



Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

O. M. Protalinskiy, A. G. Kokuyev, Optimum control of process of manufacture of the corrugated cardboard, *Vestn. Astrakhan State Technical Univ. Ser. Management, Computer Sciences and Informatics*, 2009, Number 1, 105–110

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<http://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.174

March 19, 2025, 17:57:30



*О. М. Проталинский, А. Г. Кокуев*

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПРОИЗВОДСТВА ГОФРИРОВАННОГО КАРТОНА

Картонная и бумажная тара занимает ведущее место по потреблению в тароупаковочной отрасли – в среднем 40–50 % общего потребления. Несмотря на увеличивающиеся каждый год объемы производства гофрированного картона, спрос на него на российском рынке растет опережающими темпами.

Увеличение объемов изготовления гофрокартона происходит за счет строительства новых производственных мощностей, что требует крупных инвестиций, или за счет увеличения скорости главного привода агрегатов, что при нынешнем уровне автоматизации приводит к росту показателей брака. Необходимость повышения производительности путем увеличения скорости главного привода и снижения показателей брака, возрастающие требования потребителей к качеству упаковочного материала заставляют производителей всё больше внимания уделять вопросам автоматизации производства.

Управление процессом производства гофрированного картона является достаточно сложной задачей по целому ряду причин: технологический режим процесса определяется большим количеством режимных переменных; на процесс действуют существенные возмущающие воздействия, что требует частой перестройки технологических режимов и поиска оптимальных режимов управления.

В настоящее время автоматизированы лишь отдельные стадии процесса производства гофрокартона: поддержание температуры греющих узлов на заданном значении, натяжение полотна, регулирование скорости главного привода, расход клея, прижимное усилие. В целом задача оптимального управления гофроагрегатом остается нерешенной из-за отсутствия моделей, адекватно описывающих процесс производства гофрированного картона.

Для решения задачи управления процессом производства гофрокартона в качестве критерия оптимальности выбран технико-экономический показатель качества – себестоимость  $C$ , обобщенно учитывающий различные требования к качеству процесса производства гофрированного картона.

Таким образом, задача оптимального управления гофроагрегатом представляется следующим образом: при возмущающих воздействиях  $x$  и параметрах объекта  $a$  найти такую совокупность управляющих воздействий многостадийного процесса производства гофрированного картона  $u$ , которые при заданной производительности обеспечат минимум критерия оптимальности  $C$ :

$$C(u, a, x) \rightarrow \min$$

при  $u \in U$ ,  $a \in A$ , где  $U$  – замкнутое множество возможных управляющих воздействий;  $a$  – вектор параметров объекта;  $A$  – замкнутое множество значений вектора параметров.

В течение некоторого промежутка времени при постоянных значениях входных и управляющих координат выходные координаты также постоянны, что соответствует определенному статическому режиму. Основанием для изменения статического режима является изменение входных координат, являющихся возмущениями для технологического процесса производства гофрированного картона (изменение качества сырья при перезаправке агрегата). Экспериментальные исследования показали, что динамические режимы непродолжительны по времени и выводят переменные состояния объекта в новый статический режим [1].

Состав ограничений на векторы входных координат и возмущений  $g(x_1, \dots, x_n) \geq 0$ , а также на управляющие воздействия  $U_{\min} \leq u \leq U_{\max}$  были определены исходя из технологического регламента.

Задача оптимизации характеризуется следующими особенностями: критерий оптимальности задан алгоритмом вычисления, основанным на расчете состояния слоёв многокомпонентного материала, проходящего многостадийную обработку; модель объекта управления составлена на основе метода энергоинформационного моделирования [2, 3]; имеются ограничения типа неравенств.

После анализа технологического процесса производства гофрированного картона как объекта управления выделены три стадии процесса производства гофрированного картона: предварительная подготовка слоев двухслойного гофрированного картона (картона верхнего слоя (КВС) и бумаги для гофрирования (Б)); предварительная обработка двухслойного гофрированного картона (2 сл.) и подготовка картона нижнего слоя (КНС); окончательная обработка трехслойного гофрированного картона (3 сл.) (рис. 1).

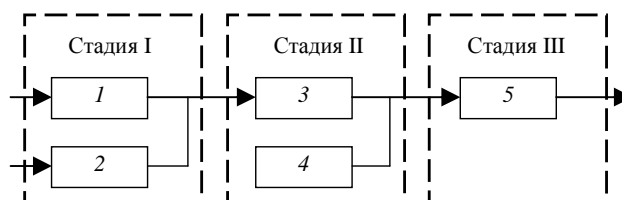


Рис. 1. Структурная схема многостадийного процесса производства гофрированного картона

Каждая стадия производства характеризуется координатами состояния и управления. При этом координаты состояния могут меняться в некотором диапазоне в зависимости от управления.

Для графической интерпретации зависимости многообразия координат от управлений удобнее применить диаграмму, представленную на рис. 2. На данной диаграмме за координату состояния принято тепловлажностное состояние обрабатываемого на текущей стадии компонента, определяемое его температурой  $T$  и влажностью  $W$ .

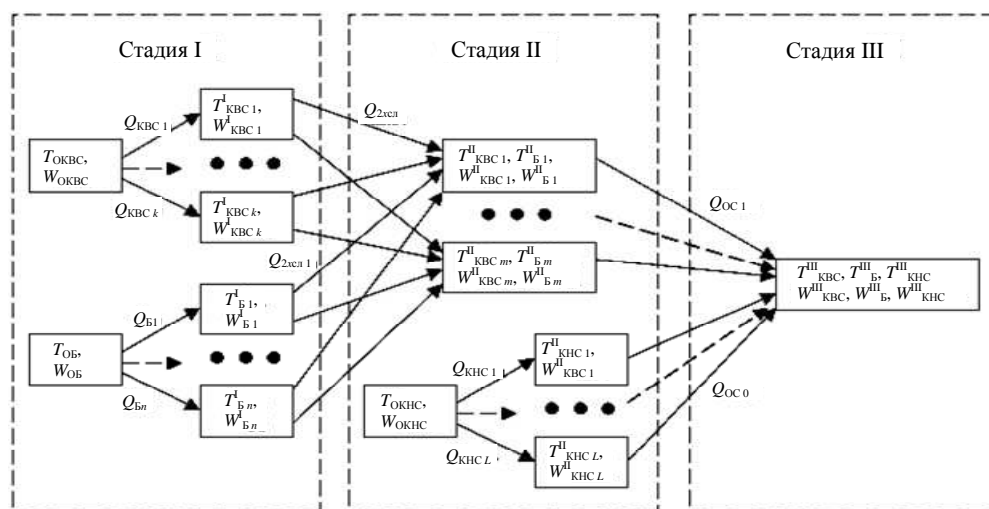


Рис. 2. Диаграмма процесса производства гофрированного картона

Для решения задачи оптимального управления многостадийным процессом использовался метод динамического программирования. Задача ставится с фиксированным начальным и конечным состояниями, направление поиска оптимального управления принимается с конца процесса.

На координаты состояния и управления накладываются ограничения типа неравенств.

Для каждой стадии сформирована функция Беллмана:

$$\begin{aligned}
 C_3 &= Q_3 \cdot C_{\text{тн}}; \\
 C_2 &= \min (Q_2 \cdot C_{\text{тн}} + C_3); \\
 C_1 &= \min (Q_1 \cdot C_{\text{тн}} + C_2),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $C_{\text{тн}}$  – себестоимость теплоносителя;  $Q_1, Q_2, Q_3$  – количество теплоносителя, затраченного на обработку компонентов гофрированного картона на первой, второй и третьей стадиях соответственно.

В результате решения задачи оптимизации определяется минимум целевой функции:

$$C = \min[Q_1 \cdot C_{\text{тн}} + \min(Q_2 \cdot C_{\text{тн}} + Q_3 \cdot C_{\text{тн}})] + C_0 + \mathcal{E} = \\ = C_{\text{тн}} \cdot \min[Q_1 + \min(Q_2 + Q_3)] + C_0 + \mathcal{E}, \quad (2)$$

где  $C_0$  – себестоимость сырья;  $\mathcal{E}$  – набор экономических показателей, не изменяющихся в зависимости от управления, текущего состояния и параметров объекта (налоги, амортизационные отчисления, фонд заработной платы и т. д.). Координаты  $C_{\text{тн}}$ ,  $C_0$  и  $\mathcal{E}$  являются постоянными для любого режима работы гофроагрегата, а значит, не влияют на положение экстремума целевой функции.

Таким образом, поиск оптимального режима ведения технологического процесса производства гофрированного картона сводится к отысканию такой совокупности управляющих воздействий, которая обеспечила бы минимум общих затрат теплоносителя:  $\min[Q_1 + \min(Q_2 + Q_3)]$ .

Исходная задача условной оптимизации сводится к задаче безусловной оптимизации путем введения штрафной функции в виде бесконечного барьера. Этот штраф предлагается использовать в виде

$$\Omega = 10^{20} \sum_{j \in J} |g_j(x)|,$$

где  $J$  – множество индексов нарушенных ограничений, т. е.  $g_i(x) < 0$  при  $j \in J$ .

При синтезе алгоритма решения задачи оптимального управления по энергоинформационным моделям предлагается использовать методы прямого поиска.

Сложность отыскания оптимального решения возникает из-за того, что процесс на отрезке, обусловленном заданными ограничениями, может иметь несколько локальных минимумов целевой функции. Таким образом, разрабатываемый алгоритм должен быть способным определить глобальный минимум.

Алгоритмы глобальной оптимизации, использующие модель глобального поведения функции, непригодны для решения задачи оптимального управления технологическим процессом производства гофрированного картона с использованием энергоинформационной модели, ввиду отсутствия модели глобального поведения целевой функции.

Для решения задачи предлагается воспользоваться идеей проведения локального спуска из многих начальных точек и выбора лучшего локального минимума в качестве решения.

Для этого предлагается алгоритм, представляющий собой комбинацию методов случайного мультистарта, конфигураций и просеивания.

Блок-схема алгоритма приведена на рис. 3.

Суть алгоритма состоит в следующем. В блоке 2 первоначально устанавливается начальный коэффициент шага  $K_{\text{ш}}$ , параметр окончания поиска  $\varepsilon$  и начальная величина шага  $t$ , при этом соблюдается неравенство  $\varepsilon > 0$ . После этого в блоке 3 осуществляется сброс величины шага к начальному значению и вызов подпрограммы выбора случайной начальной точки  $Q_1^{(0)}$ , которая принимается в качестве начальной базовой  $Q_1^6$ . Из этой точки в блоке 4 проводится исследующий поиск путем вызова соответствующей подпрограммы, при этом с помощью поискового алгоритма вычисляется  $\min(Q_2 + Q_3)$  и соответствующее ему значение целевой функции.

В качестве множества направлений поиска выбирается множество направлений изменения  $Q_1$ . Шаг делается в сторону увеличения этой переменной. Если значение функции в пробной точке меньше значения функции в исходной точке, шаг считается удачным. В противном случае необходимо вернуться в предыдущую точку и сделать шаг в противоположном направлении с последующей проверкой поведения функции.

Полученная точка называется новой базовой точкой. В случае успешного поиска блок 5 передает управление блоку 6, осуществляющему подпрограмму поиска по образцу. Поиск по образцу заключается в движении по направлению от начальной базовой точки к новой. После окончания поиска по образцу и выбора точки  $Q_1$ , соответствующей минимальному значению целевой функции, которая принимается в качестве новой базовой точки  $Q_1^6$ , происходит возврат на блок 4 и повторение исследующего поиска.

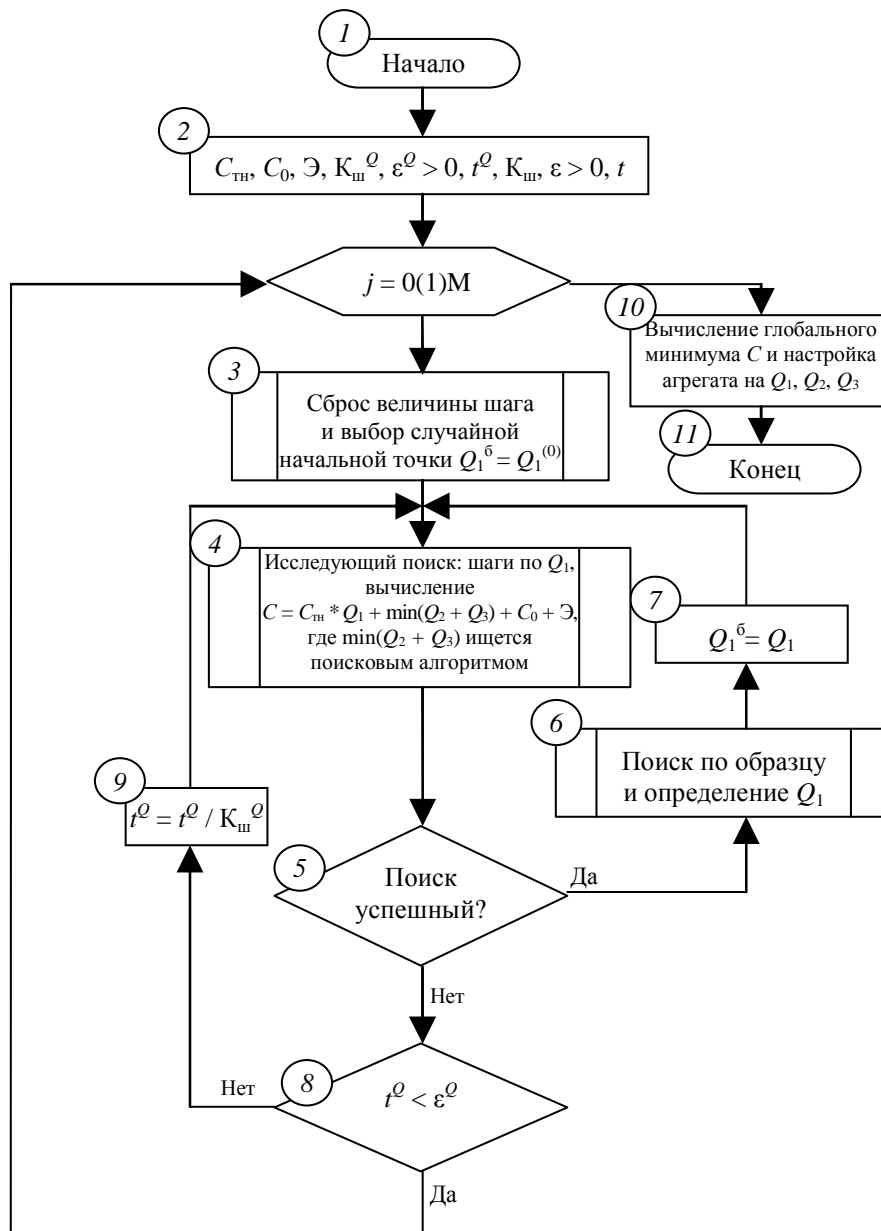


Рис. 3. Блок-схема алгоритма поиска оптимума

При неудачном исследующем поиске (блок 5), управление передается блоку 8. В этом блоке проверяется условие окончания поиска  $t < \varepsilon$ . Если оно соблюдается, то алгоритм завершает текущий исследующий поиск, в противном случае происходит уменьшение шага (блок 9). Далее происходит переход на новый исследующий поиск. Алгоритм повторяется в цикле  $N$  раз, после чего в качестве глобального оптимума из всех найденных локальных минимумов принимается локальный минимум с минимальным значением целевой функции (блок 10).

Особенностью предложенного алгоритма является возможность поиска глобального минимума целевой функции. Следует отметить, что вероятность нахождения глобального минимума целевой функции зависит от количества циклов поиска и алгоритма выбора случайной начальной точки.

В результате работы алгоритма получена совокупность управляющих воздействий, приводящих процесс к заданному критерию качества при минимальных общих затратах теплоносителя. Минимум затрат теплоносителя обеспечивает минимум критерия оптимальности  $C$  (табл.).

Расчетные значения управляющих воздействий

Набор сырья	$Q_1$ , кг/ч	$Q_2$ , кг/ч	$Q_3$ , кг/ч	$Q_{общ}$ , кг/ч	$C, p$
$m_{КНС} = 175 \text{ кг/м}^2$ $m_B = 125 \text{ кг/м}^2$ $m_{КВС} = 175 \text{ кг/м}^2$	1 667,1	1 207,17	1 899,03	4 773,3	5,54
$m_{КНС} = 175 \text{ кг/м}^2$ $m_B = 125 \text{ кг/м}^2$ $m_{КВС} = 150 \text{ кг/м}^2$	1 592,1	1 191,37	1 949,06	4 732,53	5,53
$m_{КНС} = 150 \text{ кг/м}^2$ $m_B = 115 \text{ кг/м}^2$ $m_{КВС} = 150 \text{ кг/м}^2$	1 608,47	1 201,45	1 799,14	4 609,06	5,51

Эффективность управления агрегатом с использованием разработанных алгоритмов проверялась с помощью метода имитационного моделирования.

Объект представлен разработанной энергоинформационной моделью процесса производства гофрокартона. Причинами нарушения оптимальности статического режима ведения процесса являются изменения возмущающих воздействий, входящих в данную модель. Для моделирования возмущающих воздействий используется блок их формирования – генератор случайных чисел.

Имитационное моделирование позволило дать сравнительную оценку значений целевой функции при рассчитанном оптимальном и рекомендуемом режимах.

Для расчетов принятого критерия оптимальности за основу была взята линия по производству гофрированного картона ЛГКП.

В качестве возмущений были заданы следующие наборы сырья 1:  $m_{КНС} = 175 \text{ кг/м}^2$ ,  $m_B = 125 \text{ кг/м}^2$ ,  $m_{КВС} = 175 \text{ кг/м}^2$ ; 2:  $m_{КНС} = 175 \text{ кг/м}^2$ ,  $m_B = 125 \text{ кг/м}^2$ ,  $m_{КВС} = 150 \text{ кг/м}^2$ ; 3:  $m_{КНС} = 150 \text{ кг/м}^2$ ,  $m_B = 115 \text{ кг/м}^2$ ,  $m_{КВС} = 150 \text{ кг/м}^2$  (рис. 4, 5).

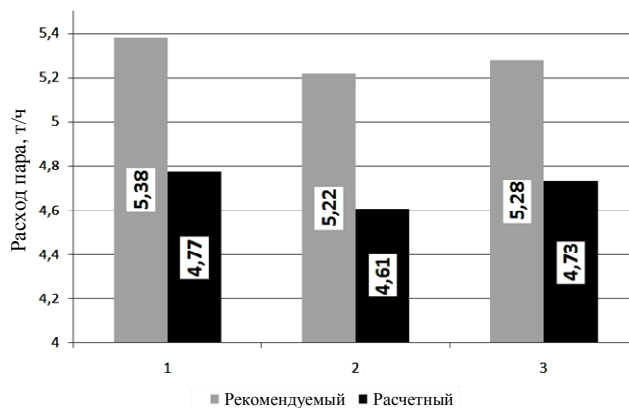


Рис. 4. Общие затраты теплоносителя для рекомендуемого и расчетного режимов работы агрегата

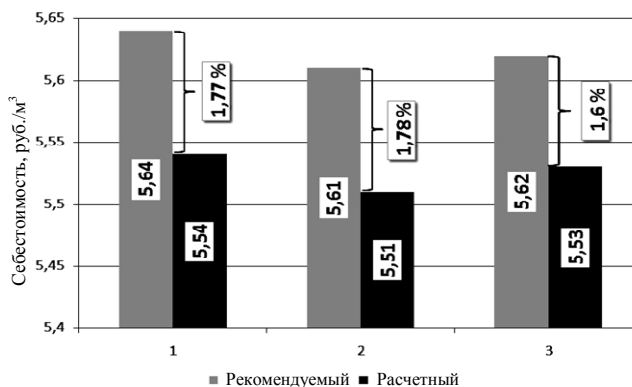


Рис. 5. Себестоимость 1 м<sup>2</sup> гофрированного картона для рекомендуемого и расчетного режимов работы агрегата

Полученные результаты подтверждают эффективность управления агрегатом на основе предложенных алгоритмов. Уменьшение расхода теплоносителя при оптимальном управлении, по сравнению с рекомендуемым набором управляющих воздействий, составляет до 11,34 %, что соответствует снижению себестоимости на 1,78 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анализ* технологического процесса, конструкции оборудования и системы управления производства гофрокартона с целью создания автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) высокопроизводительных гофроагрегатов. Выдача рекомендаций: Отчёт / НИИЦмаш; рук. темы В. В. Вакулин; Тема 0455-80-20; № ГР 80042155; Инв. № 523. – Петрозаводск, 1981. – С. 71.
2. *Кокуев А. Г.* Информационно-управляющая система расчетного прогнозирования предварительной тепловлажностной обработки слоёв гофрокартона // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2007. – № 9. – С. 144–146.
3. *Прохватилова Л. И., Кокуев А. Г.* Энергоинформационное моделирование процесса тепловлажностной обработки гофрированного картона // Сб-к тр. Междунар. науч. конф. «ММТТ–21». – Саратов: Изд-во СГТУ, 2008. – С. 163–165.

Статья поступила в редакцию 14.01.2009

#### OPTIMUM CONTROL OF PROCESS OF MANUFACTURE OF THE CORRUGATED CARDBOARD

*O. M. Protalinskiy, A. G. Kokuyev*

For the decision of the problem of optimum control of the multiphase process, the model of which is made on the basis of the method of power information modeling, the method of dynamic programming has been used. The idea of carrying out of local descent from many index points has been realized and the choice of the best local minimum as the decision (a combination of methods of casual multistart, configurations and sifting) has been made. As a result of the algorithm work a set of the operating influences, bringing the process to the set criterion of quality is received. The management efficiency with the use of the developed algorithms has been checked by means of the method of imitating modeling.

**Key words:** power information modeling, optimum control, multiphase process, the corrugated cardboard.