

УДК 661.183

**В.Ф. Олонцев, Е.А. Фарберова,  
К.С. Белоусов, Е.А. Тиньгаева**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

## **ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВОМ АКТИВНОГО УГЛЯ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ**

*Данная работа посвящена разработке системы автоматического управления производством углеродных сорбентов. Проведен анализ существующих производств активных углей, показывающий, что в большинстве случаев они функционируют в неоптимальном режиме. Отмечена инерционность процессов термообработки материала на стадии производства гранулированных активных углей. По условиям технологических регламентов производств процессы на каждой стадии ориентированы на достижение показателей, значения которых определяются на основе оптимизации химико-технологических процессов. Процесс производства активного угля типа AP включает в себя сушку, карбонизацию и активацию предварительно отформованных угольно-смоляных гранул. В качестве исходного сырья используют чаще всего каменный уголь. Для стадии сушки выходным показателем является остаточная влажность материала, для стадии карбонизации – содержание летучих веществ в карбонизованном материале и его насыпная плотность, для стадии активации – перечень показателей готового продукта в соответствии с регламентом. Поставлена задача для процесса производства активированных углей разработать способ автоматического управления, который бы обеспечивал оптимальное или заданное значение технологических параметров, принятых в качестве технологической составляющей критерия оптимального управления. Предложено решить задачу оптимального управления производством углеродных сорбентов координацией оптимальных режимов отдельных технологических модулей и оптимальности условий реализации статических режимов производства с помощью метода математического моделирования.*

*Разработана система автоматического управления процессом производства активных углей в каскаде вращающихся печей, позволяющая добиться снижения общих затрат на производство угольных сорбентов. Использование модульного принципа компоновки ХТС даст возможность обеспечить выпуск продукта высокого качества.*

**Ключевые слова:** *производство угольных сорбентов, система управления производством, модульный принцип, вращающаяся печь, термообработка.*

**V.F. Olontsev, E.A. Farberova,  
K.S. Belousov, E.A. Tingaeva**

Perm National Research Polytechnic University,  
Perm, Russian Federation

## **OPTIMAL CONTROL OF THE PRODUCTION OF ACTIVATED CARBON ROTARY KILN**

*This work is devoted to the development of a system of automatic control of the production of carbon sorbents. The analysis of the existing production of activated carbons, showing that in most cases they operate in a suboptimal mode. Marked the inertia of the processes of heat treatment of the material during production of granular activated carbons. Under the terms of the technical regulations of production processes at each stage-oriented indicators, the values of which are determined on the basis of optimization of chemical processes. The production process of activated carbon type AR includes the drying, carbonization and activation of preformed carbon-resin pellets. As a source of raw materials use thicket just coal. For the drying phase, the output indicator is the residual moisture of the material for carbonation stage – the content of volatile matter in the carbonaceous material and its bulk density; for the stage of activation is the list of indicators of the finished product in accordance with the regulations. The task for the process of production of activated carbons to develop a method of automatic control, which can provide optimal or set value of process parameters, taken as a technological component of the criterion of optimal control. Proposed to solve the optimal control problem in the production of carbon sorbents for the coordination of optimum modes of individual process modules and the optimality conditions for the implementation of static modes of production using the method of mathematical modeling.*

*The system of automatic control of process of production of activated carbons in the cascade rotary kilns, allowing to reduce the total cost of production of coal sorbents. Using modular design principles CTS will enable it to produce a high quality product.*

**Keywords:** *production of coal sorbents, production management system, modular, rotary furnace, heat treatment.*

С позиций системного анализа производство углеродных сорбентов на каменноугольной основе по классификации [1] относится к многоассортиментным производствам с совмещенной ХТС, обладающей определенной технологической гибкостью. Технологические процессы по аппаратурным признакам имеют широкий диапазон допустимых интервалов варьирования режимных параметров, что дает возможность организовать выпуск различных марок продуктов при жесткой структуре системы, при этом оптимальные режимы работы всей химико-технологической системы могут быть нарушены при производстве отдельной марки продукта. Модульный принцип компоновки ХТС создаст определенную структурную гибкость в функционировании объекта управления и способствует решению задачи оптимального управления.

Анализ существующих производств активных углей [2–4] с учетом указанных особенностей позволяет сделать вывод, что в большинстве случаев ХТС работают в неоптимальном режиме. Осуществляется подвод тепла в систему извне, в то время как избыток тепла просто выбрасывается в атмосферу. При анализе связей между элементами системы следует отметить инерционность процессов термообработки материала на стадии производства гранулированных активных углей. Время нахождения материала во вращающихся печах составляет около 30 мин для стадий сушки и карбонизации, а для стадии активации до нескольких часов. Большая тепловая емкость объектов приводит к необходимости оптимизации статических режимов в производстве углеродных сорбентов. Существующие производства активных углей по своему аппаратурному оформлению зачастую не обеспечивают баланса по нагрузке между отдельными технологическими модулями в составе ХТС. Вследствие этого часто наблюдается дискретно-непрерывный режим работы производственной системы, цикличность которого зависит от наличия и объема буферных емкостей, а также от производительности отдельных аппаратов. Таким образом, задача оптимального управления производством углеродных сорбентов состоит в совместном решении задачи

структурно-параметрического синтеза ХТС и задачи оптимального управления статическими режимами системы с заданной структурой. Формулировка и методы решения общей задачи управления определяются выбором методов решения частных задач в соответствии с поставленной целью управления. Инструментом исследования ХТС являются методы математического моделирования [5–8].

Система управления производством включает в себя подсистемы автоматического управления стадий. Управление процессом сушки состоит главным образом в регулировании влажности термообрабатываемого материала по его температуре, изменению расхода топлива и изменению расхода воздуха на разбавление сушильного агента.

Автоматическое управление процессом карбонизации осуществляют на основе результатов математического моделирования процесса. По заданному значению содержания летучих веществ в карбонизованном материале и текущему значению загрузки исходного материала вычисляют значение температурного режима в печи карбонизации, который регулируют разбавлением топочных газов воздухом, а также перераспределением потока топочных газов. При превышении расчетной температуры корректируется величина загрузки материала в печь карбонизации. По изменению насыпной плотности материала в процессе его термообработки в печи оценивают степень карбонизации угольных гранул и определяют параметры температурного режима. Отклонение содержания летучих веществ в карбонизованном материале ведет к коррекции задания на изменение значения насыпной плотности угля. Способ автоматического управления процессом активации во вращающейся печи также реализован на основе анализа математической модели. Учитывая, что автоматически контролировать можно только насыпную плотность продукта, регулирование осуществляют по этому значению. При этом в выбранном оптимальном диапазоне, в соответствии с условием равномерного распределения обрабатываемого материала по длине барабана, регулируют температуру в печи и расход активирующего агента, который задан в соответствии с техническими условиями для производства определенных марок продукта. При выходе регулируемых значений температуры и расхода активирующего агента из границ диапазона регулирования изменяется частота вращения барабана, а также текущее значение загрузки исходного материала.

Согласно выбранной стратегии декомпозиционного управления на нижнем иерархическом уровне осуществляется автоматическая ста-

билизация оптимальных режимов работы аппаратов и производственных стадий. На следующем уровне решаются автономные задачи оптимизации технологических модулей, формулируются алгоритмы идентификации и адаптации математических моделей. Верхний уровень предназначен для координации оптимальных режимов отдельных технологических модулей как элементов сложной системы в соответствии с критерием оптимальности производства и условиями реализации статических режимов.

Система автоматического управления процессом производства активных углей в каскаде вращающихся печей предложена к внедрению на ОАО «Сорбент».

Процесс производства активного угля типа AP включает в себя сушку, карбонизацию и активацию предварительно отформованных угольно-смоляных гранул. Варианты аппаратурного оформления процесса и уровень автоматизации технологических стадий определяются производителем.

Сырье, в качестве которого чаще всего используют каменный уголь, измельчают, смешивают со связующим и гранулируют в прессовых аппаратах. Прессованные гранулы имеют невысокую прочность вследствие содержания в них влаги в пределах 12 % и более. Содержание летучих веществ в прессованном материале обычно стабильно и зависит от свойств исходных компонентов сырья. Далее выполняют термообработку прессованных гранул в три стадии. Остаточная влажность обработанных в барабанной прямоточной сушилке гранул не должна превышать 5 %. В этом случае гранулы приобретают достаточную прочность и становятся транспортабельными. В процессе сушки из гранул выделяется часть низкокипящих летучих веществ. Затем высушенные гранулы транспортируют на стадию карбонизации, где при температуре от 400 до 700 °С происходит удаление основной части летучих веществ и формирование пористой структуры адсорбента. Реакция идет с выделением тепла, которого достаточно для самообеспечения процесса. Излишки тепла в виде потока газовоздушной смеси с температурой 650–1000 °С утилизируют. Процесс карбонизации производят во вращающихся печах со встроенной ретортой, по которой движется обрабатываемый материал [9]. При нагреве материала из него выделяются летучие компоненты с соответствующей температурой кипения, которые поступают в топочную камеру, где происходит их сжигание и разбавление воздухом. Часть газов поступает противото-

ком в межретортное пространство для передачи тепла материалу через стенку внутренней реторты. Излишки тепла в виде дымовых газов выбрасывают в атмосферу. Процесс карбонизации характеризуется упрочнением гранул вследствие усадки, формированием их пористого каркаса. Остаточное содержание летучих не должно превышать 12 %.

Карбонизованные гранулы поступают на стадию окончательной термообработки при температуре 850–950 °С в среде активирующего агента, в качестве которого используется перегретый водяной пар. Активацию осуществляют во вращающихся печах. Нагрев материала до температуры активации производят дымовыми газами, образующимися от сгорания топлива в топочной камере, а также от сгорания выделяющихся из карбонизованного материала высококипящих летучих веществ. Материал и дымовые газы движутся прямококом через распределительное устройство под слой активирующего материала. Готовый продукт характеризуется по техническим условиям тремя качественными показателями: сорбционной активностью, насыпной плотностью, механической прочностью. В зависимости от соответствия этим показателям сорбент подразделяется на марки: АР-А, АР-Б, АР-В [10].

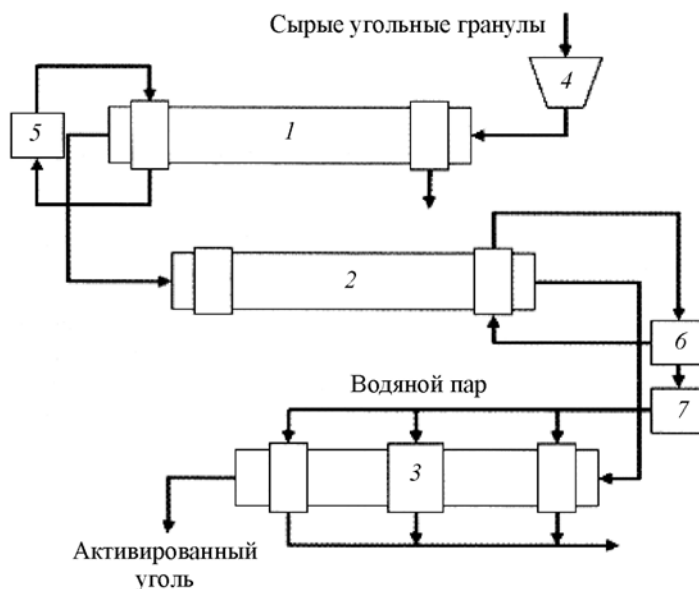


Рис. Технологическая схема производства активного угля в каскаде вращающихся печей: 1 – сушилка; 2 – печь карбонизации; 3 – печь активации; 4 – загрузочное устройство; 5 – топка сушилки; 6 – топка печи карбонизации; 7 – котел-утилизатор

Производство активных углей отличается большим ассортиментом выпускаемых сорбентов. В технологии их производства можно выделить упомянутые стадии термообработки в различном сочетании, поэтому при проектировании новых производств стадии термообработки оформляют в виде отдельных технологических модулей с соответствующим аппаратным исполнением. Схема промышленного получения активированных углей на каскаде вращающихся печей приведена на рисунке. Декомпозиционное управление сложным технологическим процессом производства активных углей позволит добиться снижения общих затрат на решение задачи, повысит надежность системы управления, предоставит возможность использования активных элементов в управлении подсистемами и учитывать интересы подсистем.

*В работе представлены результаты собственных исследований, выполненных в соответствии с Постановлением Правительства России № 218 от 09.04. 2010 г. «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичных производств».*

### **Список литературы**

1. Кафаров В.В., Макаров В.В. Гибкие автоматизированные производственные системы в химической промышленности. – М.: Химия, 1990. – 320 с.
2. Олонцев В.Ф. Российские активные угли. – Пермь: Мультиграф, 1995. – 90 с.
3. Кинле Х., Бадер Э. Активные угли и их промышленное применение. – Л.: Химия, 1984. – 215 с.
4. Углеродные адсорбенты и их применение в промышленности / И.А. Тарковская, В.Е. Гоба, А.Н. Томашевская. – М.: Наука, 1983. – 250 с.
5. Системный анализ процессов химической технологии / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, Э.М. Кольцова. – М.: Наука, 1988. – Т. 7. – 366 с.
6. Принципы математического моделирования химико-технологических систем / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин, В.Л. Перов. – М.: Химия, 1974. – 288 с.
7. Баласанов Г.Н. Моделирование и оптимизация в автоматизированных системах управления. – М.: Атомиздат, 1972. – 392 с.

8. Балакирев В.С., Володин В.М. Оптимальное управление процессами химической технологии. – М.: Химия, 1978. – 384 с.
9. Оборин Г.А. Автоматизация процесса производства активных углей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1991. – 20 с.
10. Активные угли России / В.М. Мухин, А.В. Тарасов, В.Н. Клущин. – М.: Metallurgiya, 2000. – 352 с.

### References

1. Kafarov V.V., Makarov V.V. Gibkie avtomatizirovannye proizvodstvennye sistemy v khimicheskoy promyshlennosti [Flexible automated production systems in the chemical industry]. Moscow: Khimiya, 1990. 320 p.
2. Olontsev V.F. Rossijskie aktivnye ugli [Russian active carbons]. Perm: Multigraf, 1995. 90 p.
3. Kinle H., Bader Je. Aktivnye ugli i ikh promyshlennoe primenenie [Active carbons and their industrial usage]. Leningrad: Khimiya, 1984. 215 p.
4. Tarkovskaya I.A., Goba V.E., Tomashevskaya A.N. Uglerodnye adsorbenty i ikh primenenie v promyshlennosti [Carbon adsorbents and their application in industry]. Moscow: Nauka, 1983. 250 p.
5. Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Koltsova E.M. Sistemnyj analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii [System analysis of processes of chemical technology]. Moscow: Nauka, 1988. Vol. 7. 366 p.
6. Kafarov V.V., Meshalkin V.P., Perov V.L. Printsipy matematicheskogo modelirovaniya khimiko-tekhnologicheskikh system [Principles of mathematical modeling of chemical engineering systems]. Moscow: Khimiya, 1974. 288 p.
7. Balasanov G.N. Modelirovanie i optimizatsiya v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya [Simulation and optimization in automated control systems]. Moscow: Atomizdat, 1972. 392 p.
8. Balakirev V.S., Volodin V.M. Optimalnoe upravlenie protsessami khimicheskoy tekhnologii [Optimal control of chemical engineering processes]. Moscow: Khimiya, 1978. 384 p.
9. Oborin G.A. Avtomatizatsiya protsessa proizvodstva aktivnykh uglej [Automation of the production process of activated carbons]. Abstract of the thesis of the candidate of technical sciences. Leningrad, 1991. 20 p.
10. Mukhin V.M., Tarasov A.V., Klushin V.N. Aktivnye ugli Rossii [Activated carbons Russia]. Moscow: Metallurgiya, 2000. 352 p.

Получено 29.04.2015



### **Об авторах**

**Олонцев Валентин Федорович** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29).

**Фарберова Елена Абрамовна** (Пермь, Россия) – кандидат химических наук, доцент кафедры химии и биотехнологии Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: elenafarb@gmail.com).

**Белосов Константин Сергеевич** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29).

**Тингаева Елена Александровна** (Пермь, Россия) – кандидат химических наук, доцент кафедры химии и биотехнологии Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: teengaeva@mail.ru).

### **About the authors**

**Valentin F. Olontsev** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Materials, Technologies and Construction Machines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, Russian Federation; e-mail: olontsevfv@gmail.com).

**Elena A. Farberova** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. of Chemical Sciences, Department of Chemistry Technology and Biotechnology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, Russian Federation; e-mail: elenafarb@gmail.com).

**Konstantin S. Belousov** (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Materials, Technologies and Construction Machines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, Russian Federation).

**Elena A. Tingaeva** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. of Chemical Sciences, Department of Chemistry Technology and Biotechnology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, Russian Federation; e-mail: teengaeva@mail.ru).