

===== АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ =====
И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 681.51:676.082.4

Научная статья

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-3-73-87

EDN: JADOFM

**Имитационное моделирование подсистемы сжигания черного щелока
в топке содорегенерационного котлоагрегата**

Д. А. Ковалёв

Высшая школа технологии и энергетики
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
198095, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4

Аннотация. Для решения задачи получения целевых продуктов сжигания черного щелока в топке СРК – карбоната и сульфида натрия – выполнена разработка имитационной модели подсистемы сжигания черного щелока в топке СРК. Разработанная имитационная модель подсистемы сжигания черного щелока в топке СРК даст возможность моделировать процессы: горения черного щелока – для изучения влияния различных факторов (состав черного щелока, расход воздуха, температура) на эффективность сжигания и тепловую мощность СРК; восстановления сульфата натрия – для изучения влияния температуры, состава газов и содержания углерода на скорость восстановления сульфата натрия до сульфида натрия в СРК. Применение имитационной модели подсистемы сжигания черного щелока в топке СРК позволит оптимизировать процесс сжигания, минимизировать выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, снизить потребление ресурсов и отходов, а также повысить общую эффективность процессов регенерационного цикла.

Ключевые слова: содорегенерационный котлоагрегат, имитационная модель СРК, подсистема сжигания черного щелока, зона пиролиза, окислительная зона

Поступила 27.03.2025, одобрена после рецензирования 23.04.2025, принята к публикации 14.05.2025

Для цитирования. Ковалёв Д. А. Имитационное моделирование подсистемы сжигания черного щелока в топке содорегенерационного котлоагрегата // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 3. С. 73–87. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-3-73-87

MSC: 93C95

Original article

**Simulation modeling of black liquor combustion subsystem
in a recovery boiler furnace**

D.A. Kovalev

Higher School of Technology and Power Engineering
Saint Petersburg State University of Industrial Technology and Design
198095, Russia, Saint Petersburg, 4 Ivan Chernykh street

Abstract. A simulation model of the subsystem for black liquor burning in the recovery boiler furnace has been developed to effectively address problem of obtaining target products resulted from black liquor combustion – sodium carbonate and sodium sulfide. The model developed enables the following processes to be simulated: black liquor combustion: to study influence of black liquor composition, air flow rate, temperature and other factors on the recovery boiler efficiency; sodium sulfate reduction: to study the influence of temperature, gas composition and carbon content on the

rate of sodium sulfate reduction to sodium sulfide in the recovery boiler. Application of the simulation model allows optimizing the combustion process, minimizing pollutants emitted into the air, diminishing the use of resources and the generation of waste, and increasing the overall efficiency of the regenerative cycle.

Keywords: recovery boiler, simulation model of recovery boiler, black liquor combustion subsystem, pyrolysis zone, oxidation zone

Submitted 27.03.2025,

approved after reviewing 23.04.2025,

accepted for publication 14.05.2025

For citation. Kovalev D.A. Simulation modeling of black liquor combustion subsystem in a recovery boiler furnace. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 3. Pp. 73–87. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-3-73-87

ВВЕДЕНИЕ

Имитационное моделирование (ИМ) – это метод, используемый для создания цифровой модели реального объекта управления или технологического процесса, для моделирования режимов работы объекта и анализа его поведения в различных условиях, например, в нештатных ситуациях.

К достоинствам ИМ можно отнести:

- возможность анализа сложных систем управления: ИМ позволяет моделировать и анализировать сложные системы, для которых можно учитывать множество переменных, взаимосвязей и случайных факторов;
- моделирование различных режимов работы объекта управления без риска возникновения нештатной ситуации для реального объекта управления, оптимизации значений параметров технологического процесса и выявления узких мест объекта управления;
- прогнозирование значений параметров технологического процесса на основе архива данных и развития возможных нештатных ситуаций;
- обучение и тренировка персонала для управления сложными объектами в безопасной и контролируемой среде программного обеспечения;
- визуализация технологического процесса сложного объекта для понимания его динамики;
- сокращение затрат, ИМ позволяет избежать дорогостоящих ошибок и оптимизировать затраты на разработку и внедрение новых систем управления.

К недостаткам ИМ можно отнести:

- сложность построения адекватной и точной модели, требующей специализированных знаний и навыков;
- значительные затраты времени и ресурсов для разработки и верификации модели, включая сбор данных, программирование и т. д.;
- необходимость в валидации модели (подтверждение ее соответствия реальному объекту управления);
- зависимость от качества используемых для ИМ данных;
- сложности с интерпретацией результатов. Необходимо понимать ограничения модели и учитывать их;
- стоимость программного обеспечения, специализированные программные пакеты для имитационного моделирования могут быть дорогими.

Цель исследования – разработка ИМ подсистемы сжигания черного щелока в топке СРК для снижения негативного воздействия выбросов СРК в окружающую среду, а также

для повышения эффективности, безопасности и надежности систем автоматизации и управления реальных объектов.

ПРОЦЕСС РЕГЕНЕРАЦИИ ЩЕЛОКОВ СУЛЬФАТ-ЦЕЛЛЮЛОЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Целлюлозно-бумажная промышленность (ЦБП) включает в себя большое количество сложных взаимосвязанных подсистем и технологических процессов, начиная от заготовки древесины и заканчивая производством готовой продукции, такой как бумага, картон и целлюлоза.

Производство сульфатной целлюлозы – наиболее распространенный способ, в основе которого лежит варка древесины в варочных котлах под воздействием щелочного раствора (белого щелока), который разлагает лигнин – связующее вещество между волокнами целлюлозы. Полученная после варки целлюлоза подвергается отбелке для достижения необходимой белизны и качественных характеристик.

При производстве сульфатной целлюлозы процессы регенерационного цикла включают в себя: варку щепы и промывку целлюлозы с получением слабого черного щелока, который подается на выпарку; после выпарки концентрированный черный щелок подается на сжигание в содорегенерационный котлоагрегат (СРК) (рис. 1).

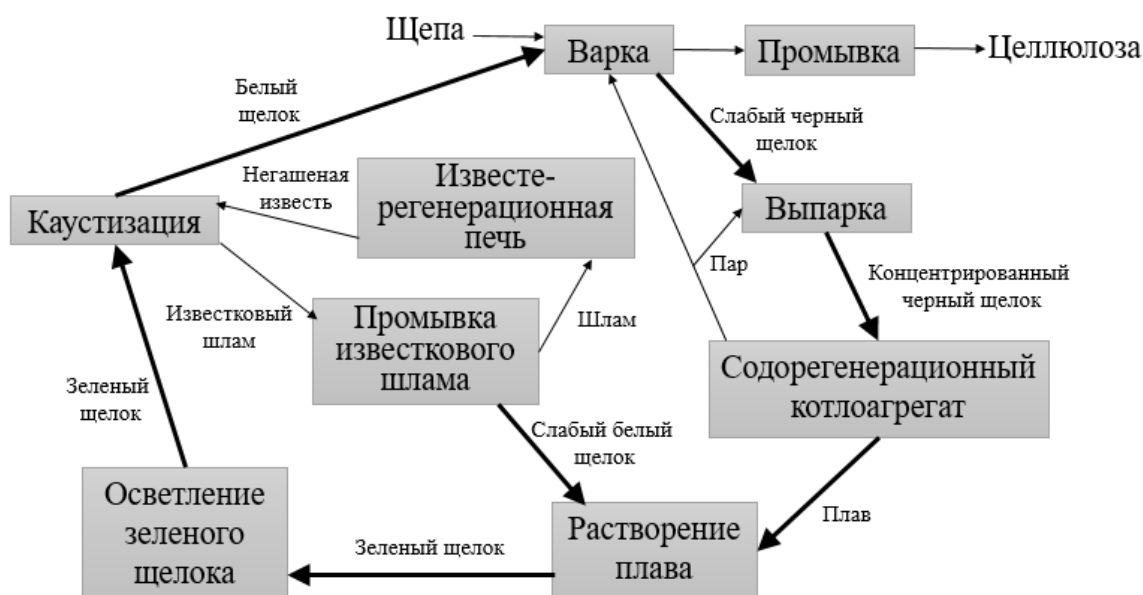


Рис. 1. Общая схема регенерации щелоков сульфат-целлюлозного производства [14]

Fig. 1. General scheme of the Kraft pulp processing [14]

После сжигания черного щелока в СРК полученный плав растворяют слабым белым щелоком, в результате получают зеленый щелок. Осветленный зеленый щелок после процесса каустизации, промывки известкового шлама и его сжигания в известерегенерационной печи преобразуется в белый щелок, который снова подается на варку щепы.

В России насчитывается несколько десятков крупных целлюлозно-бумажных производств, в которых производится варка целлюлозы по сульфатной технологии, поэтому повышение эффективности и экологичности замкнутого цикла регенерации щелоков остается одним из приоритетных направлений исследований отрасли у отечественных и иностранных специалистов [1–8].

СРК (рис. 2) является ключевым элементом цикла регенерации щелоков [9–12], ввиду этого обеспечение эффективной, надежной и экологически чистой его работы представляет собой актуальные научно-технические задачи, решение которых направлено на снижение негативного воздействия на окружающую среду и повышение энергоэффективности работы котла.

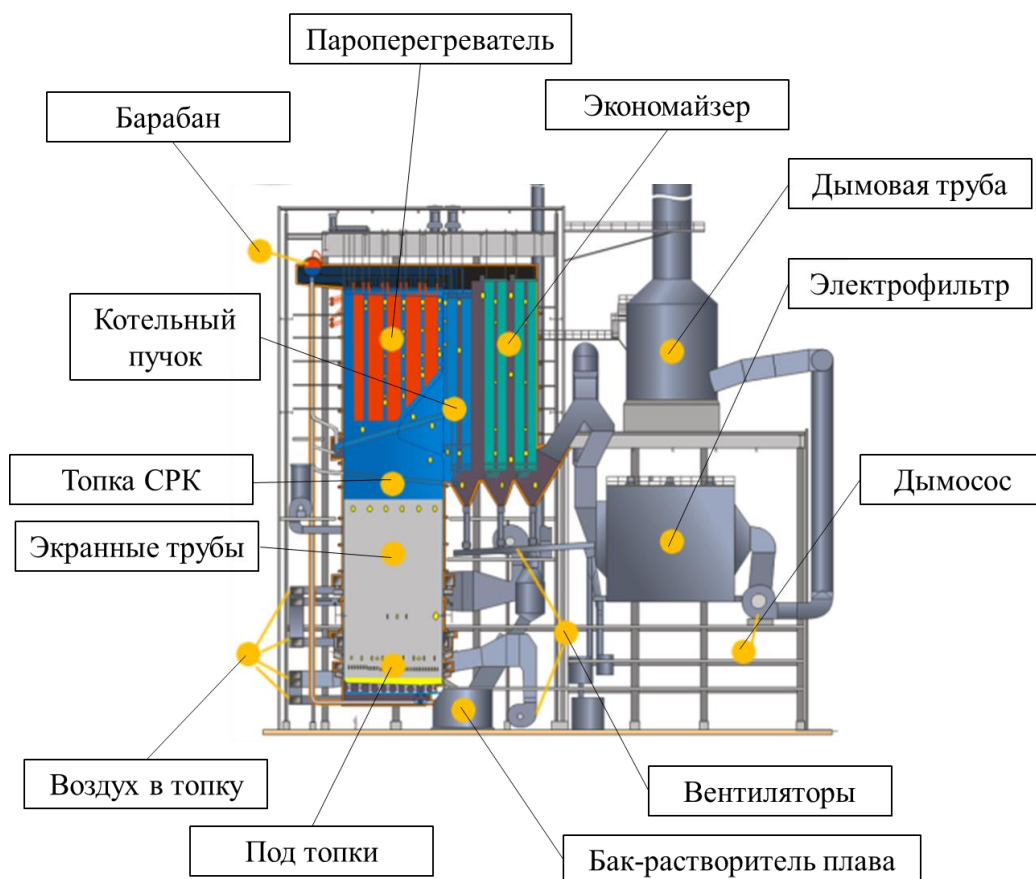


Рис. 2. Содорегенерационный котлоагрегат [14]

Fig. 2. Sodium bicarbonate recovery boiler unit [14]

Согласно положениям утвержденного отраслевого справочника по наилучшим доступным технологиям ЦБП¹ для повышения экономичности, энергоэффективности и ресурсосбережения, а также снижения негативного воздействия на окружающую среду для СРК сформулированы следующие перспективные направления применения: снижение выбросов (SO_2 и NO_x) из СРК (п. 5.9.3) НДТ-14, НДТ-15 с использованием метода «оптимизированного сжигания» черного щелока.

Применение НДТ для подсистемы сжигания черного щелока в топке СРК позволит оптимизировать процесс сжигания, минимизировать выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, снизить потребление ресурсов и отходов, а также повысить общую эффективность процессов регенерационного цикла.

¹ИТС 1-2023. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Целлюлозно-бумажное производство (утв. Приказом Росстандарта от 26.12.2023 № 2795)

Разработка ИМ подсистемы сжигания черного щелока в топке СРК даст возможность моделировать процессы:

- горения черного щелока – для изучения влияния различных факторов (состав черного щелока, расход воздуха, температура) на эффективность сжигания, образование загрязняющих веществ (NO_x , CO) и тепловую мощность СРК;
- восстановления сульфата натрия – для изучения влияния температуры, состава газов и содержания углерода на скорость восстановления сульфата натрия до сульфида натрия в СРК.

ИМ подсистемы сжигания черного щелока в топке СРК устанавливает связи между входными и выходными параметрами с учетом следующих факторов [13]: горение органической массы в зонах топки (окислительная и восстановительная, причем восстановительная включает зону пиролиза и слой (подушку) огарка (рис. 3)), восстановление сульфата натрия в сульфид в слое огарка, выход плава, выработка пара, выход из топки топочных газов с расчетной температурой, механический и «химический» унос солей из топки, параметры пара на выходе из котла, температура и давление газов в газоходах, тепловой КПД (потери тепла с уходящими газами из котла, потери с химическим недожогом, с механическим недожогом (оценочно), потери в окружающую среду и потери с плавом).

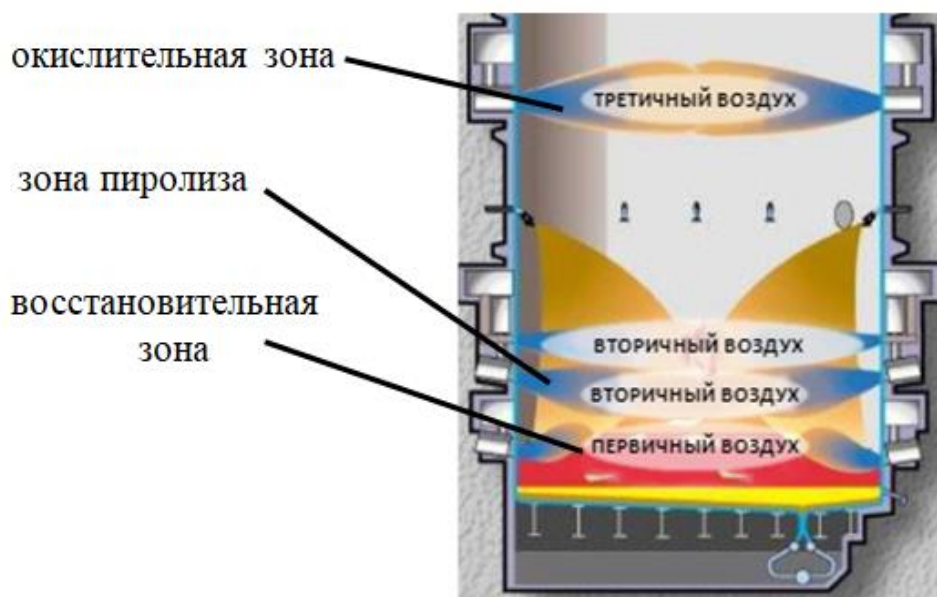


Рис. 3. Зоны топки СРК (разработано автором)

Fig. 3. Combustion chambers in the recovery boiler (developed by the author)

Организация режима горения в топке является сложной многофакторной задачей, схема взаимосвязей между параметрами которой представлена на рис. 4.

Структурно математическая модель подсистемы сжигания черного щелока в топке СРК представляет собой системы алгебраических (окислительная зона и зона пиролиза) уравнений. Решение этой системы уравнений позволяет выбрать необходимые параметры для обеспечения требуемого качества процесса сжигания черного щелока.

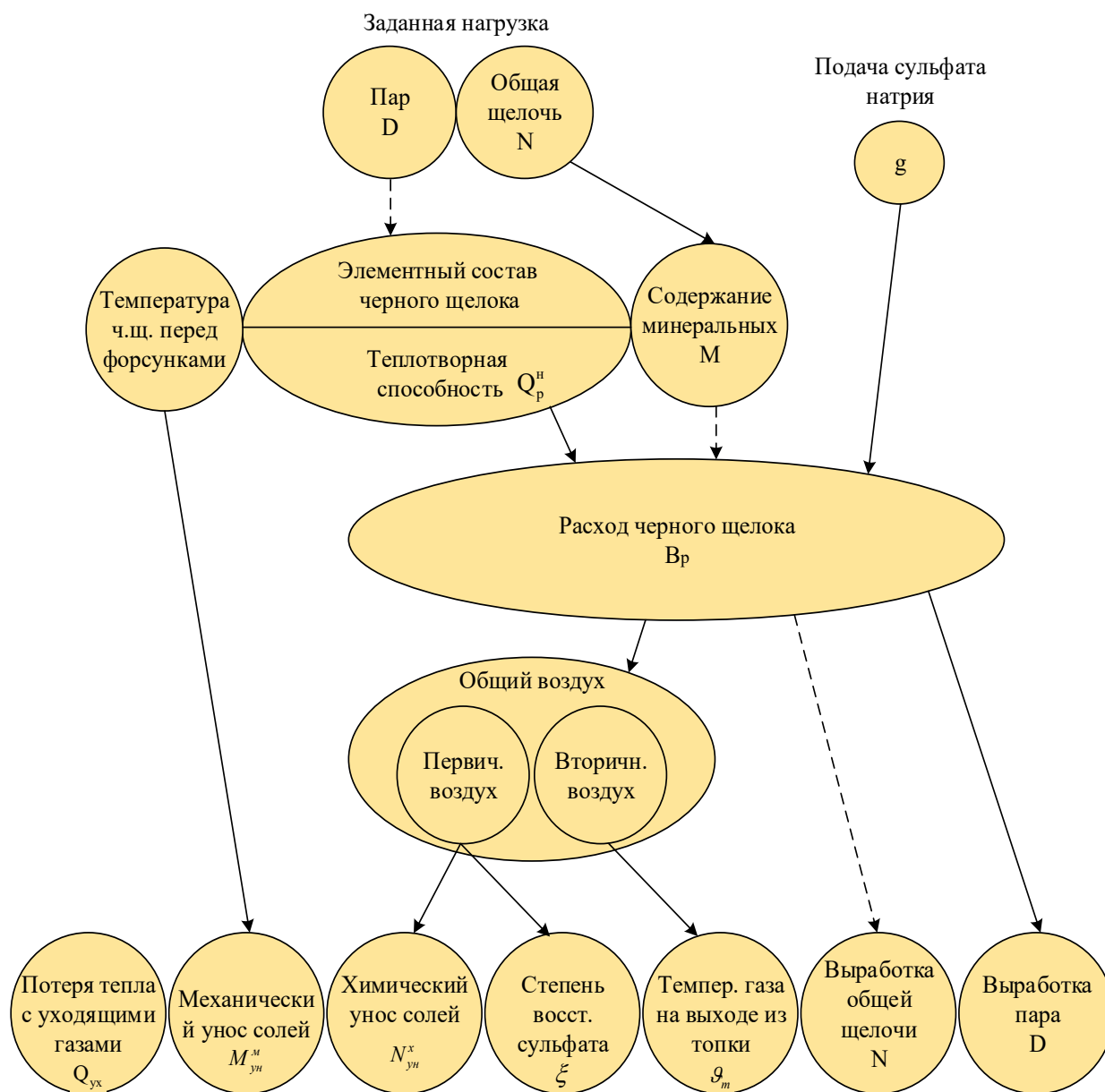


Рис. 4. Технологические параметры подсистемы сжигания черного щелока в топке СРК (разработано автором)

Fig. 4. Technological parameters for the black liquor combustion subsystem in the combustion chamber (developed by the author)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗОНЫ ПИРОЛИЗА ПОДСИСТЕМЫ СЖИГАНИЯ ЧЕРНОГО ЩЕЛОКА В ТОПКЕ СРК

Математическая модель процессов подсистемы сжигания черного щелока в топке СРК в зоне пиролиза в общем виде представлена в виде системы уравнений:

$$\begin{cases}
 V_{\Sigma}^n (P_n^{CO_2} + P_n^{CO}) = P_1 \\
 V_{\Sigma}^n (P_n^{H_2O} + P_n^{H_2}) = P_2 \\
 V_{\Sigma}^n (0.5P_n^{H_2O} + P_n^{CO_2} + 0.5P_n^{CO} + P_n^{SO_2}) = P_3 \\
 V_{\Sigma}^n P_n^{SO_2} = P_4 \\
 V_{\Sigma}^n P_n^{N_2} = P_5 \\
 \frac{P_n^{CO_2} P_n^{H_2}}{P_n^{H_2O} P_n^{CO}} = K_p \\
 f(t_n) = \lg K_p \\
 P_n^{H_2} + P_n^{H_2O} + P_n^{CO_2} P_n^{SO_2} + P_n^{N_2} = 1 \\
 V_{\Sigma}^n (P_n^{CO} + P_n^{H_2}) + (V_{\Sigma}^n (P_n^{H_2O} + P_n^{CO_2} + P_n^{CO} + P_n^{H_2} + \\
 + P_n^{SO_2} + P_n^{N_2}) + \frac{G_{nc}^{Na_2SO_4}}{B_p} + \frac{G_{nc}^{Na_2CO_3}}{B_p} + K_{nэ} \frac{F_{nэ}}{B_p} + K_{no} \frac{F_m}{B_p}) t_n = P_6.
 \end{cases} \quad (1)$$

При разработке математической модели процессов в зоне пиролиза для расчета значений выходных параметров учитывались особенности, связанные с дефицитом кислорода в зоне пиролиза.

Параметры, используемые в модели процессов в зоне пиролиза (1) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технологические параметры математической модели зоны пиролиза

Table 1. Technological parameters for the mathematical model of the pyrolysis zone

Обозначение	Наименование параметра	Размерность
V_{Σ}^n	Полный объем газообразных продуктов сгорания в зоне пиролиза	нм ³ /кг
$P_n^{CO_2}$	Парциальное давление двуокиси углерода в зоне пиролиза	ата
P_n^{CO}	Парциальное давление окиси углерода в зоне пиролиза	ата
$P_n^{H_2O}$	Парциальное давление водяного пара в зоне пиролиза	ата
$P_n^{H_2}$	Парциальное давление водорода в зоне пиролиза	ата
$P_n^{SO_2}$	Парциальное давление двуокиси серы в зоне пиролиза	ата
$P_n^{N_2}$	Парциальное давление азота в зоне пиролиза	ата
P_1	Величина правой части уравнения баланса углерода для зоны пиролиза	
P_2	Величина правой части уравнения баланса водорода для зоны пиролиза	
P_3	Величина правой части уравнения баланса кислорода для зоны пиролиза	
P_4	Величина правой части уравнения баланса органической серы для зоны пиролиза	

P_5	Величина правой части уравнения баланса азота для зоны пиролиза	
P_6	Величина правой части уравнения баланса тепла для зоны пиролиза	
K_p	Константа равновесия реакции конверсии окиси углерода водяным паром	
$K_{нэ}$	Коэффициент теплопередачи от газов зоны пиролиза топочным экранам	ккал/м ³ час град
$K_{но}$	Коэффициент теплопередачи от газов зоны пиролиза в окислительную зону	ккал/м ³ час град
t_n	Температура газов в зоне пиролиза	°C
$G_{нск}^{Na_2SO_4}$	Расход сульфата натрия из зоны пиролиза в слой огарка	кг/час
$G_{нс}^{Na_2CO_3}$	Расход карбоната натрия из зоны пиролиза в слой огарка	кг/час
B_p	Расход условной топливной смеси на форсунки	кг/час
$F_{нэ}$	Поверхность нагрева топочных экранов в зоне пиролиза	м ²
F_t	Поверхность нагрева подушки огарка, принимаемая равной площади горизонтального сечения топки	м ²

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ ЗОНЫ ПОДСИСТЕМЫ СЖИГАНИЯ ЧЕРНОГО ЩЕЛОКА В ТОПКЕ СРК

Математическая модель процессов подсистемы сжигания черного щелока в топке СРК в окислительной зоне в общем виде представлена в виде системы уравнений:

$$\begin{cases}
 V_{\Sigma}(P^{CO_2} + P^{CO}) = P_7 \\
 V_{\Sigma}(P^{H_2O} + P^{H_2}) = P_8 \\
 V_{\Sigma}(0.5P^{H_2O} + P^{CO_2} + 0.5P^{CO} + P^{SO_2} + P^{O_2}) = P_9 \\
 V_{\Sigma}P^{SO_2} = P_7 \\
 V_{\Sigma}P^{N_2} = P_{10} \\
 \frac{P^{CO_2} P^{H_2}}{P^{H_2O} P^{CO}} = K_p \\
 \lg K_p = f(t_o) \\
 P^{H_2O} + P^{H_2} + P^{CO_2} + P^{CO} + P^{SO_2} + P^{N_2} + P^{O_2} = 1 \\
 (V_{\Sigma}(P^{H_2O} + P^{CO_2} + P^{CO} + P^{H_2} + P^{SO_2} + P^{N_2} + P^{O_2}) + \\
 + k_{он} \frac{F_t}{B_p} + k_{оэ} \frac{F_{нэ}}{B_p}) t_o - V_{\Sigma}^n (P^{CO} + P^{H_2}) = P_{11}.
 \end{cases} \quad (2)$$

Параметры, используемые в модели процессов в зоне окисления (2), приведены в таблице 2.

Таблица 2. Технологические параметры математической модели зоны окисления**Table 2.** Technological parameters of the mathematical model of the oxidation zone

Обозначение	Наименование параметра	Размерность
V_{Σ}	Объем газообразных продуктов сгорания в зоне окисления	нм ³ /кг
V_{Σ}^n	Полный объем газообразных продуктов сгорания в зоне пиролиза	нм ³ /кг
P^{CO_2}	Парциальное давление двуокиси углерода в зоне окисления	ата
P^{CO}	Парциальное давление окиси углерода в зоне окисления	ата
P^{H_2O}	Парциальное давление водяного пара в зоне окисления	ата
P^{H_2}	Парциальное давление водорода в зоне окисления	ата
P^{SO_2}	Парциальное давление двуокиси серы в зоне окисления	ата
P^{O_2}	Парциальное давление кислорода в зоне окисления	ата
P^{N_2}	Парциальное давление азота в зоне окисления	ата
P_7	Величина правой части уравнения баланса углерода для зоны пиролиза и зоны окисления	
P_8	Величина правой части уравнения баланса водорода для зоны окисления	
P_9	Величина правой части уравнения баланса кислорода для зоны окисления	
P_{10}	Величина правой части уравнения баланса азота для зоны окисления	
P_{11}	Величина правой части уравнения баланса тепла в системе уравнений для окислительной зоны	
K_p	Константа равновесия реакции конверсии окиси углерода водяным паром	
$k_{o\partial}$	Коэффициент теплопередачи от газов окислительной зоны топочным экранам	ккал/м ³ час град
k_{on}	Коэффициент теплопередачи от газов зоны пиролиза в окислительную зону	ккал/м ³ час град
t_o	Температура газов в окислительной зоне топки	°С
B_p	Расход условной топливной смеси на форсунки	кг/час
$F_{n\partial}$	Поверхность нагрева топочных экранов в зоне пиролиза	м ²
F_t	Поверхность нагрева подушки огарка, принимаемая равной площади горизонтального сечения топки	м ²

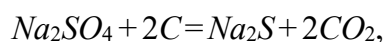
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОДУШКИ ОГАРКА ПОДСИСТЕМЫ СЖИГАНИЯ ЧЕРНОГО ЩЕЛОКА В ТОПКЕ СРК

Одной из основных задач сжигания черного щелока является получение сульфида натрия, которое осуществляется путем восстановления сернокислого натрия газообразными восстановителями и углеродом.

Построенные траектории полета частиц свидетельствуют о том, что в момент завершения сушки частицы находятся на значительном удалении от стен топки и подушки огарка. Это дает основание считать, что в сухом остатке щелока до попадания его на под успеет произойти полная карбонизация щелочи, окисление сульфида и частичное сгорание угле-

рода. Лишь самые крупные частицы, имеющие диаметр больше 1,5 мм, составляющие незначительную часть их общего количества, доставляют в слой огарка некоторое количество влаги, которая испаряется при соприкосновении с раскаленной поверхностью подушки, не успевая проникнуть вглубь. Таким образом, огарок на дне топки состоит только из углерода, карбоната и сульфата натрия, который восстанавливается в слое до сульфида натрия.

Решающее влияние на выход сульфида имеет происходящая в слое реакция взаимодействия сульфата натрия с углеродом [13]:



ввиду того, что остальные термодинамические возможные восстановительные реакции в топке СРК имеют неблагоприятные условия (низкая концентрация газов-восстановителей, малое время контакта частиц с газами, низкая скорость реакций).

Так как в слое большая часть тепла расходуется на эндотермическую реакцию, изменения температуры огарка отражают ход химических превращений. Исходя из этого, горизонтальные составляющие и градиенты концентраций можно считать равными нулю.

Математическая модель подушки огарка представляет собой [13, 14]:

$$\begin{cases} \frac{d\xi}{dx} = \frac{1}{U^n} x^{n-1} (1-\xi) \left(x \frac{dK}{dx} + nK \right) \\ \lambda_n F_m \frac{d^2 T_c}{dx^2} + ((34,625 + 17,624\xi) G_{nc}^{Na_2SO_4} + 48,859 G_{nc}^{Na_2CO_3}) \frac{dT_c}{dx} - \\ - G_{nc}^{Na_2SO_4} (-58338 + 17,624\xi) \frac{d\xi}{dx} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Численные значения коэффициентов сульфата (Na_2SO_4) и карбоната натрия (Na_2CO_3) получены из формул для расчета стандартного изменения энергии Гиббса реакций образования веществ из элементов.

Параметры, используемые в модели подушки огарка (3), приведены в таблице 3.

Таблица 3. Технологические параметры математической модели подушки огарка

Table 3. Technological parameters of the mathematical model of the cinder cushion

Обозначение	Наименование параметра	Размерность
x	Пространственная координата по высоте огарка	м
$G_{nc}^{Na_2SO_4}$	Расход сульфата натрия из зоны пиролиза в слое огарка	кмоль/час
$G_{nc}^{Na_2CO_3}$	Расход сульфата натрия из зоны пиролиза в слое огарка	кмоль/час
n	Концентрация общей щелочи в слабом белом щелоке	гNa ₂ O/л
T_c	Температура огарка в слое	К
ξ	Степень восстановления сульфата натрия в слое огарка	
λ_n	Коэффициент теплопроводности огарка	ккал/м*ч*град
K	Константа скорости реакции	
U	Средняя скорость фильтрации жидких солей	м/час
F_m	Поверхность нагрева подушки огарка, принимаемая равной площади горизонтального сечения топки	м ²

РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОДСИСТЕМЫ СЖИГАНИЯ ЧЕРНОГО ЩЕЛОКА В ТОПКЕ СРК

Оценка эффективности процесса сжигания черного щелока проводилась с применением разработанной ИМ подсистемы сжигания черного щелока в топке СРК на основе решения представленных уравнений, описывающих математическую модель топки.

При этом учитывались свойства черного щелока (элементарный состав органики, состав минеральных компонентов, содержание влаги) и конструктивные параметры топки СРК (поперечное сечение, поверхности нагрева в зонах). Для имитационного моделирования использовались технологические параметры (экспериментальные данные) реальных объектов управления – СРК, предприятий целлюлозно-бумажной промышленности.

В результате ИМ подсистемы сжигания черного щелока в топке СРК были получены зависимости состава и температуры газов в пиролизной и окислительной зонах (рис. 5, 6). Приведенные зависимости дают возможность определить следующие параметры: коэффициент избытка воздуха в топке СРК, температуры газов в топке по зонам, позволяющие достичь наименьших потерь тепла из-за неполного сгорания, а также наилучших значений других выходных характеристик.

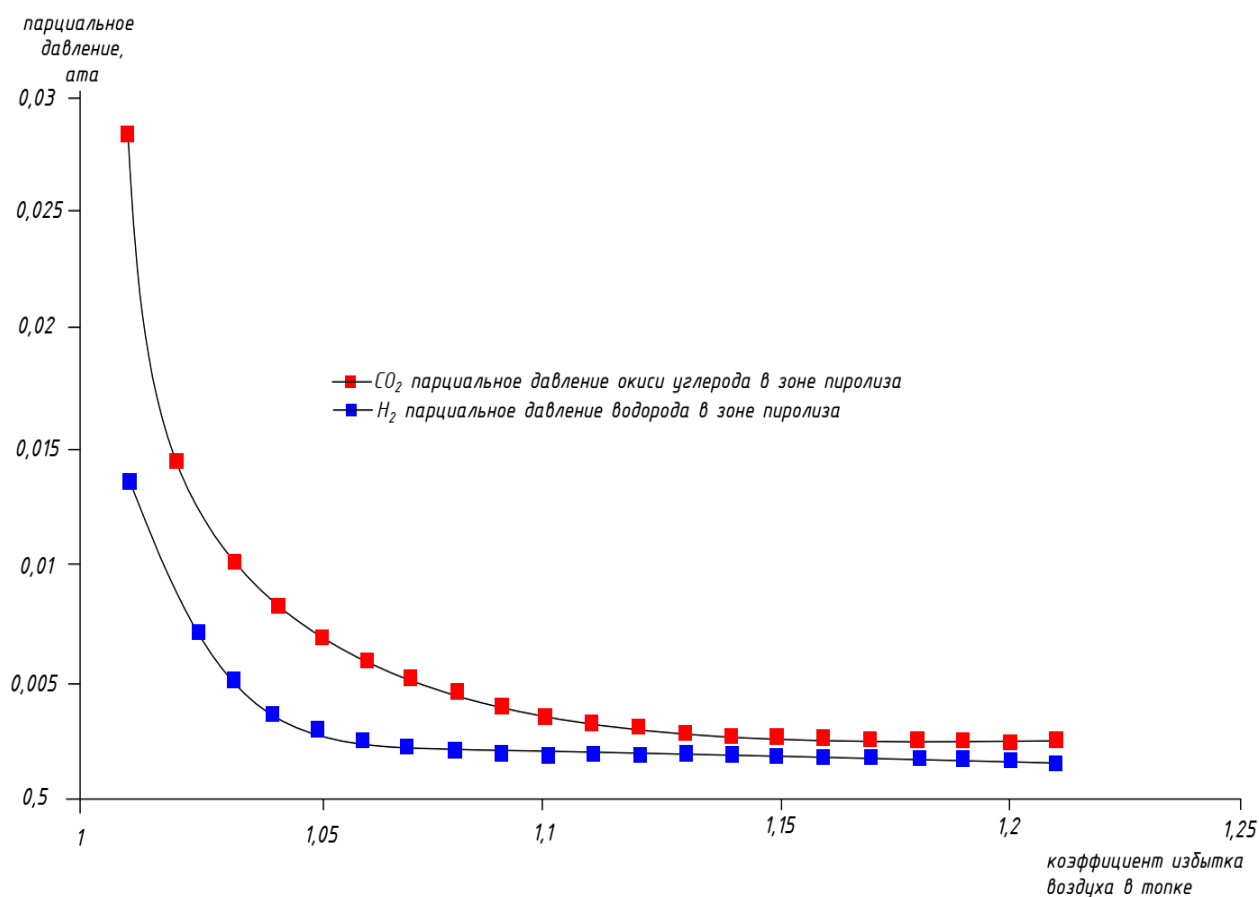


Рис. 5. Парциальное давление CO_2 и H_2 в зоне пиролиза

Fig. 5. CO_2 and H_2 partial pressure in the pyrolysis zone

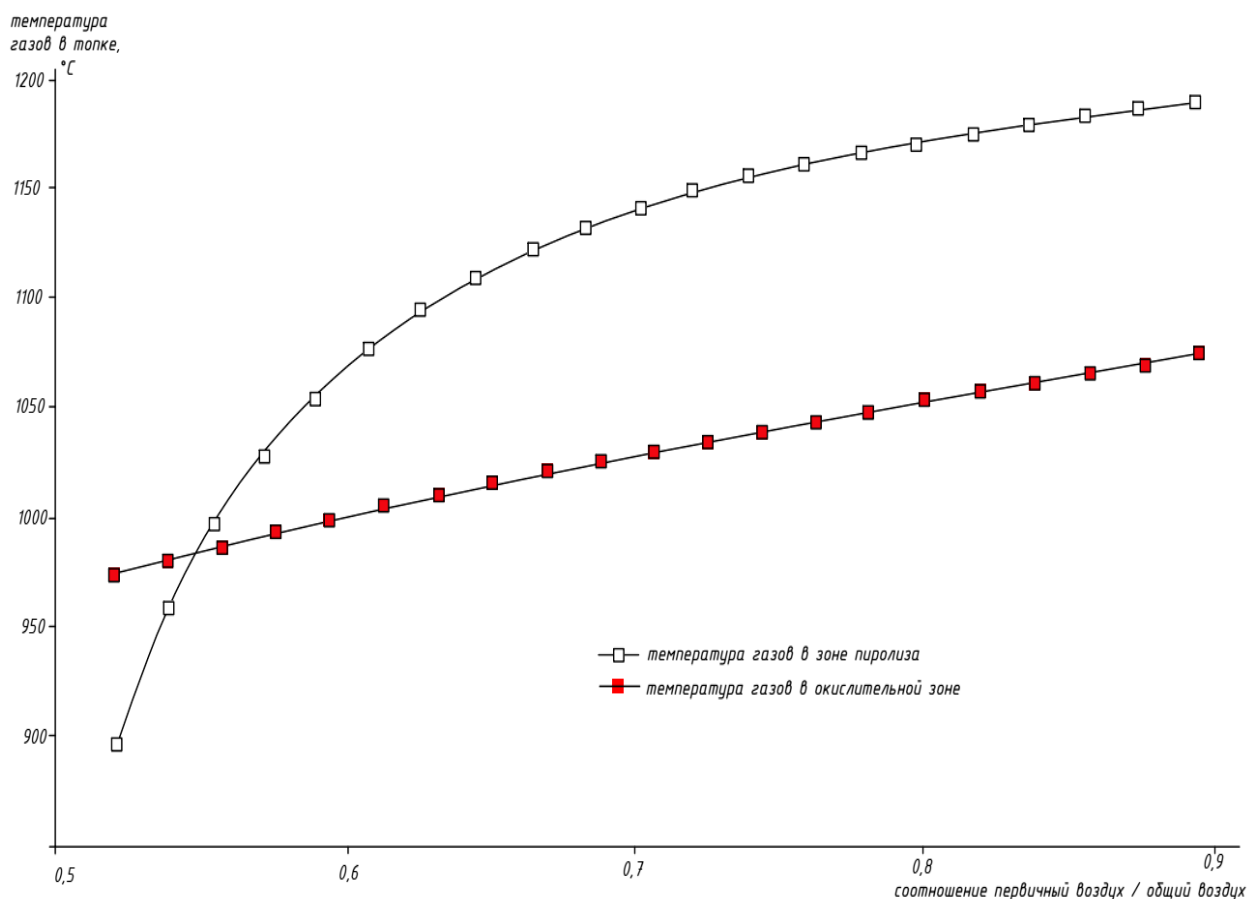


Рис. 6. Температура газов в топке СРК

Fig. 6. Gas temperature inside the combustion chamber of the recovery boiler

Использование ИМ при оптимизации режимов работы СРК позволяет повысить экономическую эффективность его работы за счет снижения тепловых потерь и уноса химических веществ при сжигании черного щелока.

ИМ позволяет определить оптимальные параметры процесса, такие как коэффициент избытка воздуха, соотношение первичный воздух/общий воздух и т.д., т.е. оптимизировать работу СРК.

Верификация ИМ подсистемы сжигания черного щелока в топке СРК проводилась для двух предприятий ЦБП Северо-Западного федерального округа на экспериментальных данных, полученных для четырех СРК различной производительности. В результате моделирования были получены значения расчетных параметров, соответствующие режимным параметрам реальных СРК. Экспертами предприятий отмечено, что разработанная ИМ дает возможность прогнозировать режимы процесса сжигания черного щелока и может быть использована для разработки/уточнения режимных карт реальных объектов управления – СРК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для решения задачи получения целевых продуктов сжигания черного щелока в топке СРК – карбоната и сульфида натрия – выполнена разработка ИМ подсистемы сжигания черного щелока в топке СРК.

Разработанная ИМ подсистемы сжигания черного щелока в топке СРК даст возможность моделировать процессы:

– горения черного щелока – для изучения влияния различных факторов (состав черного щелока, расход воздуха, температура) на эффективность сжигания, образование загрязняющих веществ (NO_x , CO) и тепловую мощность СРК;

– восстановления сульфата натрия – для изучения влияния температуры, состава газов и содержания углерода на скорость восстановления сульфата натрия до сульфида натрия в СРК.

Применение ИМ подсистемы сжигания черного щелока в топке СРК позволит оптимизировать процесс сжигания, минимизировать выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, снизить потребление ресурсов и отходов, а также повысить общую эффективность процессов регенерационного цикла.

ИМ СРК является инструментом повышения эффективности, безопасности и надежности систем автоматизации и управления реального объекта. Использование ИМ СРК дает возможность снизить затраты, повысить производительность, оптимизировать процессы и принимать обоснованные решения на основе анализа данных и прогнозирования поведения систем автоматизации и управления СРК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Almeida G.J., Vakkilainen G., Laryshyn E. et al. Comparing a linear transfer function-noise model and a neural network to model boiler bank fouling in a kraft recovery boiler // TAPPI Journal. 2024. Vol. 23. Pp. 374–384. DOI: 10.32964/TJ23.7.374
2. Аниускин С. В., Куров В. С. Рекуперация и очистка газовых выбросов целлюлозного производства // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024. № 1(397). С. 182–194. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-182-194. EDN: FAGREG
3. Belisário A.B., Edberg A., Björk M. et al. On the diagnosis of a fouling condition in a kraft recovery boiler: combining process knowledge and data-based insights // TAPPI Journal. 2023. Vol. 22. Pp. 162–171. DOI: 10.32964/TJ22.3.162
4. Wang Y., Xu Y., Guo K., Yin X. Atomization numerical simulation of high solids content bamboo pulping black liquor based on VOF model // Nordic Pulp & Paper Research Journal. 2025. DOI: 10.1515/npprj-2024-0063
5. da Silva P.S.P., Engblom P., Brink M. et al. An ignition delay time based criterion for the presence of envelope flame during black liquor droplet combustion // Fuel. 2025. Vol. 388. DOI: 10.1016/j.fuel.2025.134473
6. Jafarionar F., Vainio E., Hupa L., Hupa M.M. Deposit sintering in modern Kraft recovery boilers – The role of NaOH? // Fuel. 2024. Vol. 371(12). P. 132138. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.132138
7. Niemi J., Balint R., Engblom M. et al. Equilibrium model approach to predict local chemical changes in recovery boiler deposits // Energy. 2024. Vol. 306. P. 132507. DOI: 10.1016/j.energy.2024.132507
8. Niemi J., Balint R., Engblom M., Lindberg D. Modeling of Temperature Gradient-Induced Melt Movement within Kraft Recovery Boiler Ash Deposits // Energy & Fuels. 2025. Vol. 39(1). Pp. 454–464. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.4c04516
9. Технология целлюлозно-бумажного производства: в 3 т. Т. 3. Автоматизация, стандартизация, экономика и охрана окружающей среды в ЦБП. Ч. 1. Автоматизация, стандартизация и экономика в ЦБП. СПб.: Политехника, 2008. 621 с.

10. Balint R., Engblom M., Vainio E. et al. Changes in chlorine content over time – Probe deposit sampling in a Finnish kraft recovery boiler // *Fuel*. 2023. Vol. 340. P. 127599. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.127599

11. Анишкин С. В., Куров В. С. Эффект интенсивного окисления сероводорода дымовых газов содорегенерационного котла при производстве целлюлозы // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2024. № 5(401). С. 188–202. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-188-202. EDN: WBEORK

12. Новикова М. А., Ковалёв Д. А. Моделирование процесса сжигания черного щелока в топке содорегенерационного котла // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2024. Т. 68. № 94. С. 106–109. DOI: 10.36807/1998-9849-2024-68-94-106-109. EDN: DKNRXX

13. Ковалёв Д. А., Куркина В. В., Русинов Л. А. Моделирование степени восстановления сульфата натрия в плаве для процесса сжигания черного щелока в топке содорегенерационного котлоагрегата // *Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах*. 2023. Т. 1. С. 69–72. EDN: YWDMNH

14. Ковалёв Д. А. Декомпозиция содорегенерационного котлоагрегата как сложного объекта управления // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2025. № 2. С. 566–577. DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-566-567. EDN: XSGIZB

REFERENCES

1. Almeida G.J., Vakkilainen G., Laryshyn E. et al. Comparing a linear transfer function-noise model and a neural network to model boiler bank fouling in a kraft recovery boiler. *TAPPI Journal*. 2024. Vol. 23. Pp. 374–384. DOI: 10.32964/TJ23.7.374

2. Aniskin S.V., Kurov V.S. Recovery and purification of gas emissions from pulp production. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Lesnoy zhurnal* [News of higher educational institutions. Forestry Bulletin]. 2024. No. 1(397). Pp. 182–194. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-182-194. EDN: FAGREG. (In Russian)

3. Belisário A.B., Edberg A., Björk M. et al. On the diagnosis of a fouling condition in a kraft recovery boiler: combining process knowledge and data-based insights. *TAPPI Journal*. 2023. Vol. 22. Pp. 162–171. DOI: 10.32964/TJ22.3.162

4. Wang Y., Xu Y., Guo K., Yin X. Atomization numerical simulation of high solids content bamboo pulping black liquor based on VOF model. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 2025. DOI: 10.1515/npprj-2024-0063

5. da Silva P.S.P., Engblom P., Brink M. et al. An ignition delay time based criterion for the presence of envelope flame during black liquor droplet combustion. *Fuel*. 2025. Vol. 388. DOI: 10.1016/j.fuel.2025.134473

6. Jafarihonar F., Vainio E., Hupa L., Hupa M.M. Deposit sintering in modern Kraft recovery boilers – The role of NaOH? *Fuel*. 2024. Vol. 371(12). P. 132138. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.132138

7. Niemi J., Balint R., Engblom M. et al. Equilibrium model approach to predict local chemical changes in recovery boiler deposits. *Energy*. 2024. Vol. 306. P. 132507. DOI: 10.1016/j.energy.2024.132507

8. Niemi J., Balint R., Engblom M., Lindberg D. Modeling of Temperature Gradient-Induced Melt Movement within Kraft Recovery Boiler Ash Deposits. *Energy & Fuels*. 2025. Vol. 39(1). Pp. 454–464. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.4c04516

9. *Tekhnologiya tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva: v 3 t. T. 3* [Pulp and paper production technology in 3 volumes. Vol. 3]. [Automation, standardization, economics and

environmental protection in the pulp and paper industry]. Part 1. *Avtomatizatsiya, standartizatsiya i ekonomika v TSBP* [Automation, standardization and economics in the pulp and paper industry]. St. Petersburg: Politekhnik, 2008. 621 p. (In Russian)

10. Balint R., Engblom M., Vainio E. et al. Changes in chlorine content over time – Probe deposit sampling in a Finnish kraft recovery boiler. *Fuel*. 2023. Vol. 340. P. 127599. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.127599

11. Aniskin S.V., Kurov V.S. Effect of intensive oxidation of hydrogen sulfide in flue gases of a soda recovery boiler in the production of cellulose. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Lesnoy zhurnal* [News of higher educational institutions. Forestry journal]. 2024. No. 5(401). Pp. 188–202. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-188-202. EDN: WBEORK. (In Russian)

12. Novikova M.A., Kovalev D.A. Modeling the process of black liquor combustion in the furnace of a soda recovery boiler. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)* [Bulletin of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)]. 2024. Vol. 68. No. 94. Pp. 106–109. DOI: 10.36807/1998-9849-2024-68-94-106-109. EDN: DKNRXX. (In Russian)

13. Kovalev D.A., Kurkina V.V., Rusinov L.A. Modeling the degree of sodium sulfate reduction in the melt for the process of burning black liquor in the furnace of a soda recovery boiler. *Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya po problemam upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh* [All-Russian Scientific Conference on Control Problems in Technical Systems]. 2023. Vol. 1. Pp. 69–72. EDN: YWDMNH. (In Russian)

14. Kovalev D.A. Decomposition of a soda recovery boiler unit as a complex control object. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [Bulletin of Tula State University. Technical sciences]. 2025. No. 2. P. 566–577. DOI: 10.24412/2071-6168-2025-2-566-567. EDN: XSGIZB. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Ковалёв Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой автоматизации технологических процессов и производств, Высшая школа технологии и энергетики, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна;

198095, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4;

d.a.kovalyov@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0668-8593>, SPIN-код: 3884-5685

Information about the author

Dmitriy A. Kovalev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automation of technological processes and productions, Higher School of Technology and Power Engineering, Saint Petersburg State University of Industrial Technology and Design;

198095, Russia, Saint Petersburg, 4 Ivan Chernykh street;

d.a.kovalyov@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0668-8593>, SPIN-code: 3884-5685