

Моделирование и управление технологическими процессами сорегенерационного котлоагрегата

Д. А. Ковалёв

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,
Высшая школа технологии и энергетики

E-mail: d.a.kovalyov@yandex.ru

Аннотация. Эффективное моделирование и управление технологическими процессами сорегенерационного котлоагрегата представляют собой важные научно-прикладные задачи целлюлозно-бумажной промышленности, и имеют критически важное значение для повышения производительности, безопасности, снижения выбросов вредных веществ сорегенерационного котлоагрегата и обеспечения стабильной работы целлюлозного завода.

Ключевые слова: сорегенерационный котлоагрегат; технологические процессы; моделирование, управление, декомпозиция

I. ВВЕДЕНИЕ

На предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности широкое применение получили сорегенерационные котлоагрегаты (СРК) предназначенные для сжигания черного щелока в твердом состоянии.

СРК является ключевым элементом цикла регенерации щелоков (рис. 1) производства сульфатной целлюлозы [1-3]).

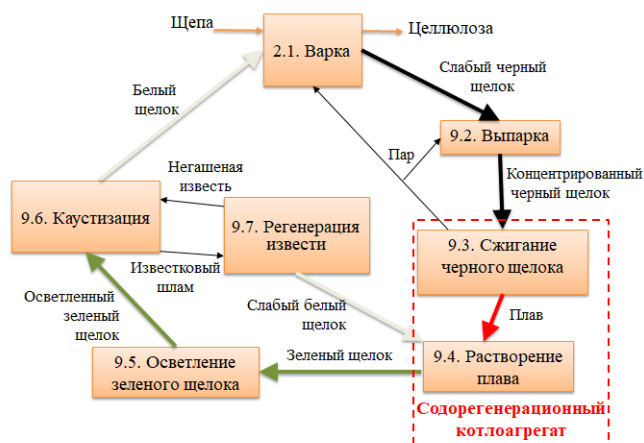


Рис. 1. Цикл регенерации щелоков производства сульфатной целлюлозы

Сжигание черного щелока в СРК осуществляют во взвешенном состоянии. При этом черный щелок с помощью механических форсунок разбрызгивается мелкими каплями в топочном пространстве СРК (рис. 2). Каждая капля в начале падения содержит три составляющие черного щелока: влагу, органику и минеральную часть.

При дальнейшем падении капли черного щелока подсушиваются поднимающимися вверх горячими газами, частично выжигается органика, и на под для

окончательного сжигания в слое попадает минеральная часть и оставшаяся часть органики.

Распыление черного щелока является одним из важных факторов, способствующих эффективному ведению процесса его сжигания и регенерации химикатов в СРК.

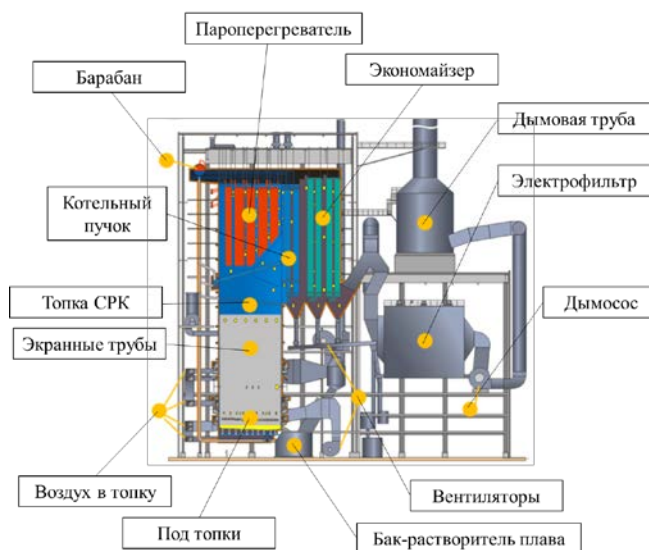


Рис. 2. Основные элементы СРК [1]

II. ДЕКОМПОЗИЦИЯ СРК И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПОДСИСТЕМ СРК

Современная концепция работы СРК независимо от технологических схем и конструктивных особенностей основывается на централизованном автоматическом контроле, регулировании и управлении, с помощью которых обеспечивается безопасность и высокая надежность эксплуатации СРК, экономичное производство тепловой энергии и эффективность регенерации химикатов, защита окружающей среды от загрязнения пылегазовыми выбросами и сточными водами [4-7].

Основным недостатком систем управления сорегенерационными агрегатами, применяемыми в настоящее время, является недостаточность и некомплексность информации о протекании процесса регенерации химикатов в СРК, а также отсутствие текущих значений таких главных технологических показателей, как степень восстановления сульфата натрия в сульфид, теплотехнический КПД, расход плава, сульфидность зеленого щелока, общее состояние процесса регенерации и экономических показателей в

виде текущих затрат на производство перегретого пара и зеленого щелока.

СРК является сложным объектом управления [1-7], функциональная схема которого приведена на рис. 3.

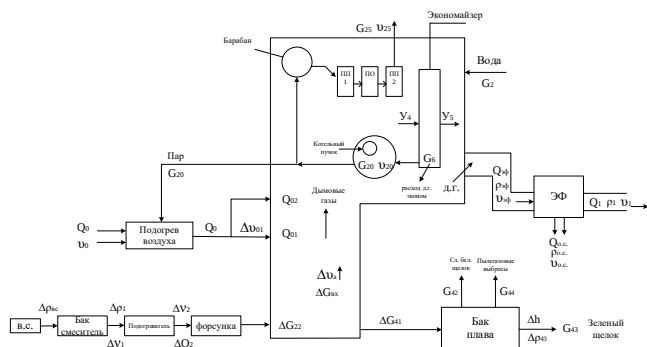


Рис. 1. Функциональная схема СРК

С учетом положений системного анализа выполнена декомпозиция СРК (по терминологии А. А. Вавилова – функционально-целевая декомпозиция [8-9]) на шесть подсистем [4] (рис. 4).

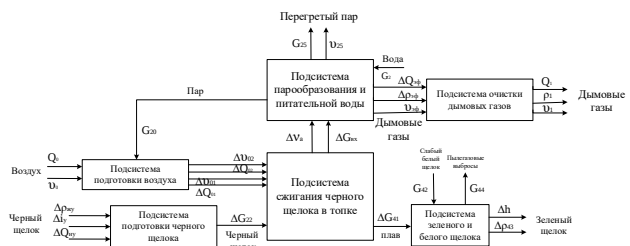


Рис. 2. Подсистемы управления СРК

Декомпозиция СРК, как сложного объекта управления, дает возможность:

- разделить сложный объект управления на управляемые части – подсистемы, что упрощает анализ, моделирование и управление;
- разработки системы мониторинга и диагностики параметров технологических процессов СРК. Каждую подсистему можно рассматривать отдельно, что позволяет более точно выявлять нештатные ситуации и прогнозировать возможность их возникновения;
- анализировать и оптимизировать работу каждой подсистемы отдельно, а также взаимодействие подсистем СРК между собой;
- разработки математических моделей и проведение компьютерного моделирования работы подсистем СРК, что в свою очередь позволит: прогнозировать работу СРК в различных режимах, оптимизировать параметры управления и выявлять возникновение нештатных ситуаций.

В результате выполненной декомпозиции для подсистем СРК выполнена разработка математических моделей.

В качестве примера приведем разработанную математическую модель подсистемы зеленого и белого щелока (рис. 5) в виде:

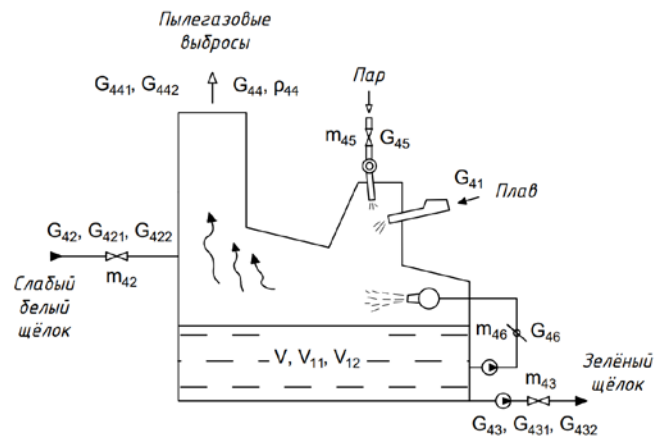


Рис. 3. Подсистема зеленого и белого щелока

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

$$\frac{d\rho_{43}}{dt} = -K_{21}\Delta Q_{42} - K_{23}\Delta Q_{44} + K_{24} - K_{25}\rho_{43} - K_{26}\rho_{44} + K_{27}\Delta G_{41} - K_{28}\Delta h \quad (1)$$

$$\text{где } K_{11} = K_{12} = \frac{1}{F}, \quad K_{13} = \frac{\rho_{44}[(1-K_{44})\rho_{432} + K_{44}\rho_{431}]}{\rho_{431}\rho_{432}F},$$

$$K_{17} = 1/(\rho_{432} * F), \quad K_{21} = (\rho_{43} - \rho_{42})/V,$$

$$K_{23} = \frac{\rho_{44}[-K_{44}\rho_{43}(\rho_{432} - \rho_{431}) + \rho_{432}(\rho_{43} - \rho_{431})]}{\rho_{431}\rho_{432} * V},$$

$$K_{24} = \frac{\rho_{43}Q_{42}}{\rho_{42} * V}, \quad K_{25} = \frac{Q_{43}}{V},$$

$$K_{26} = \frac{\rho_{43}\rho_{44}(\rho_{432} - \rho_{431}) * Q_{44}}{\rho_{431}\rho_{432} * V} * \left(\frac{\partial K_{44}}{\partial \rho_{44}}\right),$$

$$K_{27} = \frac{\rho_{432} - \rho_{43}}{\rho_{432} * V}, \quad K_{28} = \frac{Q_{43}}{V} * \left(\frac{\partial \rho_{43}}{\partial h}\right).$$

Разделив уравнения (1) на величину K_{25} и используя преобразования Лапласа, получим модель подсистемы зеленого и белого щелока СРК в операторной форме в виде:

$$\Delta h(p) = W_{11}(p) * \Delta Q_{42}(p) - W_{12}(p) * \Delta Q_{43}(p) - W_{13}(p) * \Delta Q_{44}(p) + W_{17}(p) * \Delta G_{41}(p),$$

$$\Delta \rho_{43}(p) = -W_{21}(p) * \Delta Q_{42}(p) - W_{23}(p) * \Delta Q_{44}(p) + W_{24}(p) * \Delta \rho_{42}(p) - W_{26}(p) * \Delta \rho_{44}(p) + W_{27}(p) * \Delta G_{41}(p) - W_{28}(p) * \Delta h(p), \quad (2)$$

$$\text{где } W_{11}(p) = \frac{K_{11}}{K_{25} * p * T_h}, \quad W_{12}(p) = \frac{K_{12}}{K_{25} * p * T_h},$$

$$W_{13}(p) = \frac{K_{13}}{K_{25} * p * T_h}, \quad W_{17}(p) = \frac{K_{17}}{K_{25} * p * T_h},$$

$$W_{21}(p) = \frac{K_{21}}{K_{25}(T_{\rho_{43}} * p + 1)}, \quad W_{23}(p) = \frac{K_{23}}{K_{25}(T_{\rho_{43}} * p + 1)},$$

$$W_{24}(p) = \frac{K_{24}}{K_{25}(T_{\rho_{43}} * p + 1)}, \quad W_{26}(p) = \frac{K_{26}}{K_{25}(T_{\rho_{43}} * p + 1)},$$

$$W_{27}(p) = \frac{K_{27}}{K_{25}(T_{\rho_{43}} * p + 1)}, \quad W_{28}(p) = \frac{K_{28}}{K_{25}(T_{\rho_{43}} * p + 1)},$$

$$T_{\rho_{43}} = \frac{1}{K_{25}}, \quad T_h = \frac{1}{K_{25}}.$$

Параметры, используемые в модели подсистемы зеленого и белого щелока, приведены в табл. 1.

Информационная структурная схема динамики подсистемы зеленого и белого щелока СРК для бака-растворителя плава СРК, построенная по уравнениям (2) приведена на рис. 6.

ТАБЛИЦА I. ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОДСИСТЕМЫ ЗЕЛЕННОГО И БЕЛОГО ЩЕЛОКА СРК

Условное обозначение	Параметр технологического процесса	Единица измерения
G_B	количество воды, находящееся в зелёном щёлоке бака-растворителя плава при номинальном значении уровня	кг
G_{421}	расход воды, поступающей в бак-растворитель плава со слабым белым щёлоком	кг/с
G_{431}	расход воды, отводимой из бака-растворителя плава с зелёным щёлоком	кг/с
G_{441}	расход воды, уносимой из бака-растворителя плава пылегазовыми выбросами в атмосферу	кг/с
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
V_{11}	объём воды в зелёном щёлоке бака-растворителя плава при номинальном значении уровня	м ³
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_a	количество абсолютно сухих веществ в зелёном щёлоке, находящемся в баке-растворителе плава при номинальном значении уровня	кг
G_{422}	расход абсолютно сухого вещества, поступающего в бак-растворитель плава со слабым белым щёлоком	кг/с
G_{41}	расход абсолютно сухого вещества, поступающего в бак-растворитель плава с потоком плава	кг/с
G_{432}	расход абсолютно сухого вещества, отводимого от бака-растворителя плава с зелёным щёлоком	кг/с
G_{442}	расход абсолютно сухого вещества зелёного щёлока, отводимого из бака-растворителя плава с пылегазовыми выбросами в атмосферу	кг/с
V_{12}	объём абсолютно сухого вещества в зелёном щёлоке, находящемся в баке-растворителе плава при номинальном значении уровня	м ³
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 растворителе плава при номинальном значении уровня	м ³

Для СРК выполнена аналогичная разработка математических моделей всех подсистем.

Для реализации разработанных математических моделей СРК использовалось компьютерное моделирование, которое дает возможность анализировать и оптимизировать работу каждой подсистемы отдельно, а также взаимодействие подсистем СРК между собой.

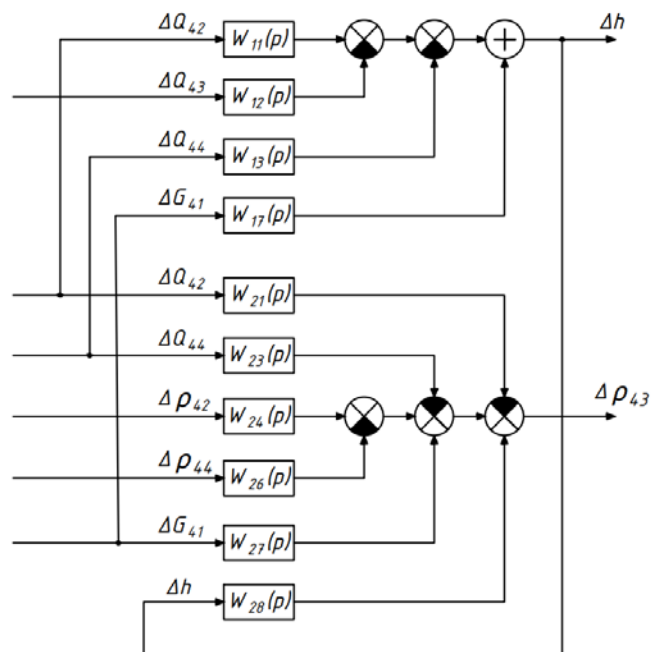


Рис. 4. Информационная структурная схема модели динамики подсистемы зеленого и белого щелока СРК

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной декомпозиции для СРК как сложного объекта управления было выделено шесть подсистем, для каждой из которых выполнена разработка математических моделей. Для реализации разработанных математических моделей СРК использовалось компьютерное моделирование, которое дает возможность анализировать и оптимизировать работу каждой подсистемы отдельно, а также взаимодействие подсистем СРК между собой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Содорегенерационные котлы: учеб. пособие. Приоритет 2030. Изд. Видеокурс ВШТЭ СПбГУПТД, 2022.
- [2] Доронин В.А. Автоматизация содорегенерационных агрегатов. - М.: Лесная промышленность, 1988. 320 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] 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
- [5] 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/TJ22.3.16
- [6] Jafarihonar, Farzad V., Hupa E. et al. Deposit sintering in modern Kraft recovery boilers – The role of NaOH? // Fuel. 2024. Vol. 371. 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.2024.1325
- [8] Вавилов А.А. Эволюционный синтез систем управления: Учеб. пособие / А. А. Вавилов, Д. Х. Имаев. Ленинград : ЛЭТИ, 1983. 80 с.
- [9] Вавилов А.А. Структурный и параметрический синтез сложных систем : Учеб. пособие. Ленинград : ЛЭТИ, 1979. 94 с.