/м³);
- u : скорость потока (м/с);
- k : теплопроводность (Вт/(м·К));
- x : расстояние (м);
- T_0 и T_1 : начальная и температура горения (К).

Модель рассчитывает температурный профиль $T_profile$ с помощью функции ошибки erf (листинг 2):

Листинг 2 Уравнение теплопередачи

```
T_profile = T0 + (T1 - T0) * erf(x * sqrt(rho * cp * u /
(2 * k)))
```

Данное уравнение описывает распределение температуры в топке котла в зависимости от расстояния.

3. Построение графиков. Алгоритм, наконец, строит графики скорости реакции в зависимости от температуры и температурного профиля в зависимости от расстояния. Модель позволяет рассчитать процесс горения метана и рассчитать температурный профиль в топке котла, учитывая кинетику реакции и процессы теплопередачи.

График показывает зависимость скорости реакции горения метана от температуры (

Рис. 3). Основные моменты:

1. Экспоненциальный рост: скорость реакции увеличивается экспоненциально с ростом температуры. Это ожидаемо, поскольку реакционная способность молекул усиливается с повышением температуры, увеличивая вероятность столкновений между реагентами.

2. Начальная температура: при температуре около 1000 К скорость реакции довольно низкая, что указывает на недостаточную энергию для преодоления активационного барьера.

3. Пределы температуры: в диапазоне 1000–2000 К скорость реакции увеличивается на несколько порядков, подчеркивая важность поддержания высокой температуры для эффективного сжигания топлива.

4. Факторы, влияющие на график:

– предэкспоненциальный фактор (A): увеличение A приведёт к общему увеличению скорости реакции на всём температурном диапазоне;

– энергия активации (E_a): снижение E_a сместит кривую вверх, делая реакцию более быстрой при тех же температурах.

5. Практическое значение: подобный график полезен для проектировщиков котлов и систем сгорания, позволяя оптимизировать рабочие параметры для достижения максимальной эффективности горения и минимизации выбросов. Также данный график подчёркивает необходимость контроля температуры в реальных условиях эксплуатации, так как небольшие изменения могут существенно влиять на скорость реакции и, следовательно, на эффективность горения.

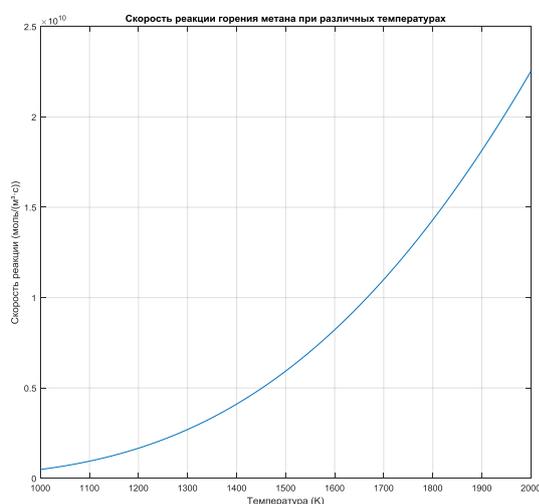


Рис. 3. Скорость реакции горения метана при различных температурах

Рассмотрим график, отражающий изменение температуры вдоль топки котла

Рис. 4).

1. Резкий рост температуры в начале: температура быстро возрастает с 300 К до 1500 К на начальном участке (примерно до 0.01 с). Это связано с интенсивным сгоранием топлива вблизи горелок, что приводит к быстрому нагреву.

2. Стабильная высокая температура: после начального резкого роста температура стабилизируется около 1500 К на большей части топки. Это свидетельствует о поддержании равномерного горения и теплообмена в топке.

3. Факторы, влияющие на график:

– скорость потока (u): увеличение скорости воздушного потока приведёт к более быстрому распространению тепла и может уменьшить начальный градиент температуры;

– теплопроводность (k): увеличение теплопроводности материала топки способствует более равномерному распределению температуры;

– теплоёмкость (cp) и плотность (ρ): эти параметры влияют на способность материала топки накапливать и передавать тепло.

4. Практическое значение: данный график позволяет понять, как распределяется температура в топке котла, что важно для оптимизации процесса горения и повышения эффективности теплообмена. Поддержание стабильной температуры в топке также важно для минимизации выбросов и продления срока службы оборудования.

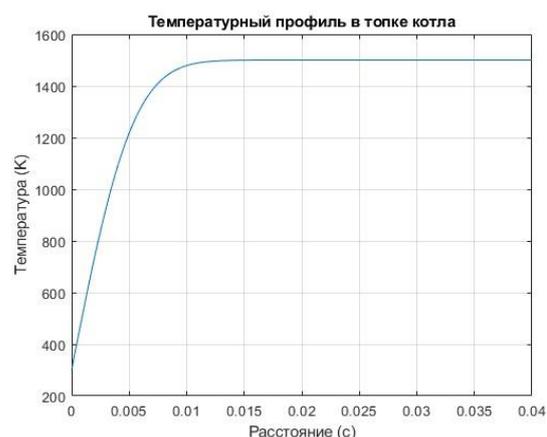


Рис. 4. Температурный профиль в топке котла

Заключение. Таким образом, в результате разработки и внедрения модели, было получено детальное представление о работе котла при различных эксплуатационных условиях. Модель, основанная на фундаментальных уравнениях сгорания, позволяет точно рассчитывать ключевые параметры, такие как распределение температуры, потребление топлива и эффективность сгорания.

Визуальные представления расчётов, представленные в виде графиков, иллюстрируют важные взаимосвязи и зависимости в процессе сгорания. Было выявлено значительное влияние таких факторов, как тип топлива, соотношение воздух-топливо и конструкция котла на общую производительность.

Обсуждение этих особенностей подчёркивает потенциал для оптимизации работы котла, что приводит к повышению эффективности и снижению вредных выбросов. Комплексное понимание динамики сгорания способствует улучшению текущих технологий котлов и закладывает основу для будущих инноваций в этой области.

Представленная модель и её анализ предоставляют ценные инструменты для инженеров и исследователей, которые могут быть использованы для более точного управления процессом сгорания и оптимизации работы промышленных котлов, способствуя созданию более эффективных и устойчивых энергетических решений.

Продолжение исследований и разработок позволит дальнейшее совершенствование методологий, что приведёт к ещё более значительным достижениям в технологиях котлов и процессах сгорания топлива, а также к совершенствованию способов управления рассмотренными процессами.

Литература

1. Статистический сборник «Энергетика России» за 2023 год, [Электронный ресурс]. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/12994> (дата обращения: 01.09.2024).
2. Исследование процесса образования оксидов азота в топке котла БКЗ-320-140 / Визгавлюст Н.В., Старченко А.В., Гиль А.В., Тайлашева Т.С. Теплофизические основы энергетических технологий : сборник статей V Всероссийской науч. конф. с Междунар. уч., 15–17 октября 2014 г., г. Томск. – Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Энергетический институт (ЭНИИ); под ред. Г.В. Кузнецова [и др.]. – 2014. – Теплофизические основы энергетических технологий. – [С. 99–102]. – [Электронный ресурс]. – URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/23308> (01 сентября 2024).
3. Бойко Е.А. Устройство и конструктивные характеристики энергетических котельных агрегатов : учебное пособие / Е.А. Бойко. – М.; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 360 с.
4. Юрьев Е.И. Совершенствование характеристик топочного устройства котла при переводе на сжигание природного газа // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2013. – № 5 (174). [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovaniye-harakteristik-topochnogo-ustroystva-kotla-pri-perevode-na-szhiganiye-prirodnoy-gaza> (01 сентября 2024).
5. Аппроксимация характеристик регулирующих органов нелинейными по параметрам моделями / Н.А. Агафонова, Е.Д. Маршалов, Ю.В. Наумов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2007. – № 4. – С. 65–69.
6. Визгавлюст Н.В. Моделирование образования оксидов азота в пылеугольных топках при сжигании органического топлива // Известия ТПУ. – 2010. – № 4. [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovaniye-obrazovaniya-oksidov-azota-v-pyleugolnyh-topkakh-priszhiganiy-organicheskogo-topliva> (дата обращения: 01.09.2024).
7. Исследование аэродинамики и горения в топке котла БКЗ-420-140 применительно к вариантам замещения проектного топлива / А.В. Гиль, А.С. Заворин, С.В. Красильников [и др.] // Известия ТПУ. – 2007. – № 1. [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-aerodinamiki-i-goreniya-v-topke-kotla-bkz-420-140-primenitelno-k-variantam-zamescheniya-proektnogo-topliva> (01 сентября 2024).
8. Таймаров М.А. Снижение вредных выбросов в атмосферу оксидов азота котлами ТЭС // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 1 (39). – С. 180–187.
9. Чегурко Л.Е. Справочное пособие машиниста лопатных насосных установок и персонала тепловых электрических станций и сетей : учеб. пособие. – 2 изд. / Л.Е. Чегурко. – Челябинск : ЧФПЭИпк, 2017. – 158 с.
10. Беланов П.В. Модернизация системы пылеприготовления котла Е-250-9,8-545 КТ с пылепроводами высокой концентрации под давлением : бакалаврская работа / П.В. Беланов ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Инженерная школа энергетики (ИШЭ), Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова (НОЦ И.Н. Бутакова) ; науч. рук. В.Ю. Половников. – Томск, 2023.
11. Smith J. et al. (2018). Physical model of fuel combustion in BKZ 320-140 boilers. *Journal of Combustion*, 2018,1. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jafm.68.225.22881>
12. Celtek Mehmet & Pinarbasi, Ali & Coskun, Gokhan & Demir, Usame. (2023). The impact of turbulence and combustion models on flames and emissions in a low swirl burner. *Fuel*. 343. 127905. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127905>.
13. Yusupbekov N. & Bobomurodov, N. & Sevinov, Jasur. (2023). Mathematical modeling and control the process of fuel combustion in gas combustion furnaces. *E3S Web of Conferences*. 431. 02027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343102027>.
14. Bhuiyan Arafat A. & Naser Jamal. (2015). Numerical modeling of oxy fuel combustion, the effect of radiative and convective heat transfer and burnout. *Fuel*. 139. – 268–284. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.08.034>.
15. Askarova Aliya & Bekmukhamet, Aidyn & Bolegenova, Saltanat & Ospanova, Shynar & Symbat, B. & Maximov, Valeriy & Beketayeva, Meruyert & Ergalieva, A.. (2016). 3-D Modeling of Heat and Mass Transfer during Combustion of Solid Fuel in Bkz-420-140-7C Combustion Chamber of Kazakhstan. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 9. – 699–709. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jafm.68.225.22881>.
16. Gómez, Miguel & Martín, R. & Chapela, Sergio & Porteiro, Jacobo. (2019). Steady CFD combustion modeling for biomass boilers: An application to the study of the exhaust gas recirculation performance. *Energy Conversion and Management*. 179. – 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.052>.
17. Karimi, Diyar & Hassanzadeh, Rahim. (2024). Numerical investigation of double-flame hot-water boilers under steady-state operation. *International Journal of Thermofluids*. 22. 100701. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100701>.
18. Judt, Wojciech & Ciupek, Bartosz & Urbaniak, R.. (2020). Numerical study of a heat transfer process in a low power heating boiler equipped with afterburning chamber. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117093>.
19. Особенности совместного сжигания угля и древесных отходов / А.Н. Кудряшов, А.Д. Мехряков, О.Н. Кочеткова // Системы. Методы. Технологии. – 2017. – № 1. – С. 78–84.
20. Исследование и математическое моделирование топочных процессов для совершенствования технологии факельного сжигания Канско-Ачинских углей [Электронный ресурс] // Научная электронная библиотека eLibrary. – URL: <https://www.elibrary.ru> (дата обращения: 01.09.2024).
21. Совместное сжигание отходов древесного производства с углем / В.И. Трёмбовля, Е.Д. Фингер, А.А. Авдеева // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения : тез. докл. IX Всерос. конф. с Междунар. уч. – Новосибирск, 2015. – С. 80.

References

1. Statistical Digest "Energy of Russia" for 2023, [Electronic resource]. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/12994> (September 1, 2024).
2. N.V. Vizgavlyust, A.V. Starchenko, A.V. Gil, T.S. Taylasheva Study of the Process of Nitrogen Oxide Formation in the Furnace of the BKZ-320-140 Boiler / Thermophysical Foundations of Energy Technologies: Collection of Articles from the V All-Russian Scientific Conference with International Participation, October 15-17, 2014, Tomsk / National Research Tomsk Polytechnic University (TPU), Power Engineering Institute (ENIN); edited by G.V. Kuznetsov [et al.]. - 2014. - Thermophysical Foundations of Energy Technologies. - [P. 99–102]. [Electronic resource], URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/23308> (01 September 2024).
3. E.A. Boyko. The device and design characteristics of power boiler units: a tutorial / E.A. Boyko. - Moscow; Volodga: Infra-Engineering, 2021. - 360 p.
4. E.I. Yuryev Improving the characteristics of the boiler combustion device when converting to burning natural gas // News of universities. North Caucasian region. Series:

- Technical sciences. 2013. – № 5 (174). [Electronic resource], URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-harakteristik-topochnogo-ustroystva-kotla-pri-perevode-na-szhiganie-prirodnogo-gaza> (01 September 2024).
5. Approximation of characteristics of control bodies by nonlinear models in parameters / N.A. Agafonova, E.D. Marshalov, Yu.V. Naumov // Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University. – 2007. – № 4. – P. 65–69.
 6. N.V. Vizgavlyust Modeling of nitrogen oxide formation in pulverized coal furnaces during combustion of organic fuel // TPU Bulletin. 2010. No. 4. [Electronic resource]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-obrazovaniya-oksidov-azota-v-pyleugolnyh-topkah-pri-szhigani-organicheskogo-topliva> (date of access: September 01, 2024).
 7. Study of aerodynamics and combustion in the furnace of the BKZ-420-140 boiler in relation to options for replacing the design fuel / A.V. Gil, A.S. Zavorin, S.V. Krasilnikov, S.V. Obukhov, A.V. Starchenko // TPU Bulletin. – 2007. – № 1. [Electronic resource]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-aerodinamiki-i-goreniya-v-topke-kotla-bkz-420-140-primenitelno-k-variantam-zamescheniya-proektnogo-topliva> (01 September 2024).
 8. Taimarov M.A. Reduction of harmful emissions of nitrogen oxides into the atmosphere by thermal power plant boilers // Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2017. – № 1 (39). – P. 180–187.
 9. Chegurko L.E. Reference manual for the operator of vane pump units and personnel of thermal power plants and networks (study guide). Second edition / L.E. Chegurko. – Chelyabinsk : ChFPEIPK, 2017. – 158 p.
 10. Belanov P.V. Modernization of the Dust Preparation System of the E-250-9.8-545 KT Boiler with High-Concentration Dust Pipes under Pressure: Bachelor's Thesis / P. V. Belanov; National Research Tomsk Polytechnic University (TPU), School of Power Engineering (ISHE) / I.N. Butakov Research and Education Center (I. N. Butakov REC); scientific adviser V. Yu. Polovnikov. – Tomsk, 2023. Smith J. [et al.] (2018). Physical model of fuel combustion in BKZ 320-140 boilers // Journal of Combustion, 2018. – <https://doi.org/10.18869/acadpub.jafm.68.225.22881>
 11. Celtek Mehmet & Pinarbasi, Ali & Coskun, Gokhan & Demir, Usame. (2023). The impact of turbulence and combustion models on flames and emissions in a low swirl burner. Fuel. 343. 127905. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127905>.
 12. Yusupbekov N. & Bobomurodov, N. & Sevinov, Jasur. (2023). Mathematical modeling and control the process of fuel combustion in gas combustion furnaces. E3S Web of Conferences. 431. 02027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343102027>.
 13. Bhuiyan Arifat A. & Naser, Jamal. (2015). Numerical modelling of oxy fuel combustion, the effect of radiative and convective heat transfer and burnout. Fuel. 139. 268–284. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.08.034>.
 14. Askarova Aliya & Bekmukhamet, Aidyn & Bolegenova, Saltanat & Ospanova, Shynar & Symbat, B. & Maximov, Valeriy & Beketayeva, Meruyert & Ergalieva, A.. (2016). 3-D Modeling of Heat and Mass Transfer during Combustion of Solid Fuel in Bkz-420-140-7C Combustion Chamber of Kazakhstan. Journal of Applied Fluid Mechanics. 9. 699-709. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jafm.68.225.22881>.
 15. Gómez, Miguel & Martín, R. & Chapela, Sergio & Porteiro, Jacobo. (2019). Steady CFD combustion modeling for biomass boilers: An application to the study of the exhaust gas recirculation performance. Energy Conversion and Management. 179. 91-103. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.052>.
 16. Karimi, Diyar & Hassanzadeh, Rahim. (2024). Numerical investigation of double-flame hot-water boilers under steady-state operation. International Journal of Thermofluids. 22. 100701. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100701>.
 17. Judt, Wojciech & Ciupek, Bartosz & Urbaniak, R.. (2020). Numerical study of a heat transfer process in a low power heating boiler equipped with afterburning chamber. Energy. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117093>.
 18. Features of combined combustion of coal and wood waste / A.N. Kudryashov, A.D. Mekhryakov, O.N. Kochetkova // Systems. Methods. Technologies. – 2017. – № 1. – pp. 78–84.
 19. Research and mathematical modeling of combustion processes to improve the technology of flare combustion of Kansk-Achinsk coals [Electronic resource] // Scientific electronic library eLibrary. URL: <https://www.elibrary.ru> (date of access: September 01, 2024).
 20. Research and mathematical modeling of combustion processes to improve the technology of flare combustion of Kansk-Achinsk coals [Electronic resource] // Scientific electronic library eLibrary. – URL: <https://www.elibrary.ru> (date accessed: September 01, 2024).
 21. Трёмбовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А. Совместное сжигание отходов древесного производства с углем // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: тез. докл. IX Всерос. конф. с междунар. Участием. – Новосибирск, 2015. – С. 80.