

19. Yan Z., Li L., Yu S. *et al.* Adaptive Formation Control of Unmanned Underwater Vehicles with Collision Avoidance and Environment Adaptation, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, Vol. 10, No. 4, Article 516.
20. Xia G., Zhang Y., Zhang W., Chen X., Yang H. Multi-timescale 3-D Coordinated Formation Control for Multi-Underactuated AUV with Uncertainties: Design and Stability Analysis Using Singular Perturbation Methods, *Ocean Engineering*, 2021, Vol. 230, Article 109053. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109053.
21. Karkishchenko A.N. Gradientnyy metod formirovaniya stroya podvodnykh apparatov na osnove veroyatnostnogo funktsionala [Gradient method for forming a formation of underwater vehicles based on a probabilistic functional], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2025, Vol. 26, No. 4, pp. 209-219.
22. Zhen Q. *et al.* Formation Control of a Multi-AUVs System Based on Virtual Structure and Artificial Potential Field, *Ocean Engineering*, 2022.

Каркищенко Александр Николаевич – НИИ Робототехники и процессов управления; e-mail: karkishalex@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: +79034610539; д.ф.-м.н.; профессор; г.н.с.

Karkishchenko Alexander Nikolaevich – Scientific Research Institute of the Robotics and Control Processes; e-mail: karkishalex@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79034610539; dr. of phys. and math. sc.; professor; chief researcher.

УДК 681.51: 676.082.4

DOI 10.18522/2311-3103-2026-4-226-241

Д.А. Ковалёв, Д.Х. Имаев, С.Е. Душин

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННОГО КОТЛОАГРЕГАТА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Ключевой агрегат производства сульфатной целлюлозы (крафт-процесса) – содорегенерационный котлоагрегат (СРК) – обеспечивает восстановление химикатов черного щелока. Актуальна задача повышения степени восстановления щелока без изменения технологии процесса и конструкции аппаратов, т.е. информационно-алгоритмическими средствами автоматического управления процессом. Более высокое гарантированное качество восстановления обеспечивают алгоритмы регулирования, синтезированные на основе адекватных математических моделей. Цель статьи – системный анализ СРК как объекта управления и построение усовершенствованной математической модели, пригодной для синтеза высококачественных систем автоматической стабилизации. В основе методологии лежит принцип последовательного раскрытия неопределённости моделей сложных систем управления (А.А. Вавилов). В отличие от известных подходов, динамика СРК в окрестности выбранного режима описана в виде многоуровневой модели класса LTI. Комбинирование аналитических методов с обработкой экспериментальных данных для конкретного режима позволило получить определенные до значений параметров математические модели реального СРК. Разработанная многоуровневая линейная стационарная модель СРК дает возможность анализировать динамику подсистем и агрегата в целом, устойчивость режимов и влияние возмущений, и обосновать необходимость автоматического поддержания требуемого качества технологических процессов в окрестности выбранного режима. Модели в символьном виде применимы к большинству подобных агрегатов технологического процесса производства сульфатной целлюлозы. Параметры полностью определенных моделей должны быть скорректированы по результатам обработки данных, относящихся к конкретному агрегату и режиму. Направление дальнейших исследований связано с развитием методов анализа динамики сложных систем управления по моделям иерархической структуры, а также синтеза систем стабилизации режима и ослабления влияния возмущений.

Содорегенерационный котлоагрегат; степень восстановления; черный щелок; моделирование; идентификация; система автоматического регулирования.

D.A. Kovalev, D.H. Imaev, S.E. Dushin

MODELING AND IDENTIFICATION OF A COGENERATION BOILER UNIT FOR KRAFT PULP PRODUCTION AS A CONTROL PLANT

The key unit of kraft pulp production – the recovery boiler – ensures the regeneration of black liquor chemicals. The task of increasing the liquor reduction degree without changing the process technology or equipment design, i.e., through information and algorithmic means – automatic control is relevant. A higher

guaranteed quality of recovery is provided by control algorithms synthesized on the basis of adequate mathematical models. The aim of this paper is a system analysis of the recovery boiler as a control plant and the development of an enhanced mathematical model suitable for synthesizing high-quality automatic stabilization systems. The methodology is based on the principle of sequential uncertainty removal for complex control system models (A.A. Vavilov). Unlike known approaches, the dynamics of the recovery boiler in the vicinity of a selected operating point are described as a multi-level LTI-class model. Combining analytical methods with experimental data processing for a specific operating mode made it possible to obtain mathematical models of an actual recovery boiler with parameters determined down to specific numerical values. The developed multilevel linear stationary model of the recovery boiler makes it possible to analyze the dynamics of subsystems and the unit as a whole, the stability of modes and the influence of disturbances, and justify the need to automatically maintain the required quality of technological processes in the vicinity of the selected mode. Symbolic models are applicable to most similar kraft process units. Parameters of fully defined models should be adjusted based on the results of processing data related to a specific unit and mode. The direction of further research is associated with the development of methods for analyzing the dynamics of complex control systems according to models of a hierarchical structure, as well as the synthesis of systems for stabilizing the regime and reducing the influence of perturbations, as well as the synthesis of systems for regime stabilization and mitigation of the influence of disturbances.

Recovery boiler; reduction degree; black liquor; modeling; identification; automatic control system.

Введение. Производство целлюлозы сульфатным способом сводится к варке древесной щепы в растворе сульфида натрия и гидроксида натрия. Так называемый крафт-процесс обладает рядом достоинств, к которым относятся высокая прочность волокна, возможность переработки древесины различных пород и экономичность [1–3].

Важнейшей частью комплекса производства сульфатной целлюлозы является содо-регенерационный котлоагрегат (СРК), который позволяет отделить химикаты от органических веществ и вернуть их в процесс варки. В результате получается целлюлоза и так называемый черный щелок, содержащий отработанные химикаты, растворенный лигнин и другие органические вещества.

Режимы функционирования СРК определяются Технологическими регламентами и Режимными картами [4–6]. Устойчивость режимов и их инвариантность к малым по уровню возмущениям обеспечивают системы автоматического регулирования, реализующие принцип обратной связи. Технологии автоматизации позволяют достичь целей управления и регулирования информационно-алгоритмическими средствами без необходимости изменения технологии восстановления щелоков и конструкции СРК. Цель регулирования СРК, прежде всего, заключается в поддержании минимально допустимой степени восстановления сульфата натрия. Более высокая степень восстановления щелока при тех же свойствах СРК достигается за счет добавляемого в сухом виде сульфата натрия, что удорожает процесс.

Традиционные системы автоматической стабилизации не позволяют в точности достичь цели регулирования, поставленной в виде ограничения. Приближенное (практическое) решение заключается в подмене цели регулирования – поддержания степени восстановления на уровне, несколько превышающем ограничение. Однако приближение заданного уровня восстановления к ограничению без его нарушения требует уменьшения ошибки системы стабилизации. Таким образом, технический показатель – качество процессов регулирования – напрямую определяет показатель экономический.

Системы автоматического управления и регулирования применяют специализированное программное обеспечение, разработанное на основе математического описания объекта управления, среды его функционирования и требований к процессам достижения цели. Более высокое гарантированное качество регулирования обеспечивают качественные алгоритмы. Их синтез основан на более адекватных математических моделях СРК, построенных в результате детального исследования технологических процессов, комбинирования аналитических методов и обработки экспериментальных данных.

В период с 1960 по 1990 гг. отечественные исследователи активно занимались разработкой технологии процессов в СРК, их математическим моделированием и проблемами автоматизации управления [7–13]. В настоящее время подобными исследованиями в основном занимаются зарубежные ученые [14–24], среди которых особо выделяются работы финских специалистов.

В статье изложены результаты моделирования СРК, рассматриваемого как объект регулирования степени восстановления щелока (сульфата натрия). При изложении материала авторы стремились придерживаться предложенных А.А. Вавиловым принципов системного подхода к построению моделей, анализу и эволюционному синтезу сложных систем управления (ССУ) [25].

1. Технологические процессы восстановления сульфата натрия. Упрощенная схема технологических процессов (ТП) регенерации щелоков изображена на рис. 1.

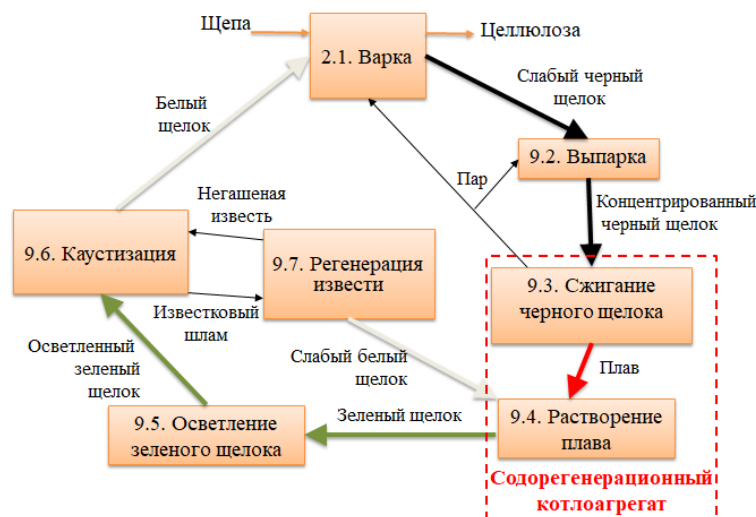


Рис. 1. Схема технологических процессов регенерации щелоков

Концентрированный черный щелок подается в СРК, где при температуре 850 ... 1100 °С сгорают органические компоненты. В результате сжигания образуется минеральный остаток (плав), а тепловая энергия преобразуется в пар (40 ... 70 атмосфер и 400 ... 450 °С). Плав самотеком попадает в бак-растворитель, где смешивается со слабым белым щелоком. Образуется зеленый щелок, который содержит восстановленные химические компоненты карбонат натрия (Na_2CO_3) и сульфид натрия (Na_2S) – основу регенерации активной щелочи.

Эксплуатация СРК должна отвечать требованиям «Технологического регламента сжигания черного щелока и регенерации химикатов в СРК» [4–6], которые определяют ключевые параметры технологических процессов в зависимости от производительности СРК, измеряемого в тоннах абсолютно сухого вещества в сутки (а. с. /сутки). Режимы работы СРК регламентированы «Режимной-технологической картой СРК», отображающей оптимальные и допустимые режимы работы для 80%, 90% и 100% нагрузки (производительности) СРК. Режимно-технологическая карта СРК каждого предприятия является коммерческой тайной. Она составляется в результате расчетов данных технологических процессов, испытаний, пусконаладочных работ и процесса эксплуатации СРК и отображает ключевые показатели от (25 до 45 наименований, в зависимости от целлюлозно-бумажного комбината): пара и питательной воды, топлива – черного щелока, дутьевого воздуха, газового тракта, зеленого щелока.

Основным требованием Технологического регламента и Режимной карты, предъявляемым к реальным СРК, является степень восстановления сульфата натрия Na_2SO_4 (более 90%). Это позволяет снизить количество добавляемого перед сжиганием сульфата натрия в бак-смеситель.

2. Системный анализ и моделирование СРК. Результат системного анализа СРК как объекта управления представлен на рис. 2, где ξ – степень восстановления сульфата натрия.



Рис. 2. СРК как ОУ

Обозначения технологических параметров – переменных математической модели – сведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры технологических процессов СРК

Обозн.	Наименование параметра	Размерность
$G_{гр}$	Массовый расход греющего пара, подаваемого в выпарную станцию	кг/с
G_s	Массовый расход сульфата натрия, добавленного в чёрный щёлок	кг/с
$G_{п}$	Массовый расход греющего пара, подаваемого в щёлоковый подогреватель	кг/с
G_2	Объёмный расход чёрного щёлока на выходе из щёлокового подогревателя	м ³ /с
Q_{01}	Объёмный расход первичного воздуха, подаваемого в топку	нм ³ /с
Q_{02}	Объёмный расход вторичного воздуха, подаваемого в топку	нм ³ /с
Q_{03}	Объёмный расход третичного воздуха, подаваемого в топку	нм ³ /с
G_{20}	Массовый расход греющего пара подаваемого в подогреватель воздуха	кг/с
G_2	Массовый расход питательной воды, подаваемой в экономайзер	кг/с
G_{31}	Массовый расход охлаждающей воды, подаваемой в поверхностный пароохладитель	кг/с
G_{22}	Массовый расход чёрного щёлока, подаваемого на сжигание в топку СРК	кг/с
$U_{эф}$	Напряжения коронирующих электродов электрофилтра	кВ
Q_{51}	Объёмный расход дымовых газов на выходе из электрофилтра	нм ³ /ч
G_{43}	Массовый расход зеленого щёлока, из бака-растворителя плава СРК	кг/с
G_{42}	Массовый расход слабого белого щёлока, подаваемого в бак-растворитель плава СРК	кг/с
$\rho_{вх}$	Плотность чёрного щёлока на входе в выпарную станцию	кг/м ³
ϑ_{11}	Температура чёрного щёлока на входе в щёлоковый подогреватель	°С
ϑ_0	Температура воздуха на входе в подогреватель воздуха	°С
G_{25}	Массовый расход перегретого пара на выходе второй части пароперегревателя	кг/с
$Q_{эф}$	Объёмный расход дымовых газов на входе в электрофилтр	нм ³ /ч
Q_{oc}	Объёмный расход уловленных пылевых частиц в электрофилтре	нм ³ /ч
G_{41}	Массовый расход плава, поступающего в бак-растворитель плава из топки СРК	кг/с
G_{44}	Массовый расход пылегазовых выбросов, из бака-растворителя плава СРК	кг/с

Окончание табл. 1

Обозн.	Наименование параметра	Размерность
ϑ_{25}	Температура перегретого пара на выходе второй части пароперегревателя	$^{\circ}\text{C}$
ρ_1	Плотность дымовых газов на выходе из электрофильтра	кг/м^3
ρ_{43}	Плотность зеленого щёлка на выходе из бака-растворителя плава СРК	кг/м^3
ξ	Степень восстановления сульфата натрия	%
$Q_{\text{вх}}$	Объёмный расход чёрного щёлка на входе в выпарную станцию	$\text{м}^3/\text{с}$
Q_0	Объёмный расход воздуха подаваемого в подогреватель воздуха	$\text{нм}^3/\text{с}$
ϑ_{01}	Температура первичного воздуха, подаваемого в топку	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_{02}	Температура вторичного воздуха, подаваемого в топку	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_{03}	Температура третичного воздуха, подаваемого в топку	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_{01}	Температура первичного воздуха, подаваемого в топку	$^{\circ}\text{C}$
$\vartheta_{\text{т}}$	Температура уходящих дымовых газов из топки СРК	$^{\circ}\text{C}$
$Q_{\text{т}}$	Объёмный расход уходящих дымовых газов из топки СРК	$\text{нм}^3/\text{с}$
$\rho_{\text{эф}}$	Плотность дымовых газов на входе в электрофильтр	кг/нм^3
$\vartheta_{\text{эф}}$	Температура дымовых газов на входе в электрофильтр	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_1	Температура дымовых газов на выходе из электрофильтра	$^{\circ}\text{C}$

На рис 1 возмущения среды функционирования: $\rho_{\text{вх}}$; ϑ_{11} ; ϑ_0 ; G_{25} ; $Q_{\text{эф}}$; $Q_{\text{ос}}$; G_{41} ; G_{44} . Потенциальными управляющими (регулирующими) воздействиями являются: $G_{\text{гр}}$; G_s ; $G_{\text{п}}$; Q_2 ; Q_{01} ; Q_{02} ; Q_{03} ; G_{20} ; G_2 ; G_{31} ; G_{22} ; $U_{\text{эф}}$; Q_1 ; G_{43} ; G_{42} .

В соответствии с принципом последовательного раскрытия неопределенности моделей ССУ [25] – [27] перечисление переменных дает модель нулевого ранга неопределенности ($R = 0$).

Попытки централизованного управления, основанные на моделировании СРК в целом, вызывают множество практических и теоретических проблем. Необходимость функционально-целевой декомпозиции требуют представления СРК как сложной системы, образованной взаимодействием подсистем: подготовки черного щелока к сжиганию PS1, подготовки воздуха PS2, сжигания черного щелока PS3, парообразования и питательной воды PS4, очистки дымовых газов PS5, зеленого и белого щелока PS6.

Диаграмма ориентированного гиперграфа – несимметричного отношения на множестве многомерных подсистем типа Multiple Input – Multiple Output (MIMO) – изображена на рис. 3.

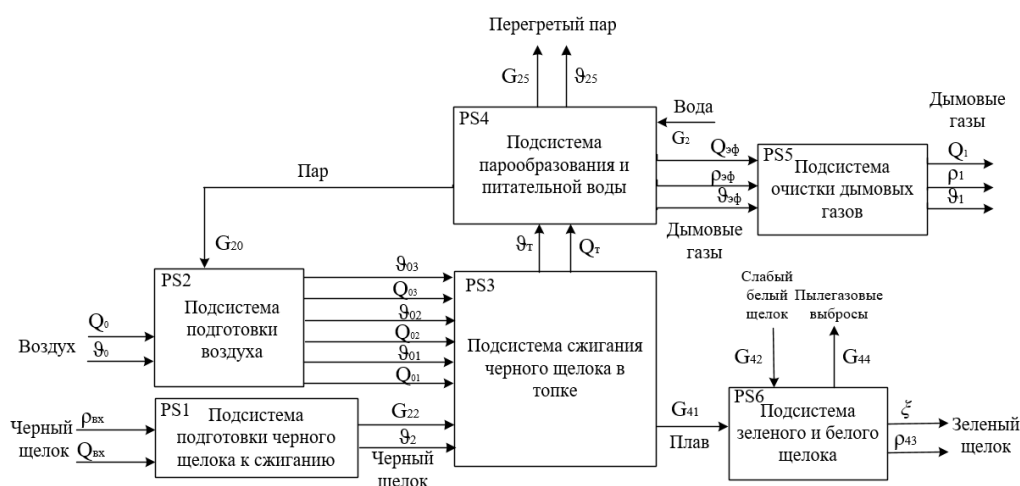


Рис. 3. СРК как объект управления сложной структуры

По терминологии системного подхода А. А. Вавилова [25] – [26] получена модель СРК первого ранга неопределенности ($R = 1$). Дальнейшее раскрытие неопределенности достигается раскрытием неопределенности моделей подсистем. Если ТП регенерации щелоков рассматривать как объект управления L -го уровня иерархии, то СРК – это подсистема ($L-1$)-го уровня; перечисленные ранее подсистемы – компоненты ($L-2$)-го уровня.

3. Моделирование подсистем СРК. Ввиду малости отклонений переменных от выбранного режима далее рассматриваются линейные стационарные модели (класса LTI – Linear Time-Invariant) в виде обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами [4, 7–13].

1. Подсистема подготовки черного щелока к сжиганию PS1 включает процессы выпаривания, смешения с сухим сульфатом натрия, подогрева и подачи в форсунки распыления (рис. 4). В табл. 2 сведены технологические параметры процесса выпаривания черного щелока.

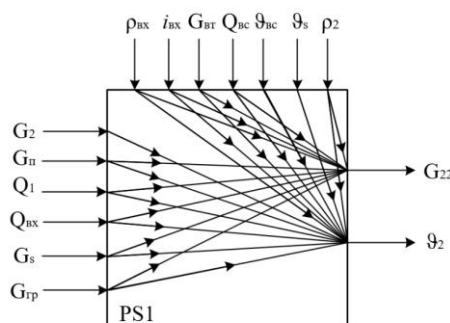


Рис. 4. Подсистема подготовки черного щелока к сжиганию

Таблица 2

Параметры процесса выпаривания черного щелока

Обозначение	Наименование параметра	Размерность
$\rho_{вс}$	Черный щёлок на выходе из выпарной станции	кг/м ³
$i_{вх}$	Удельная энтальпия чёрного щёлока на входе в выпарную станцию	кДж/кг
$i_{вс}$	Удельная энтальпия чёрного щёлока на выходе из выпарной станции	кДж/кг
$Q_{вс}$	Объёмный расход чёрного щёлока на выходе из выпарной станции	м ³ /с
$i_{гр}$	Удельная энтальпия пара, подаваемого в выпарную станцию	кДж/кг
$q_{гр}$	Удельная энтальпия отводимого конденсата из выпарной станции	кДж/кг
$G_{вт}$	Массовый расход вторичного пара на выходе из выпарной станции	кг/с
$i_{вт}^п$	Удельная энтальпия вторичного пара, отводимого из выпарной станции	кДж/кг
$V_{вс}$	Объём рабочего пространства выпарной станции	м ³

Процесс выпаривания черного щелока описывается дифференциальными уравнениями (см. [4, 6, 8]):

$$T_{вс} \frac{d\rho_{вс}}{dt} + \Delta\rho_{вс} = K_{Q_{вх}} \Delta Q_{вх} + K_{\rho_{вх}} \Delta\rho_{вх} + K_{i_{вх}} \Delta i_{вх} + K_{G_{гр}} \Delta G_{гр} - K_{G_{вт}} \Delta G_{вт} - K_{Q_{вс}} \Delta Q_{вс}, \quad (1)$$

где $T_{вс} = V_{вс}/Q_{вс}$, $A = \left[\rho_{вс} \left(\frac{\partial i_{вс}}{\partial \rho_{вс}} \right) + i_{вс} \right] Q_{вс}$, $K_{Q_{вх}} = \frac{\rho_{вх} i_{вх}}{A}$, $K_{\rho_{вх}} = \frac{Q_{вх} i_{вх}}{A}$, $K_{i_{вх}} = \frac{Q_{вх} \rho_{вх}}{A}$, $K_{G_{гр}} = \frac{i_{гр} q_{гр}}{A}$, $K_{G_{вт}} = (i_{вт}^п - i_{вс})/A$, $K_{Q_{вс}} = \rho_{вс} - i_{вс}/A$.

Процесс смешения черного щелока с сульфатом натрия в баке-смесителе описывается уравнениями [4, 6, 8]:

$$T_{\vartheta_{11}} \frac{d\Delta\vartheta_{11}}{dt} + \Delta\vartheta_{11} = a_1 \Delta Q_{\text{вс}} + a_2 \Delta \rho_{\text{вс}} + a_3 \Delta \vartheta_{\text{вс}} - a_4 \Delta G_s + a_5 \Delta \vartheta_s + a_6 \Delta Q_{21} + a_7 \Delta \rho_2 + a_8 \Delta \vartheta_2, \quad (2)$$

где $T_{\vartheta_{11}} = \frac{V}{Q_1}$, $a_1 = \frac{\rho_{\text{вс}}(i_{\text{вс}} - i_1)}{Q_1 \rho_{11} \left(\frac{\partial i_1}{\partial \vartheta_{11}} \right)}$, $a_2 = \frac{Q_{\text{вс}}(i_{\text{вс}} - i_1)}{Q_1 \rho_{11} \left(\frac{\partial i_1}{\partial \vartheta_{11}} \right)}$, $a_3 = \frac{Q_{\text{вс}} \rho_{\text{вс}} \left(\frac{\partial i_{\text{вс}}}{\partial \vartheta_{\text{вс}}} \right)}{Q_1 \rho_{11} \left(\frac{\partial i_1}{\partial \vartheta_{11}} \right)}$, $a_4 = \frac{i_1 - q_s}{Q_1 \rho_{11} \left(\frac{\partial i_1}{\partial \vartheta_{11}} \right)}$,
 $a_5 = \frac{G_s \left(\frac{\partial q_s}{\partial \vartheta_s} \right)}{Q_1 \rho_{11} \left(\frac{\partial i_1}{\partial \vartheta_{11}} \right)}$, $a_6 = \frac{\rho_2(i_2 - i_1)}{Q_1 \rho_{11} \left(\frac{\partial i_1}{\partial \vartheta_{11}} \right)}$, $a_7 = \frac{Q_{21}(i_2 - i_1)}{Q_1 \rho_{11} \left(\frac{\partial i_1}{\partial \vartheta_{11}} \right)}$, $a_8 = \frac{Q_{21} \cdot 2 \left(\frac{\partial i_2}{\partial \vartheta_2} \right)}{Q_1 \rho_{11} \left(\frac{\partial i_1}{\partial \vartheta_{11}} \right)}$.

Параметры процесса смешения сведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры процесса смешения

Обозначение	Наименование параметра	Размерность
Q_{21}	Объёмный расход чёрного щелока, подаваемого в бак-смеситель из рециркуляционной линии на выходе щелокового подогревателя	м ³ /с
Q_1	Объёмный расход чёрного щелока на выходе из бака-смесителя чёрного щелока с сульфатом натрия	м ³ /с
ρ_{11}	Плотность чёрного щелока на выходе из бака-смесителя	кг/м ³
$\vartheta_{\text{вс}}$	Температура чёрного щелока на выходе из выпарной станции	°С
ϑ_s	Температура сульфата натрия, добавляемого в бак-смеситель	°С
ρ_2	Плотность чёрного щелока на выходе из щелокового подогревателя	кг/м ³
ϑ_2	Температура чёрного щелока на выходе из щелокового подогревателя	°С
V	Объём рабочего пространства из бака-смесителя чёрного щелока с сульфатом натрия	м ³
i_1	Удельная энтальпия чёрного щелока на выходе из бака-смесителя чёрного щелока с сульфатом натрия	кДж/кг
q_s	Удельная энтальпия сульфата натрия, добавляемого в бак-смеситель	кДж/кг
i_2	Удельная энтальпия чёрного щелока на выходе из щелокового подогревателя	кДж/кг

Процесс подогрева черного щелока описывается уравнениями [4, 6, 8]:

$$T_{\vartheta_2} \frac{d\Delta\vartheta_2}{dt} + \Delta\vartheta_2 = K_1 \Delta Q_1 + K_2 \Delta \vartheta_{11} + K_3 \Delta G_{\text{п}} - K_4 \Delta Q_2, \quad (3)$$

где $T_{\vartheta_2} = V_{\text{п}}/Q_2$, $A_1 = Q_2 \left[\rho_2 \left(\frac{\partial i_2}{\partial \vartheta_2} \right) + i_2 \left(\frac{\partial \rho_2}{\partial \vartheta_2} \right) \right]$, $K_1 = \rho_1 i_1 / A_1$, $K_2 = Q_1 B_1 / A_1$, $K_3 = i_{\text{п}} / A_1$,
 $K_4 = \rho_2 i_2 / A_1$, $B_1 = \left[\rho_1 \left(\frac{\partial i_1}{\partial \vartheta_{11}} \right) + i_1 \left(\frac{\partial \rho_1}{\partial \vartheta_{11}} \right) \right]$.

Параметры процесса подогрева черного щелока сведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры процесса подогрева черного щелока

Обозначение	Наименование параметра	Размерность
Q_2	Объёмный расход чёрного щелока на выходе из щелокового подогревателя	м ³ /с
$V_{\text{п}}$	Объём рабочего пространства щелокового подогревателя	м ³ /с
$i_{\text{п}}$	Удельная энтальпия пара, подаваемого в щелоковый подогреватель	кДж/кг

Процесс подачи черного щелока в форсунки можно описать в виде:

$$T_{G_{22}} \frac{d\Delta G_{22}}{dt} + \Delta G_{22} = a_{21}Q_1 + a_{22}G_{\Pi} - a_{23}\rho_2 + a_{24}\rho_1, \quad (4)$$

где $T_{G_{22}} = V_{\Pi}/Q_2$, $a_{21} = \rho_2/\rho_1$, $a_{22} = 1/\rho_2$, $a_{23} = Q_2/\rho_2$, $a_{24} = Q_1/\rho_2$.

Для остальных подсистем СРК разработаны аналогичные системы дифференциальных уравнений (см. [4, 7–13]).

Раскрытие структур подсистем СРК ($L-2$)-го уровня дает модели второго ранга ($R = 2$).

2. Подсистема сжигания черного щелока в топке СРК (PS3) включает процессы: карбонизации едкого натра; карбонизации сульфида натрия; восстановления сульфата натрия в сульфид натрия; сгорания углерода и водорода; горения органической серы и сероводорода; регенерации серы и температурного режима в топочном пространстве СРК.

Процесс карбонизации едкого натра, можно описать в виде [4, 7, 9]:

$$T_{Na_2CO_3}^{11} \frac{d\Delta G_{Na_2CO_3}^{11}}{dt} + \Delta G_{Na_2CO_3}^{11} = k_{NaOH}^{чщ} \Delta G_{NaOH}^{чщ}, \quad (5)$$

где $T_{Na_2CO_3}^{11} = \frac{x_{NaOH}}{x_{Na_2CO_3}} \tau_{NaOH}^{чщ}$; $k_{NaOH}^{чщ} = \left(1 + \frac{x_{CO_2} - x_{H_2O}}{x_{NaOH}}\right)$.

Параметры процесса карбонизации едкого натра сведены в табл. 5.

Таблица 5

Параметры процесса карбонизации едкого натра

Обозначение	Наименование параметра	Размерность
$G_{Na_2CO_3}^{11}$	Массовый расход карбоната натрия в зоне реакции карбонизации	кг/с
$G_{NaOH}^{чщ}$	Массовый расход едкого натра в зоне реакции карбонизации	кг/с
x_{NaOH}	Стехиометрический коэффициент едкого натра	
$x_{Na_2CO_3}$	Стехиометрический коэффициент карбоната натрия	
x_{CO_2}	Стехиометрический коэффициент углекислого газа	
x_{H_2O}	Стехиометрический коэффициент воды	
$\tau_{NaOH}^{чщ}$	Время прохождения капель черного щелока зоны реакции карбонизации	с

Процесс карбонизации сульфида натрия представим в виде [4, 7, 9]:

$$T_{Na_2CO_3}^{12} \frac{d\Delta G_{Na_2CO_3}^{12}}{dt} + \Delta G_{Na_2CO_3}^{12} = k_{Na_2S}^{чщ} \Delta G_{Na_2S}^{чщ}, \quad (6)$$

где $T_{Na_2CO_3}^{12} = \frac{x_{Na_2S}}{x_{Na_2CO_3}} \tau_{Na_2S}^{чщ}$; $k_{Na_2S}^{чщ} = \left(1 + \frac{x_{H_2O} + x_{CO_2} + x_{H_2S}}{x_{Na_2S}}\right)$.

Параметры процесса карбонизации сульфида натрия сведены в табл. 6.

Таблица 6

Параметры процесса карбонизации сульфида натрия

Обозначение	Наименование параметра	Размерность
$G_{Na_2CO_3}^{12}$	Массовый расход карбоната натрия в зоне реакции карбонизации	кг/с
$G_{Na_2S}^{чщ}$	Массовый расход сульфида натрия в зоне реакции карбонизации	кг/с
x_{Na_2S}	Стехиометрический коэффициент сульфида натрия	
x_{H_2S}	Стехиометрический коэффициент сероводорода	
$\tau_{Na_2S}^{чщ}$	Время прохождения капель черного щелока зоны реакции карбонизации	с

Процесс восстановления сульфата натрия в сульфид натрия представим в виде [4, 7, 9]:

$$(T_{Na_2S}^{41}p + 1)\Delta G_{Na_2S}^{41} = k_{Na_2SO_4}^{32}\Delta G_{Na_2SO_4}^{32}, \quad (7)$$

где $k_{Na_2SO_4}^{32} = (1 + \frac{x_C - x_{CO_2}}{x_{Na_2SO_4}})$.

Параметры процесса восстановления сульфата натрия сведены в табл. 7.

Таблица 7

Параметры процесса восстановления сульфата натрия

Обозначение	Наименование параметра	Размерность
$G_{Na_2S}^{41}$	Массовый расход сульфата натрия в зоне реакции регенерации серы	кг/с
x_C	Стехиометрический коэффициент углерода	
$x_{Na_2SO_4}$	Стехиометрический коэффициент сульфата натрия	

Процессы сгорания углерода, водорода, а также органической серы и сероводорода опишем в виде [4, 7, 9]:

$$(T_{CO_2}^{21}p + 1)\Delta G_{CO_2}^{21} = k_C^{21}\Delta G_C^{21} + k_{O_2}^{211}\Delta G_{O_2}^{211}, \quad (8)$$

$$(T_{H_2O}^{212}p + 1)\Delta G_{H_2O}^{212} = k_{H_2}^{чщ}\Delta G_{H_2}^{чщ} + k_{O_2}^{212}\Delta G_{O_2}^{212}, \quad (9)$$

$$(T_{SO_2}^{211}p + 1)\Delta G_{SO_2}^{211} = k_{S_{орг}}^{чщ}\Delta G_{S_{орг}}^{чщ} + k_{O_2}^{215}\Delta G_{O_2}^{215}, \quad (10)$$

$$(T_{SO_2}^{212}p + 1)\Delta G_{SO_2}^{212} = k_{H_2S}^{окз}\Delta G_{H_2S}^{окз} + k_{O_2}^{214}\Delta G_{O_2}^{214} - k_{H_2O}^{211}\Delta G_{H_2O}^{211}. \quad (11)$$

Параметры процесса сгорания углерода, водорода, органической серы и сероводорода сведены в табл. 8.

Таблица 8

Параметры процесса сгорания углерода, водорода органической серы и сероводорода

Обозначение	Наименование параметра	Размерность
$G_{CO_2}^{21}$	Массовый расход углекислого газа в зоне реакции сгорания углерода	кг/с
G_C^{21}	Массовый расход углерода	кг/с
$G_{O_2}^{211}$	Массовый расход кислорода	кг/с
$G_{H_2O}^{212}$	Массовый расход воды в зоне реакции сгорания водорода	кг/с
$G_{H_2}^{чщ}$	Массовый расход водорода	кг/с
$G_{O_2}^{212}$	Массовый расход кислорода	кг/с
$G_{SO_2}^{211}$	Массовый расход оксида серы (сернистого газа)	кг/с
$G_{S_{орг}}^{чщ}$	Массовый расход органической серы	кг/с
$G_{O_2}^{215}$	Массовый расход кислорода	кг/с
$G_{SO_2}^{212}$	Массовый расход оксида серы (сернистого газа)	кг/с
$G_{H_2S}^{окз}$	Массовый расход сероводорода	кг/с
$G_{O_2}^{214}$	Массовый расход кислорода	кг/с
$G_{H_2O}^{211}$	Массовый расход воды	кг/с

Процесс регенерации серы описывается уравнениями [4, 7, 9]:

$$(T_{Na_2SO_4^T}p + 1)\Delta G_{Na_2SO_4^T}^{21} = k_{SO_2}\Delta G_{SO_2}^{221} + k_{O_2}\Delta G_{O_2}^{213} - k_{CO_2}\Delta G_{CO_2}^{22}, \quad (12)$$

где $T_{Na_2SO_4^T} = \frac{x_{Na_2CO_3}}{x_{Na_2SO_4}}\tau_{Na_2CO_3}^{21}$.

Параметры процесса регенерации серы сведены в табл. 9.

Таблица 9

Параметры процесса регенерации серы

Обозначение	Наименование параметра	Размерность
$G_{Na_2SO_4}^{21}$	Массовый расход сульфида натрия в зоне реакции восстановления	кг/с
$G_{SO_2}^{221}$	Массовый расход оксида серы (сернистого газа)	кг/с
$G_{O_2}^{213}$	Массовый расход кислорода	кг/с
$G_{CO_2}^{22}$	Массовый расход углекислого газа	кг/с
$\tau_{Na_2CO_3}^{21}$	Время прохождения капель черного щелока зоны реакции регенерации серы	с

3. Подсистема зеленого и белого щелока СРК (PS6) включает процессы смешения плава с белым щелоком в баке-растворителе плава для получения зеленого щелока требуемых параметров. Модель подсистемы PS6 имеет следующий вид [4, 12, 13]:

$$\frac{d\Delta h}{dt} = K_{11}\Delta Q_{42} - K_{12}\Delta Q_{43} - K_{13}\Delta Q_{44} + K_{17}\Delta G_{41}; \quad (13)$$

$$\frac{d\Delta\rho_{43}}{dt} = -K_{21}\Delta Q_{42} - K_{23}\Delta Q_{44} + K_{24}\Delta\rho_{42} - K_{25}\Delta\rho_{43} - K_{26}\Delta\rho_{44} + K_{27}\Delta G_{41} - K_{28}\Delta h, \quad (14)$$

где $Q_{42} = \frac{G_{42}}{\rho_{42}}$, $Q_{43} = \frac{G_{43}}{\rho_{43}}$, $Q_{44} = \frac{G_{44}}{\rho_{44}}$, $K_{11} = K_{12} = \frac{1}{F}$, $K_{13} = \frac{\rho_{44}[(1-K_{44})\rho_{432} + K_{44}\rho_{431}]}{\rho_{431}\rho_{432} * F}$,
 $K_{17} = 1/(\rho_{432} * F)$, $K_{21} = (\rho_{43} - \rho_{42})/V$, $K_{23} = \frac{\rho_{44}[-K_{44}\rho_{43}(\rho_{432} - \rho_{431}) + \rho_{432}(\rho_{43} - \rho_{431})]}{\rho_{431}\rho_{432}V}$,
 $K_{24} = \frac{\rho_{43}Q_{42}}{\rho_{42} * V}$, $K_{25} = \frac{Q_{43}}{V}$, $K_{26} = \frac{\rho_{43}\rho_{44}(\rho_{432} - \rho_{431})Q_{44}}{\rho_{431}\rho_{432} * V} \left(\frac{\partial K_{44}}{\partial \rho_{44}} \right)$, $K_{27} = \frac{\rho_{432} - \rho_{43}}{\rho_{432} * V}$, $K_{28} = \frac{Q_{43}}{V} \left(\frac{\partial \rho_{43}}{\partial h} \right)$.

Параметры процесса смешения плава с белым щелоком в табл. 10.

Таблица 10

Параметры процесса смешения плава с белым щелоком

Обозначение	Наименование параметра	Размерность
G_{42}	Массовый расход слабого белого щёлока	кг/с
G_{43}	Массовый расход зелёного щёлока	кг/с
G_{44}	Массовый расход пылегазовых выбросов	кг/с
ρ_{431}	Плотность воды в зелёном щёлоке на выходе из бака-растворителя плава	кг/м ³
K_{42}	Концентрация абсолютно сухих веществ в слабом белом щёлоке	кг а.с.в./ кг раствора
K_{43}	Концентрация абсолютно сухих веществ в зелёном щёлоке	кг а.с.в./кг раствора
K_{44}	Концентрация абсолютно сухих веществ в пылегазовых выбросах	кг а.с.в./кг раствора
G_{41}	Расход абсолютно сухого вещества, поступающего в бак-растворитель плава с потоком плава	кг/с
ρ_{432}	Плотность абсолютно сухого вещества зелёного щёлока	кг/м ³
ρ_{42}	Плотность слабого белого щёлока	кг/м ³
ρ_{43}	Плотность зелёного щёлока	кг/м ³
ρ_{44}	Плотность пылегазовых выбросов	кг/м ³
h	Номинальное значение уровня зелёного щёлока в баке-растворителе плава	м
V	Рабочий объём зелёного щёлока в баке-растворителе плава при номинальном значении уровня	м ³
F	Поверхность зеркала испарения щёлока в баке-растворителе плава	м ²

В данном исследовании приведены модели подсистем СРК для щелокового тракта: подсистемы подготовки черного щелока к сжиганию PS1 → подсистемы сжигания черного щелока PS3 → подсистемы зеленого и белого щелока PS6. Для остальных подсистем СРК разработаны аналогичные модели в виде систем дифференциальных уравнений. Аналитический подход, основанный на законах природы, которым подчиняются процессы в СРК, дает модели подсистем PS1 ... PS6 в символьном виде (ранга $R = 2$). Коэффициенты в виде символов означают, что уравнения справедливы для любого режима.

Для полной определенности моделей (до ранга $R = 3$) необходимы значения коэффициентов дифференциальных уравнений (1)–(14), которые, в свою очередь, зависят от параметров режима. Формулы соответствующих зависимостей приведены ранее.

4. Экспериментальная оценка параметров СРК. Значения параметров ТП зависят от режима работы СРК конкретного ЦБК. Их можно определить только экспериментально – путем обработки доступных архивных данных.

Для оценивания значений параметров ТП выполнена статистическая обработка массива экспериментальных данных, полученных для реального СРК. Для этого из массива выбран один из трех режимов работы (700 тонн а. с. в/сутки), в котором СРК отработал 73% времени календарного года. Результаты обработки массивов данных – оценки параметров ТП подсистем СРК PS1, PS3 и PS6 сведены в табл. 11.

Таблица 11

Значения параметров ТП подсистем СРК

Обозначение	Значение параметра	Размерность	Обозначение	Значение параметра	Размерность
Подсистема подготовки черного щелока к сжиганию (PS1)					
$Q_{вх}$	0,04	м ³ /с	q_s	70	кДж/кг
$\rho_{вх}$	1110	кг/м ³	Q_{21}	0,003	м ³ /с
$i_{вх}$	228	кДж/кг	ρ_2	1400	кг/м ³
$G_{гр}$	6,16	кг/с	ϑ_2	120	°С
$i_{гр}$	2630	кДж/кг	Q_1	0,008	м ³ /с
$q_{гр}$	630	кДж/кг	ρ_1	1350	кг/м ³
$G_{вт}$	5,6	кг/с	ϑ_{11}	105	°С
$i_{вт}^n$	2734	кДж/кг	i_1	250	кДж/кг
$Q_{вс}$	0,013	м ³ /с	V	8	м ³
$\rho_{вс}$	1273	кг/м ³	$G_{п}$	5,6	кг/с
$i_{вс}$	271	кДж/кг	$i_{п}$	2734	кДж/кг
$V_{вс}$	50	м ³	Q_2	0,008	м ³ /с
$\vartheta_{вс}$	115	°С	i_2	330	кДж/кг
G_s	0,93	кг/с	$V_{п}$	4	м ³ /с
ϑ_s	40	°С			
Подсистема сжигания черного щелока в топке (PS3)					
x_{NaOH}	80		x_{Na_2S}	78	
x_{CO_2}	44		x_{H_2S}	34	
$x_{Na_2CO_3}$	106		x_C	24	
x_{H_2O}	18		$x_{Na_2SO_4^*}$	142	
Подсистема зеленого и белого щелока (PS6)					
F	133	м ²	ρ_{44}	0,16	кг/м ³
V	69,3	м ³	K_{44}	0,21	кг а.с.в./кг раствора
ρ_{42}	1040	кг/м ³	G_{42}	11,2	кг/с
ρ_{43}	1160	кг/м ³	G_{43}	13,2	кг/с
ρ_{431}	1000	кг/м ³	G_{44}	0,7	кг/с
ρ_{432}	4500	кг/м ³			

Используя значения параметров ТП подсистем СРК выполнен расчет коэффициентов дифференциальных уравнений по приведенным выше зависимостям (табл. 12).

Таблица 12

Коэффициенты дифференциальных уравнений подсистем СРК

Подсистема подготовки черного щелока к сжиганию (PS1)									
Коэффициент	$T_{\text{вс}}$	A	$K_{Q_{\text{вх}}}$	$K_{\rho_{\text{вх}}}$	$K_{i_{\text{вх}}}$	$K_{G_{\text{гп}}}$	$\Delta G_{\text{вт}}$		
Расчетное значение	3846,2	7,1	45370,4	1,6	6,3	283,8	349,5		
Коэффициент	$K_{Q_{\text{вс}}}$	$T_{\theta_{11}}$	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5		
Расчетное значение	89,7	1000	1039,6	0,1	1,5	7	0,1		
Коэффициент	a_6	a_7	a_8	$T_{\theta_2} = T_{G_{22}}$	A_1	B_1	K_1		
Расчетное значение	616,4	0,1	0,3	512,5	56,9	3214,3	5935,5		
Коэффициент	K_2	K_3	K_4	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}		
Расчетное значение	0,5	48,1	8125	0,96	0,01	0,01	0,01		
Подсистема сжигания черного щелока в топке (PS3)									
Коэффициент	$T_{Na_2CO_3}^{11}$	$k_{NaOH}^{\text{чщ}}$	$\tau_{NaOH}^{\text{чщ}}$	$T_{Na_2CO_3}^{12}$	$k_{Na_2S}^{\text{чщ}}$	$\tau_{Na_2S}^{\text{чщ}}$	$T_{Na_2S}^{41}$	$k_{Na_2SO_4}^{32}$	
Расчетное значение	1,1	1,3	1,4	1,0	1,4	1,4	2,5	0,6	
Коэффициент	$T_{CO_2}^{21}$	k_C^{21}	$k_{O_2}^{211}$	$T_{H_2O}^{212}$	$k_{H_2}^{\text{чщ}}$	$k_{O_2}^{212}$	$T_{SO_2}^{211}$	$k_{S_{\text{орг}}}^{\text{чщ}}$	$k_{O_2}^{215}$
Расчетное значение	0,27	2,0	1,38	0,89	1,89	2,13	0,5	2	1,5
Коэффициент	$T_{SO_2}^{212}$	$k_{H_2S}^{\text{окз}}$	$k_{O_2}^{214}$	$k_{H_2O}^{211}$	$T_{Na_2SO_4}^{\text{T}}$	k_{SO_2}	k_{O_2}	k_{CO_2}	$\tau_{Na_2CO_3}^{21}$
Расчетное значение	0,53	1,88	3,67	3,67	1,02	1	2	3	1,4
Подсистема зеленого и белого щелока (PS6)									
Коэффициент	$K_{11} = K_{12}$	K_{13}	K_{17}	K_{21}	K_{23}	K_{24}			
Расчетное значение	0,01	0,01	0,01	1,73	0,01	0,01			
Коэффициент	K_{25}	K_{26}	K_{27}	K_{28}					
Расчетное значение	0,01	0,01	0,01	0,09					

Заключение. Разработана многоуровневая линейная стационарная модель содоре-генерационного котлоагрегата, которая позволяет анализировать динамику подсистем и агрегата в целом – устойчивость режимов и влияние возмущений, обосновать необходимость автоматического поддержания требуемого качества процессов в окрестности выбранного режима.

Модели в символьном виде применимы к большинству подобных агрегатов технологического процесса производства сульфатной целлюлозы. Параметры полностью определенных моделей должны быть скорректированы по результатам обработки данных, относящихся к конкретному агрегату и режиму.

Направление дальнейших исследований связано с развитием методов анализа динамики сложных систем управления по моделям иерархической структуры, а также синтеза систем стабилизации режима и ослабления влияния возмущений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Липовков И.З.* Сжигание сульфатного щёлока. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 128 с.
2. *Непенин Ю.Н.* Технология целлюлозы: В 3 т. Т. 2. Производство сульфатной целлюлозы. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 600 с.
3. 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.
4. *Доронин В.А.* Автоматизация содорегенерационных агрегатов. – М.: Лесная промышленность, 1988. – 320 с.
5. *Сиваков В.П., Вураско А.В., Музыкантова В.И.* Регенерация химикатов и тепла в содорегенерационных котлоагрегатах. Устройство и диагностирование. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. – 140 с.
6. *Новикова А.И.* Технологические расчеты материального и теплового балансов содорегенерационного отдела завода сульфатной целлюлозы: учеб. пособие. – Ленинград: ЛТА, 1983. – 78 с.
7. *Житков В.В.* Исследование процесса сжигания черного щелока в топках содорегенерационных агрегатов впрыскивающего типа: дисс. ... канд. техн. наук. ВНИИБ. – Ленинград, 1973. – 230 с.
8. *Вьюков Б.Е.* Исследование процесса сжигания черных сульфатных щелоков для целей управления: дисс. ... канд. техн. наук: 05.21.03. Ленинградская лесотехническая академия. – Ленинград., 1974. – 142 с.
9. *Сморodin С.Н.* Исследование топочных процессов при сжигании сульфатного щелока в вихревой топке содорегенерационного котлоагрегата с целью повышения ее эффективности: специальность 05.14.04 "Промышленная теплоэнергетика": дисс. ... канд. техн. наук. – СПб., 2000. – 112 с. – EDN QDIMMN.
10. *Пожитков В.В.* Математическое моделирование процессов загрязнения поверхностей нагрева содорегенерационного агрегата сульфат-целлюлозного производства с целью оптимизации их работы: дисс. ... канд. техн. наук: 05.21.03. Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности. – Ленинград, 1989. – 217 с.
11. *Абдалла Исхаг Абдалла.* Разработка модели и системы управления производительностью процесса выпаривания щелоков сульфат-целлюлозного производства: специальность 05.21.03 "Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины": дисс. ... канд. техн. наук. – СПб., 2003. – 145 с. – EDN NMNLEL.
12. *Братищева А.В.* Очистка выбросов растворителя плава содорегенерационного котлоагрегата сульфатцеллюлозного производства в конденсаторе наклонного типа: специальность 05.21.03 "Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины": дисс. ... канд. техн. наук. – СПб., 2007. – 158 с. – EDN NOPQSD.
13. *Горьковой Е.В.* Диагностика состояния содорегенерационного котлоагрегата с целью повышения эффективности его работы: специальность 05.21.03 "Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины", 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)": дисс. ... канд. техн. наук. – СПб., 2012. – 159 с. – EDN QFUFDF.
14. Black Liquor Recovery Boiler Advisory Committee (BLRBAC). Recommended guidelines for personnel safety for black liquor recovery boilers. – Atlanta: BLRBAC, 2018. – 46 p. – URL: <https://blrbac.net/wp-content/uploads/2020/10/personnel-safety-april-2018.pdf> (дата обращения: 30.04.2025).
15. *Rämö J., Lappalainen J., Hiltunen Y., Järvinen M., Alopaeus V.* Solids content of black liquor measured by online time-domain NMR // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9, Issue 10. – Article 2169. – DOI: 10.3390/app9102169.
16. *Vakkilainen E.K., Hamaguchi M.* Evaluation of the energy efficiency improvement potential through back-end heat recovery in the Kraft recovery boiler // Energies. – 2021. – Vol. 14, Issue 6. – Article 1550. – DOI: 10.3390/en14061550.
17. *Paoliello F.* Corrosion damage and in-service inspection of retractable sootblower lances in recovery boilers // TAPPI Journal. – 2021. – Vol. 20, Issue 10. – P. 655-662. – DOI: 10.32964/tj20.10.655.
18. *Raju V., Engblom M., Rantala E., Enestam S., Mansikkasalo J.* Kraft recovery boiler operation with splash plate and/or beer can nozzles - a case study // TAPPI Journal. – 2021. – Vol. 20, Issue 10. – P. 625-636. – DOI: 10.32964/TJ20.10.625.
19. *Saari J., Kaikko J., Sermyagina E., Hamaguchi M., Cardoso M., Vakkilainen E., Haider M.* Recovery boiler back-end heat recovery // TAPPI Journal. – 2023. – Vol. 22, Issue 3. – P. 174-183. – DOI: 10.32964/tj22.3.174.
20. *Belisario A.B., Edberg A., Björk M., Almeida G.M., Vakkilainen E.K.* On the diagnosis of a fouling condition in a kraft recovery boiler: combining process knowledge and data-based insights // TAPPI Journal. – 2023. – Vol. 22, Issue 3. – P. 162-171. – DOI: 10.32964/tj22.3.162

21. *Rajan K., Berton P., Rogers R.D., Shamshina J.L.* Is Kraft pulping the future of biorefineries? A perspective on the sustainability of lignocellulosic product development // *Polymers*. – 2024. – Vol. 16, Issue 23. – Article 3438. – DOI: 10.3390/polym16233438
22. *Niemi J., Balint R., Engblom M., Lindberg D.* Modeling of temperature gradient-induced melt movement within kraft recovery boiler ash deposits // *Energy & Fuels*. – 2024. – Vol. 39, Issue 1. – P. 454-464. – DOI: 10.1021/acs.energyfuels.4c04516.
23. *Niemi J., Balint R., Engblom M., Lehmusto J., Lindberg D., Hupa L.* Equilibrium model approach to predict local chemical changes in recovery boiler deposits // *Energy*. – 2024. – Vol. 306. – Article 132507. – DOI: 10.1016/j.energy.2024.132507.
24. *Kayal B., Nasr Y., El Zakhem H., El Bachawati M.* Optimizing brown stock washing in the pulp and paper industry: a system dynamics approach // *Processes*. – 2025. – Vol. 13, Issue 2. – Article 368. – DOI: 10.3390/pr13020368.
25. *Вавилов А.А., Имаев Д.Х., Плескунин В.И., Фомин Б.Ф., Зальтцер Г., Зауер В., Станек В., Франк М., Фридрих В., Шаллер Я., Штремпель Х.* Имитационное моделирование производственных систем / под общ. ред. А.А. Вавилова. – М.: Машиностроение, 1983. – 416 с.
26. *Вавилов А.А., Имаев Д.Х.* Эволюционный синтез систем управления: учеб. пособие. – Л.: ЛЭТИ, 1983. – 80 с.
27. *Имаев Д.Х., Станиславски В.* Исследование динамики иерархических систем на примере парогенераторов. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2011. – 219 с. – ISBN 978-5-7629-1136-8. – EDN SCTSTX.

REFERENCES

1. *Lipovkov I.Z.* Szhiganie sul'fatnogo shcheloka [Combustion of sulfate liquor]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1979, 128 p.
2. *Nepenin Yu.N.* Tekhnologiya tsellyulozy: V 3 t. T. 2. Proizvodstvo sul'fatnoy tsellyulozy [Cellulose Technology: In 3 vol. Vol. 2. Production of sulfate cellulose]. Moscow: Lesn. prom-st', 1990, 600 p.
3. Tekhnologiya tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva. V 3 t. T. 3. Avtomatizatsiya, standartizatsiya, ekonomika i okhrana okruzhayushchey sredy v TSBP. Ch. 1. Avtomatizatsiya, standartizatsiya i ekonomika v TSBP [Pulp and paper production technology. In 3 volumes. Volume 3. Automation, standardization, economics and environmental protection in the pulp and paper industry. Part 1. Automation, standardization and economics in the pulp and paper industry]. Saint Petersburg: Politehnika, 2008, 621 p.
4. *Doronin V.A.* Avtomatizatsiya sodoregeneratsionnykh agregatov [Automation of sodium recovery units]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1988, 320 p.
5. *Sivakov V.P., Vurasko A.V., Muzykantova V.I.* Regeneratsiya khimikatov i tepla v sodoregeneratsionnykh kotloagregatakh. Ustroystvo i diagnostirovanie [Chemical and heat recovery in sodium recovery boiler units. Design and diagnostics]. Ekaterinburg: UGLTU, 2015, 140 p.
6. *Novikova A.I.* Tekhnologicheskie raschety material'nogo i teplovogo balansov sodoregeneratsionnogo otdela zavoda sul'fatnoy tsellyulozy: ucheb. posobie [Technological calculations of material and heat balances for the sodium recovery department of a sulphate pulp plant: a textbook]. Leningrad: LTA, 1983, 78 p.
7. *Zhitkov V.V.* Issledovanie protsessa szhiganiya chernogo shcheloka v topkakh sodoregeneratsionnykh agregatov vpryskivayushchego tipa: diss. ... kand. tekhn. nauk [Study of the black liquor combustion process in injection-type sodium recovery unit furnaces: cand. of eng. sc. diss.] VNIIB. Leningrad, 1973, 230 p.
8. *V'yukov B.E.* Issledovanie protsessa szhiganiya chernykh sul'fatnykh shchelokov dlya tseley upravleniya: diss. ... kand. tekhn. nauk [Study of the process of combustion of black sulfate liquors for control purposes: cand. of eng. sc. diss.]: 05.21.03. Leningrad Forest Engineering Academy. Leningrad, 1974, 142 p.
9. *Smorodin S.N.* Issledovanie topochnykh protsessov pri szhiganii sul'fatnogo shcheloka v vikhrevoy topke sodoregeneratsionnogo kotloagregata s tsel'yu povysheniya ee effektivnosti: spetsial'nost' 05.14.04 "Promyshlennaya teploenergetika": diss. ... kand. tekhn. nauk [Study of combustion processes during combustion of sulfate liquor in a vortex furnace of a soda recovery boiler unit in order to improve its efficiency: specialty 05.14.04 "Industrial heat power engineering": cand. of eng. sc. diss.]. Saint Petersburg, 2000, 112 p. EDN QDIMN.
10. *Pozhitkov V.V.* Matematicheskoe modelirovanie protsessov zagryazneniya poverkhnostey nagreva sodoregeneratsionnogo agregata sul'fat-tsellyuloznogo proizvodstva s tsel'yu optimizatsii ikh raboty: diss. ... kand. tekhn. nauk [Mathematical modeling of the processes of contamination of heating surfaces of a soda recovery unit in sulfate pulp production in order to optimize their operation: cand. of eng. sc. diss.]: 05.21.03. Leningrad Technological Institute of the Pulp and Paper Industry. Leningrad, 1989, 217 p.

11. Abdalla Iskhag Abdalla. Razrabotka modeli i sistemy upravleniya proizvoditel'nost'yu protsessa vyparivaniya shchelokov sul'fat-sellyuloznogo proizvodstva: spetsial'nost' 05.21.03 "Tekhnologiya i oborudovanie khimicheskoy pererabotki biomassy dereva; khimiya drevesiny": diss. ... kand. tekhn. nauk [Development of a model and performance control system for the evaporation process of sulphate pulp production liquors: specialty 05.21.03 "Technology and equipment for chemical processing of wood biomass; wood chemistry": cand. of eng. sc. diss.]. Saint Petersburg, 2003, 145 p. EDN NMNLEL.
12. Brattseva A.V. Ochistka vybrosov rastvoritelya plava sodoregeneratsionnogo kotloagregata sul'fat-sellyuloznogo proizvodstva v kondensatore naklonnogo tipa: spetsial'nost' 05.21.03 "Tekhnologiya i oborudovanie khimicheskoy pererabotki biomassy dereva; khimiya drevesiny": diss. ... kand. tekhn. nauk [Cleaning of solvent emissions from the melt of a soda recovery boiler unit of a sulphate cellulose plant in an inclined-type condenser: specialty 05.21.03 "Technology and equipment for chemical processing of wood biomass; wood chemistry": cand. of eng. sc. diss.]. Saint Petersburg, 2007, 158 p. EDN NOPQSD.
13. Gor'kovoy E.V. Diagnostika sostoyaniya sodoregeneratsionnogo kotloagregata s tsel'yu povysheniya effektivnosti ego raboty: spetsial'nost' 05.21.03 "Tekhnologiya i oborudovanie khimicheskoy pererabotki biomassy dereva; khimiya drevesiny", 05.13.06 "Avtomatizatsiya i upravlenie tekhnologicheskimi protsessami i proizvodstvami (po otraslyam)": diss. ... kand. tekhn. nauk [Diagnostics of the state of a soda recovery boiler unit in order to improve its operating efficiency: specialty 05.21.03 "Technology and equipment for chemical processing of wood biomass; wood chemistry", 05.13.06 "Automation and control of technological processes and production (by industry)": cand. of eng. sc. diss.]. Saint Petersburg, 2012, 159 p. EDN QFUFDF.
14. Black Liquor Recovery Boiler Advisory Committee (BLRBAC). Recommended guidelines for personnel safety for black liquor recovery boilers. Atlanta: BLRBAC, 2018, 46 p. Available at: <https://blrbac.net/wp-content/uploads/2020/10/personnel-safety-april-2018.pdf> (accessed 30 April 2025).
15. Rämö J., Lappalainen J., Hiltunen Y., Järvinen M., Alopaeus V. Solids content of black liquor measured by online time-domain NMR, *Applied Sciences*, 2019, Vol. 9, Issue 10, Article 2169. DOI: 10.3390/app9102169.
16. Vakkilainen E.K., Hamaguchi M. Evaluation of the energy efficiency improvement potential through back-end heat recovery in the Kraft recovery boiler, *Energies*, 2021, Vol. 14, Issue 6, Article 1550. DOI: 10.3390/en14061550.
17. Paoliello F. Corrosion damage and in-service inspection of retractable sootblower lances in recovery boilers, *TAPPI Journal*, 2021, Vol. 20, Issue 10, pp. 655-662. DOI: 10.32964/tj20.10.655.
18. Raju V., Engblom M., Rantala E., Enestam S., Mansikkasalo J. Kraft recovery boiler operation with splash plate and/or beer can nozzles - a case study, *TAPPI Journal*, 2021, Vol. 20, Issue 10, pp. 625-636. – DOI: 10.32964/TJ20.10.625.
19. Saari J., Kaikko J., Sermyagina E., Hamaguchi M., Cardoso M., Vakkilainen E., Haider M. Recovery boiler back-end heat recovery, *TAPPI Journal*, 2023, Vol. 22, Issue 3, pp. 174-183. DOI: 10.32964/tj22.3.174.
20. Belisario A.B., Edberg A., Björk M., Almeida G.M., Vakkilainen E.K. On the diagnosis of a fouling condition in a kraft recovery boiler: combining process knowledge and data-based insights, *TAPPI Journal*, 2023, Vol. 22, Issue 3, pp. 162-171. DOI: 10.32964/tj22.3.162
21. Rajan K., Berton P., Rogers R.D., Shamshina J.L. Is Kraft pulping the future of biorefineries? A perspective on the sustainability of lignocellulosic product development, *Polymers*, 2024, Vol. 16, Issue 23, Article 3438. DOI: 10.3390/polym16233438
22. Niemi J., Balint R., Engblom M., Lindberg D. Modeling of temperature gradient-induced melt movement within kraft recovery boiler ash deposits, *Energy & Fuels*, 2024, Vol. 39, Issue 1, pp. 454-464. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.4c04516.
23. Niemi J., Balint R., Engblom M., Lehmusto J., Lindberg D., Hupa L. Equilibrium model approach to predict local chemical changes in recovery boiler deposits, *Energy*, 2024, Vol. 306, Article 132507. DOI: 10.1016/j.energy.2024.132507.
24. Kayal B., Nasr Y., El Zakhem H., El Bachawati M. Optimizing brown stock washing in the pulp and paper industry: a system dynamics approach, *Processes*, 2025, Vol. 13, Issue 2, Article 368. DOI: 10.3390/pr13020368.
25. Vavilov A.A., Imaev D.X., Pleskunin V.I., Fomin B.F., Zal'tser G., Zauer V., Stanek V., Frank M., Fridrikh V., Shaller YA., Shtrempel' X. Imitatsionnoe modelirovanie proizvodstvennykh sistem [Simulation modeling of production systems], ed. by A.A. Vavilova. Moscow: Mashinostroyeniye, 1983, 416 p.
26. Vavilov A.A., Imaev D.Kh. Evolyutsionnyy sintez sistem upravleniya: ucheb. posobie [Evolutionary synthesis of control systems: a tutorial]. Leningrad: LETI, 1983, 80 p.
27. Imaev D.Kh., Stanislavski V. Issledovanie dinamiki ierarkhicheskikh sistem na primere parogeneratorov [Study of the Dynamics of Hierarchical Systems Using Steam Generators as an Example]. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy elektrotekhnicheskii universitet «LETI» im. V.I. Ul'yanova (Lenina), 2011, 219 p. ISBN 978-5-7629-1136-8. EDN SCTSTX.

Ковалёв Дмитрий Александрович – Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна; e-mail: d.a.kovalyov@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78127865366; к.т.н.; доцент; зав. кафедрой автоматизации технологических процессов и производств.

Имаев Дамир Хабибович – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина); e-mail: damir.imaev@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78122343798; д.т.н.; профессор кафедры автоматики и процессов управления.

Душин Сергей Евгеньевич – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина); e-mail: dushins@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78122343798; д.т.н.; профессор кафедры автоматики и процессов управления.

Kovalev Dmitrii Aleksandrovich – Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; e-mail: d.a.kovalyov@yandex.ru; Saint Petersburg Russia; phone: +78127865366; cand. of eng. sc.; associate professor; head of the Department of Automation of Technological Processes and Production.

Imaev Damir Habibovich – Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin); e-mail: damir.imaev@mail.ru; Saint Petersburg Russia; phone: +78122343798; dr. of eng. sc.; professor of the Department of Automation and Control Processes.

Dushin Sergey Evgenievich – Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin); e-mail: dushins@yandex.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +78122343798; dr. of eng. sc.; professor of the Department of Automation and Control Processes.

УДК 681.5

DOI 10.18522/2311-3103-2026-4-241-249

А.В. Мартиросян, Д.В. Ромашин

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ И СЕПАРАЦИИ ГАЗА

Представлена концепция адаптивного управления при разделении природного газа. Применяемые на практике системы управления, как правило, основаны на фиксированных алгоритмах регулирования и не учитывают динамическое изменение физико-технических и эксплуатационных параметров, что приводит к снижению качества сепарации и росту энергозатрат. В статье описан подход сочетания системного анализа и метод Парето. Целью работы является разработка концепции адаптивного управления процессом подготовки природного газа на основе системного анализа. Недавние исследования показывают, что методы, основанные на данных, позволяют более точно настраивать параметры, лучше реагировать на колебания исходного газа и повышать эффективность удаления примесей. Для достижения поставленной цели в работе решены задачи выявления и классификации факторов, влияющих на качество и экономичность сепарации газа, а также формирования их взаимосвязей в рамках единой концептуальной модели управления. Особое внимание уделяется влиянию точного контроля ключевых параметров, таких как давление, температура и расход, на эффективность этих процессов. Анализ последних исследований демонстрирует растущее использование нейронных сетей и моделей машинного обучения в очистке газа для прогнозирующего управления, обнаружения аномалий и оптимизации рабочих параметров. Сравнительная оценка классических ПИД-регуляторов, нечетких, адаптивных и нейронных методов управления подтверждает преимущества интеллектуального регулирования с точки зрения стабильности, адаптивности и энергоэффективности. Основным результатом работы является обоснование ключевых факторов, определяющих эффективность сепарации, среди которых наибольшее влияние оказывают давление, температура и расход газа. Полученная модель формирует методологическую основу для разработки интеллектуальных и адаптивных систем управления процессом подготовки газа.

Сепарация газа; очистка газов; адаптивное управление; нечеткая логика; нейронные сети; машинное обучение; оптимизация процессов; интеллектуальные системы; метод Парето.