

ОПТИМИЗАЦИЯ ФАЗОВЫХ ТРАЕКТОРИЙ ПРОЦЕССА СУШКИ ГРАНУЛИРОВАННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

И. С. Конох, Н. В. Рылова

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: kis_saue@mail.ru

Описана технологическая установка сушки гранулированного технического углерода и существующие проблемы автоматического регулирования влажности выходного продукта. Описана используемая вычислительная модель объекта управления для идентификации загрузки сушильного барабана, температуры и влажности гранулированного углерода в отдельных зонах. Выполнена аппроксимация переходной характеристики изменения влажности продукта динамическим звеном второго порядка. Предложен критерий оптимальности изменения влажности продукта. Дается формальная постановка задачи оптимизации фазовой траектории изменения влажности в функции длины барабана с учетом уравнения движения объекта. Проведена оптимизация траектории с учетом граничных условий с помощью уравнений Эйлера-Пуассона и множителей Лагранжа. Визуализированы варианты решений с учетом дополнительных технологических ограничений.

Ключевые слова: технический углерод, оптимизация, процесс сушки, метод Эйлера-Лагранжа.

ОПТИМІЗАЦІЯ ФАЗОВИХ ТРАЄКТОРІЙ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ГРАНУЛЬОВАНОГО ТЕХНІЧНОГО ВУГЛЕЦЮ

І. С. Конох, Н. В. Рилова

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: kis_saue@mail.ru

Робота стосується питань підвищення ефективності технологічного процесу сушіння гранульованого технічного вуглецю за рахунок визначення оптимізованої фазової траєкторії зміни вологості продукту при проходженні через сушильний барабан. Визначення оптимальної фазової траєкторії забезпечує впровадження удосконаленого методу автоматичного керування технологічними установками даного типу. В роботі використано аппроксимацию експериментальних даних типовою динамічною ланкою другого порядку. Застосовано метод умовної оптимізації траєкторій у фазовому просторі за допомогою рівняння Ейлера-Пуассона з множником Лагранжа. Диференціальне рівняння, що описує залежність зміни вологості від витрат палива виступає в якості обмежень на результати оптимізації. Виконано пошук рівняння оптимальної фазової траєкторії аналітичним методом в загальній формі в функції часу та в функції довжини барабана з урахуванням його поточної кутової швидкості обертання. Ґрунтуючись на даних натурних експериментах знайдено бажану залежність вологості вуглецю наприкінці кожної умовної ділянки сушильного барабана з урахуванням змінної швидкості переміщення продукту і просторового розміщення топкових пальників. Вперше отримано оптимальну траєкторію зміни вологості продукту по довжині модернізованого барабана БС-40 в умовах Кременчуцького заводу технічного вуглецю, що дозволяє реалізувати удосконалений метод автоматичного керування технологічним процесом і виключити вихід вологості продукту за межі 0,2 – 0,9 %.

Ключові слова: технічний вуглець, оптимізація, процес сушіння, метод Ейлера-Лагранжа.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Технический углерод (carbon black – англ.) является тонкодисперсным, порошкообразным продуктом с содержанием углерода около 99 %. Это важный сырьевой компонент, который применяется в химической промышленности как укрепляющее в производстве резин и пластических масс. Большая часть производимого техуглерода используется в производстве автомобильных шин и резинотехнических изделий. Остальное количество находит применение как компонент, придающий пластмассам специальные свойства и в качестве пигмента в лакокрасочной, полимерной и электрохимической промышленности. Объем суточного производства технического углерода на ПАО «Кременчугский завод технического углерода» составляет примерно 320 тонн. Производимый техуглерод может соответствовать различным маркам, которые отличаются адсорбирующими свойствами, значением pH, зольностью, содержанием серы, прочностью гранул, насыпной плотностью, содержанием пыли.

ПАО «КЗТУ» производит 11 марок технического углерода в соответствии с требованиями между-

народного стандарта ASTM D 1765: N772, N660, N650, N550, N326, N330, N339, N347, N375, N220, N234.

Технологический процесс получения технического углерода включает в себя следующие этапы производства:

- процесс приготовления сырьевой смеси и подача её в производство;
- процесс получения технического углерода в химических реакторах;
- процесс улавливания технического углерода и транспортировка в участок обработки;
- процесс влажного гранулирования и сушки технического углерода;
- процесс упаковки технического углерода.

Отгрузка технического углерода производится насыпью, в вагонах-хопперах, полипропиленовых контейнерах типа биг-бэг, полиэтиленовых мешках.

Для обеспечения транспортировки продукции потребителям без упаковки в специальную тару, произведенный техуглерод необходимо гранулировать. Грануляция осуществляется путем смешива-

ния мелкодисперсного углеродного порошка с подогретым водно-мелассовым раствором в роторном грануляторе. После гранулы техуглерода нуждаются в сушке для удаления лишней влаги и приобретения нужных физических свойств. Таким образом, технологический процесс сушки гранулированного технического углерода является конечным этапом его производства перед отправкой потребителям [1]. Следует отметить, что сушка является энергоемким процессом, который значительно влияет на качество выходного продукта. Процесс сушки осуществляется в модифицированных барабанных печах, которые работают в очень напряженном режиме с перегрузкой в 30 – 40%.

В настоящее время отсутствует возможность прямых измерений температуры и влажности гранулированного углерода, продвигающегося по барабану от загрузочного торца к выгрузке. Процесс сушки характеризуется нелинейной кинетической зависимостью и изменяющейся массой материала на различных участках барабана, что затрудняет управление процессом и снижает точность стабилизации влажности выходного продукта.

Целью работы является повышение эффективности сушки гранулированного технического углерода за счет определения оптимизированной фазовой траектории изменения влажности продукта при прохождении через сушильный барабан.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Характеристика объекта и факторы, затрудняющие автоматическое управление. На

предприятии технический углерод производится в специальных реакторах и в виде мелкодисперсного порошка после улавливания по пневмопроводу поступает в отделение обработки для грануляции и сушки. Из основного бункера-накопителя через шлюзовую затвор высокодисперсный углерод поступает в смеситель-гранулятор. Влажные гранулы (51–52 %) попадают сразу в сушильный барабан, представляющий собой специально футерованную топку с вращающимся стальным цилиндром, внутри которого, пересыпаясь по лоткам, перемещается техуглерод. Сушильный барабан имеет длину 18 м и является основным элементом технологической линии, в котором непосредственно проходят процессы нагрева и сушки гранулированного технического углерода. Барабан обогревается газовыми и жидкотопливными горелками, сгруппированными в условные три зоны сушки. Дополнительно в середину барабана подаются продукты горения аксиальной газовой горелки, охлажденные сжатым воздухом до температуры 600–800 °С. Барабан вращается со скоростью 2,0–3,6 об/мин. Управление и стабилизация скорости, контроль токовой нагрузки обеспечивается частотно-управляемым автоматизированным электроприводом [1, 2]. Схема сушильного барабана, расположение горелок и точек контроля температуры приведена на рис. 1. Внутри барабана в конце третьей условной зоны установлена диафрагма, обеспечивающая задержку продвижения продукта.

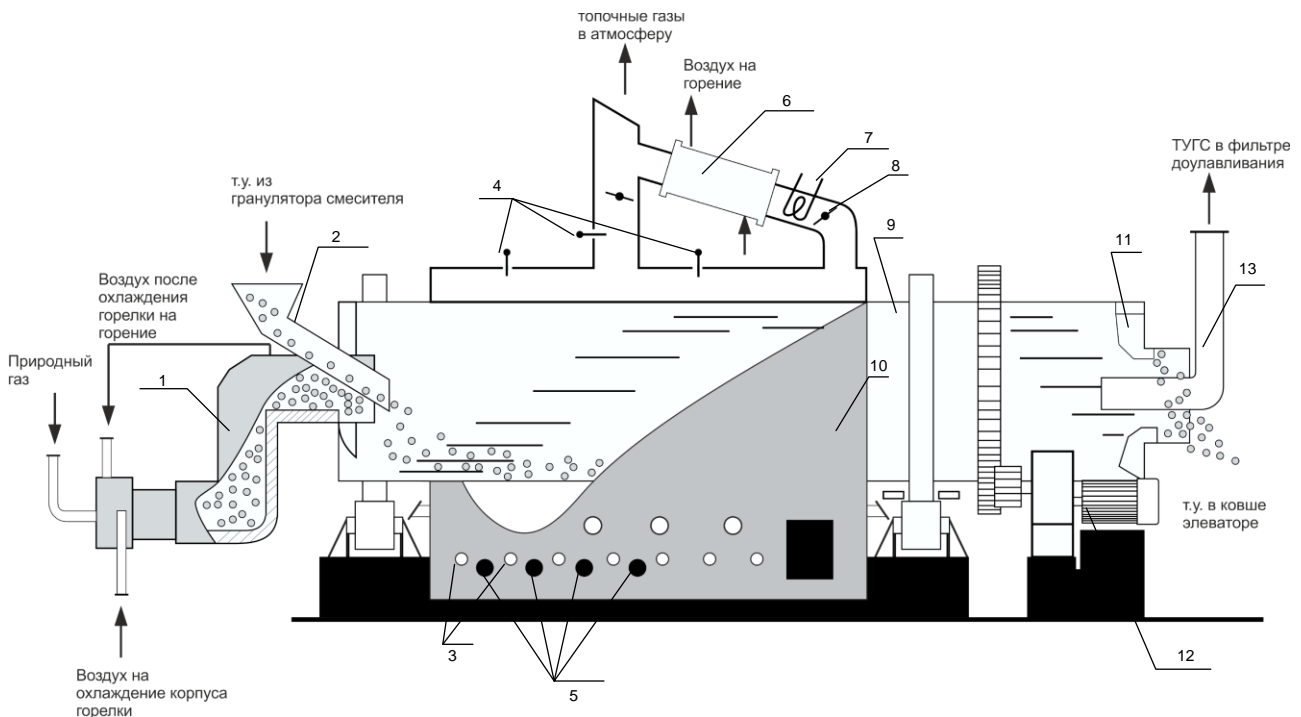


Рисунок 1 – Технологическая установка – сушильный барабан: 1 – газы аксиальной горелки, 2 – загрузочный патрубкок влажного техуглерода, 3 – газовые горелки, 4 – термодары контроля топочных газов, 5 – жидкотопливные горелки, 6 – теплообменник подогрева воздуха на горение, 7 – теплообменник воздуха на распыл, 8 – регулирующая задвижка, 9 – сушильный барабан, 10 – топочная камера, 11 – ковши выгрузки сухого техуглерода, 12 – моторно-редукторная группа, 13 – патрубкок выхода ТУГС

Допустимая продуктивность аксиальной горелки находится в очень узком диапазоне, выбирается исключительно из загрузки барабана и не меняется в процессе оперативного управления.

Основные факторы, затрудняющие реализацию качественной автоматической стабилизации влажности выходного продукта в диапазоне 0,2 – 0,9 % обусловлены невозможностью прямых измерений температуры и влажности техуглерода, наличием большой транспортной задержки по входам и выходам объекта управления, отсутствием прямой связи между производительностью горелок и характеристиками выходного продукта. Таким образом, построение классических замкнутых контуров регули-

рования с ПИД-контроллерами невозможно [3].

Средствами не прямых измерений на основе доступных технологических сигналов и вычислительных моделей процессов возможна идентификация влажности продукта в каждой условной зоне барабана. Если определена оптимальная фазовая траектория изменения влажности условной порции продукта, то на основе вычисленных отклонений текущих значений влажности от желаемых, можно рассчитать управляющие воздействия на горелки каждой зоны. Предложенный принцип иллюстрирует рис. 2.



Рисунок 2 – Диаграмма изменения влажности по зонам барабана

Объем порции продукта определяется исходя из интегрального расхода гранулированного техуглерода из гранулятора в барабан и угловой скорости барабана.

Эффективная требуемая продуктивность топочных горелок заранее не известна, но может быть определена в соответствии с алгоритмом ПИД-регулирования для каждой зоны в процессе компенсации рассогласования между желаемым и текущим значениями влажности. Исходя из вышесказанного, задача определения оптимального закона изменения влажности продукта в функции длины барабана является ключевой для реализации оптимального автоматического управления.

На каждом участке от имеющейся в техуглероде массы воды отнимается рассчитанное количество испаренной влаги с учетом следующих факторов [4]:

- массы условной порции техуглерода на текущем участке;
- начальной температуры влажного техуглерода и температуры внутренней паро-газовой смеси;
- количества переданных техуглероду калорий от аксиальной горелки;
- количества переданных техуглероду калорий от топочных горелок с учетом взаимного пространственного расположения;
- времени нахождения продукта на данном участке;
- текущей влажности порции техуглерода и определяемых ею кинетических зависимостей.

Вид кинетической диаграммы процесса сушки приведен на рис. 3. Экспериментально установлены следующие закономерности [1, 4, 5]:

- на первом этапе скорость сушки постоянна и максимальна, это связано с удалением поверхностной влаги гранул (участок 1 на рис. 3);
- температура достигает 100 °С и практически не меняется (кривые 3, 4), так как все тепло расходуется на испарение влаги;
- второй этап начинается при достижении критического значения влажности – $U_{кр}$, который характеризуется удалением влаги из внутренних слоев гранул за счет ее диффузионного перемещения на поверхность и испарения; скорость сушки убывает по мере испарения влаги (участок 2);
- температура материала на втором этапе начинает расти (участок 5 – на поверхности гранул, участок 6 – в середине гранул);
- граница этапов (точка С на характеристике) зависит от марки углерода и физических характеристик гранул; критическое значение влажности $U_{кр}$ варьируется в диапазоне 5 – 17 %.

Аппроксимация переходных процессов. Основной фазовой переменной процесса является влажность. Так как время перемещения техуглерода является известным и известны начальная (U_1) и конечная влажность (U_2), то можно отнести данную задачу к задачам с закрепленными концами. Если динамические свойства объекта

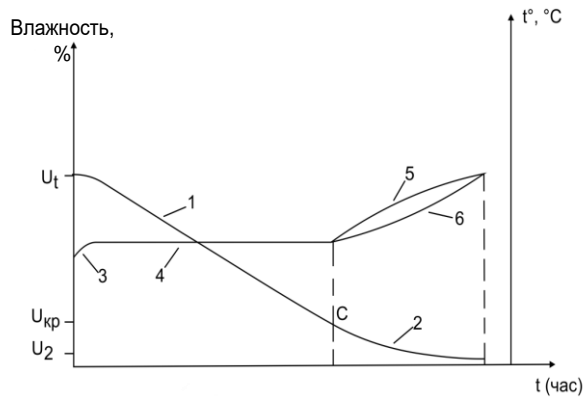


Рисунок 3 – Диаграмма процесса сушки технического углерода

управления определены через линейное дифференциальное уравнение, отсутствуют ограничения на управляющие воздействия и задан критерий качества как функция управляемой переменной (y) и управляющего воздействия (u) вида:

$$I = \int_{t_0}^{t_k} F(y, \dot{y}, u) dt' \quad (1)$$

то данную задачу можно решать методом Эйлера-Лагранжа.

Следующим шагом является идентификация реакции объекта через переходной процесс, соответствующий линейному дифференциальному уравнению или передаточной функции.

В работе [3] описана модель процесса сушки в сушильном барабане БС-40, которая позволила идентифицировать влажность и температуру продукта для типовых режимов работы. Результаты идентификации приведены в табл. 1.

С учетом того факта, что на ступенчатое входное влияние объект управления формирует аperiodический отклик и переходный процесс имеет точку перегиба, целесообразно аппроксимировать объект аperiodическим звеном второго порядка:

$$W(s) = \frac{k}{T_2 s^2 + T_1 s + 1} \quad (2)$$

Таблица 1 – Контрольные точки фазовой траектории

Контрольные точки на выходе условных участков барабана	Продуктивность горелок [291 320,1 71,8], ккал	Продуктивность горелок [320,1 320,1 71,8], ккал	Расхода топлива / воздуха горелки, м ³ /с
Выход гранулятора, %	51,3	51,3	
Участок 1.1, %	42,6	41,29	0,03/3,2
Участок 1.2, %	33,26	30	0,033/3,2
Участок 2.1, %	12,72	6,87	0,033/3,3
Участок 2.2, %	4,07	2,26	0,033/3,3
Участок 3.1, %	2,32	1,29	8,5
Участок 3.2, %	0,96	0,63	8,5
Участок 4.1, %	0,91	0,59	

Используя принцип целенаправленного подбора параметров, получено следующая аппроксимирующая звено:

$$W(s) = \frac{200}{4500s^2 + 600s + 1} \quad (3)$$

Дифференциальное уравнение движения объекта управления в фазовом пространстве:

$$\ddot{y}(t) + \frac{T_2}{T_1} \dot{y}(t) + \frac{1}{T_1} y(t) = \frac{k}{T_1} u(t) \quad (4)$$

Введем замену переменных:

$$a = \frac{k}{T_1} = \frac{200}{4500} = 0,0444; \quad b = \frac{T_2}{T_1} = \frac{600}{4500} = 0,1333;$$

$$c = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{4500} = 2,22 \cdot 10^{-4}.$$

Дифференциальное уравнение в общем и численном виде:

$$\ddot{y}(t) + b\dot{y}(t) + cy(t) = au(t); \quad (5)$$

$$\ddot{y}(t) + 0,1333\dot{y}(t) + 2,22 \cdot 10^{-4} y(t) = 0,0444u(t).$$

Переходной процесс изображен на рис. 4.

Максимальное рассогласование не превышает 4,7 %, что является достаточным для процесса поиска траектории и настройки регуляторов.

Обоснование критерия оптимизации траек-

трии. Предполагается использование интегрального критерия качества, вычисляемого на временном промежутке, определяемый скоростью прохождения условной порции продукта через сушильный барабан. По требованиям, выдвигаемым к эффективному технологическому процессу, необходимо свести к минимуму влажность продукта и обеспечить минимум расхода топлива.

Критерий качества, который формально описывает выдвинутые условия имеет следующий вид [6, 7, 8]:

$$I = \int_{t_0}^{t_k} (q_1 \cdot y(t)^2 + q_2 \cdot \dot{y}(t)^2 + u(t)^2) dt' \quad (6)$$

где q_1, q_2 – весовые коэффициенты, которые задают степень влияния соответствующих составляющих на итоговое значение критерия; y – управляемая переменная (влажность); u – управляющее воздействие (расход топлива).

Первое слагаемое в подынтегральной функции регламентирует минимум абсолютного отклонения влажности, второе – максимум плавности переходного процесса, третье – минимум расхода топлива.

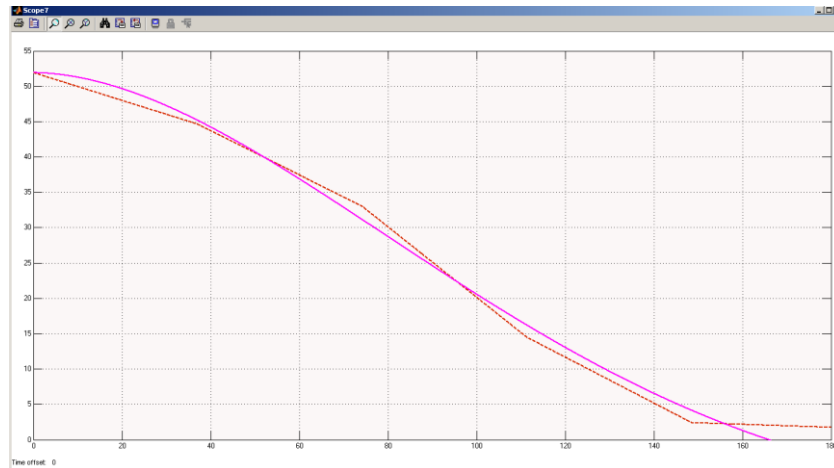


Рисунок 4 – Переходний процес зміни вологості в порівнянні з експериментальними даними (пунктирна лінія – експериментальні дані, сплошна лінія – результати апроксимації)

Наличие второго слагаемого обосновано следующим соображением – слишком быстрое падение влажности нереализуемо и нежелательно, так как возрастает процент пересушенных гранул, что ведет к их разрушению или спеканию и усложняется процесс управления.

Коэффициенты q_1 и q_2 корректируют веса первых двух слагаемых относительно третьего с учетом их важности и применяемых единиц измерения. При аппроксимации переходной характеристики объекта изменение управляющего влияния составило $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$, а выход объекта изменился на 2 %, что дает следующий весовой коэффициент первого слагаемого:

$$q_1 = \frac{0,01}{2} k_1,$$

где k_1 – коэффициент, который определяет вес первого слагаемого.

Так как начальные и конечные условия определены, то k_1 следует выбирать меньше единицы, тем самым снизив значение первого слагаемого критерия относительно других. Примем $k_1 = 0,7$, тогда численное значение весового коэффициента:

$$q_1 = \frac{0,01}{2} \cdot 0,7 = 0,0035.$$

Весовой коэффициент второго слагаемого определяется исходя из максимальной скорости изменения влажности, рассчитанного в ходе модельного эксперимента, для тех случаев, при которых влажность исходного продукта находится в допустимых пределах:

$$\dot{y}_{\max} = \frac{y_{12} - y_{21}}{t_1} = \frac{34,18 - 12,27}{34,7} = 0,6314$$

Таким образом, весовой коэффициент будет равняться:

$$q_2 = \frac{\Delta u}{\dot{y}_{\max}} k_2, \quad (7)$$

где Δu – переменная расхода топлива; k_2 – весовой коэффициент, который определяет важность составляющей.

Из соображений технологических требований $k_2=0,5$.

$$q_2 = \frac{0,01}{0,6314} \cdot 0,5 = 0,08. \quad (8)$$

Итоговый критерий приобретает вид:

$$I = \int_{t_0}^{t_k} (0,0035 \cdot y(t)^2 + 0,08 \cdot \dot{y}(t)^2 + u(t)^2) dt.$$

Необходимо отметить, что существует обратная зависимость выходной переменной (влажности) от управляющего воздействия и выходная переменная всегда положительная. Самый простой способ учесть этот факт – заменить в критерии прямое выражение для управляемой переменной на обратное:

$$I = \int_{t_0}^{t_k} \left(q_1 \cdot \frac{1}{y(t)} + q_2 \cdot \dot{y}(t)^2 + u(t)^2 \right) dt. \quad (9)$$

Итоговый критерий приобретает вид:

$$I = \int_{t_0}^{t_k} \left(0,0035 \frac{1}{y(t)} + 0,08 \cdot \dot{y}(t)^2 + u(t)^2 \right) dt.$$

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ. В соответствии с методом Эйлера-Лагранжа [9, 10] модифицируем подынтегральное выражение, в критерии добавлением уравнения связи (5), умноженное на множитель Лагранжа λ :

$$I = \int_{t_0}^{t_k} \left(\frac{q_1}{y(t)} + q_2 \cdot \dot{y}(t)^2 + u(t)^2 + \left(\lambda (\ddot{y}(t) + b\dot{y}(t) + cy(t) - au(t)) \right) \right) dt$$

Подынтегральная функция:

$$\bar{F} = \frac{q_1}{y(t)} + q_2 \cdot \dot{y}(t)^2 + u(t)^2 + \lambda (\ddot{y}(t) + b\dot{y}(t) + cy(t) - au(t))$$

Для нахождения экстремали составим систему уравнений Эйлера-Пуассона:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{F}}{\partial y} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial \dot{y}} \right) = 0 \\ \frac{\partial \bar{F}}{\partial u} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial \dot{u}} \right) = 0 \\ \frac{\partial \bar{F}}{\partial \lambda} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial \dot{\lambda}} \right) = 0 \end{cases}$$

Частотные производные:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{F}}{\partial y} &= -q_1 \cdot \frac{1}{y^2} + \lambda c & \frac{\partial \bar{F}}{\partial u} &= 2u - \lambda a \\ \frac{\partial \bar{F}}{\partial \lambda} &= \ddot{y} - b\dot{y} + cy - au \\ \frac{\partial \bar{F}}{\partial \dot{y}} &= 2q_2\dot{y} + \lambda b & \frac{\partial \bar{F}}{\partial \dot{u}} &= 0 \\ \frac{\partial \bar{F}}{\partial \dot{\lambda}} &= \lambda & \frac{\partial \bar{F}}{\partial \dot{\lambda}} &= 0 \end{aligned}$$

Система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} -\frac{q_1}{y^2} + \lambda c - \frac{d}{dt}(2q_2\dot{y} + \lambda b) = 0 \\ 2u - \lambda a = 0 \\ \ddot{y} + b\dot{y} + cy - au = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Из второго уравнения системы (10) получим:

$$u = \frac{a}{2} \lambda \quad (11)$$

Следовательно, для отыскания оптимального управления u необходимо найти λ .

Подставим выражение (10) в третье уравнение:

$$\begin{cases} -\frac{q_1}{y^2} + \lambda c - 2q_2\ddot{y} - b\dot{\lambda} = 0 \\ u = \frac{a}{2} \cdot \lambda \\ \ddot{y} + b\dot{y} + cy - au = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Выражение для u из второго уравнения системы (12) подставим в третье, выразив из него λ :

$$\lambda = \frac{q}{a^2} (\ddot{y} + b\dot{y} + cy).$$

Получившиеся выражение подставим в третье уравнение системы (12):

$$\begin{aligned} -\frac{q_1}{y^2} + \frac{2c\ddot{y}}{a^2} + \frac{2bc\dot{y}}{a^2} + \frac{2c^2y}{a^2} - 2q_2\ddot{y} - \\ -\frac{2b\ddot{y}}{a^2} - \frac{2b^2\dot{y}}{a^2} - \frac{cb}{a^2}\dot{y} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Сгруппируем члены выражения (13) по степеням производной.

Для 0-ой степени:

$$\frac{2c^2}{a^2} y - \frac{q_1}{y^2} = \frac{2c^2 \cdot y^3 - a^2 q_1}{a^2 y^2} \approx -\frac{q_1}{y^2}$$

Для 1-ой степени:

$$\frac{2bc}{a^2} \dot{y} - \frac{cb}{a^2} \dot{y} = \frac{bc}{a^2} \dot{y}$$

Для 2-ой степени:

$$\frac{2c\ddot{y}}{a^2} - 2q_2\ddot{y} - \frac{2b^2}{a^2} \ddot{y} = \ddot{y} \left(\frac{2c}{a^2} - \frac{2b^2}{a^2} - 2q_2 \right)$$

Для 3-ой степени:

$$-\frac{2b}{a^2} \ddot{\ddot{y}}$$

Найдем численные значения коэффициентов:

$$a_1 = \frac{bc}{a^2} = \frac{0,1333 \cdot 2,22 \cdot 10^{-4}}{0,00197} = 0,015$$

$$a_2 = \frac{2c}{a^2} - \frac{2b^2}{a^2} - 2q_2 = \frac{4,44 \cdot 10^{-4}}{0,00197} - \frac{2}{0,00197} - 0,16 =$$

$$= 0,2252 - 18 - 0,16 = -17,93$$

$$a_3 = -\frac{2b}{a^2} = \frac{-0,2666}{0,00197} = -135,24$$

$$a_0 = -q_1 = -0,0035$$

$$-135,24\ddot{\ddot{y}} - 17,93\dot{\ddot{y}} + 0,015\dot{\ddot{y}} - 0,0035 = 0. \quad (14)$$

Если убрать малые коэффициенты уравнения (14) то возможно упростить решение:

$$-135,24\ddot{\ddot{y}} - 17,93\dot{\ddot{y}} = 0. \quad (15)$$

Решение:

$$\bar{y}(t) = c_1 e^{-pt} + c_2 x + c_3$$

$$y(t) = c_1 e^{-0,1326t} + c_2 x + c_3$$

Частное решение:

$$\bar{y}(t) = -51e^{-0,00061t} + 0,00457t + 51. \quad (16)$$

После преобразования к выходной задаче с обратной зависимостью между управляющим воздействием и управляемой координатой можно преобразовать решение (16):

$$y(t) = y_{нач} - \bar{y}(t),$$

$$y(t) = 51 - \left(-51e^{-0,00061t} + 0,00457t + 51 \right) =$$

$$= 51e^{-0,00061t} - 0,00457t$$

Графическое отображение оптимизированной траектории приведено на рис. 5.

Выражение (17) задает закон оптимального изменения влажности продукта в функции времени. Данную зависимость можно масштабировать с учетом текущей угловой скорости и получить закон оптимального изменения влажности в функции длины барабана (рис. 6).

Форма оптимальной траектории для сушильных барабанов цеха 2 ПрАО «КЗТУ» будет отличаться от расчетной по причине наличия диафрагмы и переменной скорости продвижения условной порции техуглерода различного количества тепла, которое на отдельном участке может быть передано продукту [3]. С учетом этих фактов траектория скорректирована и она приняла вид как на рис. 6.

На основе найденной зависимости можно мгновенно оценить соответствие продуктивности горелок общей цели управления и осуществить предикторное корректирование режимов работы топочных горелок [11].

ВЫВОДЫ. На основе проведенных исследований можно утверждать следующее:

- реализация эффективного автоматического управления процессом сушки требует разработки средств косвенного определения состояния продукта внутри барабана, без которых традиционные регуляторы малоприменимы;
- динамическое звено аperiodического второго порядка, аппроксимирующего переходные процессы

объекта управления, имеет следующие параметры:

– коэффициент передачи 0,06, коэффициенты знаменателя [4500, 70, 1];

– определены оптимизированные фазовые траектории изменения влажности техуглерода на основе метода Эйлера-Лагранжа с учетом динамических свойств объекта управления и известных технологических ограничений на процесс, что позволяет реализовать автоматическую стабилизацию влажности и снизить расход топлива. Желаемая траектория описывается зависимостью:

$$y(t) = 54.02e^{-0.9995t} + 29.563 - 31.881e^{0.0002t} - 0.00015e^{0.99975t};$$

– на основании натуральных и модельных экспериментов, результаты которых учитывают ограниче-

ния на управляющие воздействия и ограничения на скорость изменения влажности, получена скорректированная траектория, которую можно непосредственно использовать в системе автоматической стабилизации влажности;

– рассчитанные функции оптимального изменения влажности по длине сушильного барабана и информация о текущем состоянии техуглерода позволяют создать метод автоматической компенсации отклонений влажности от допустимых значений и определить управляющие воздействия [11].

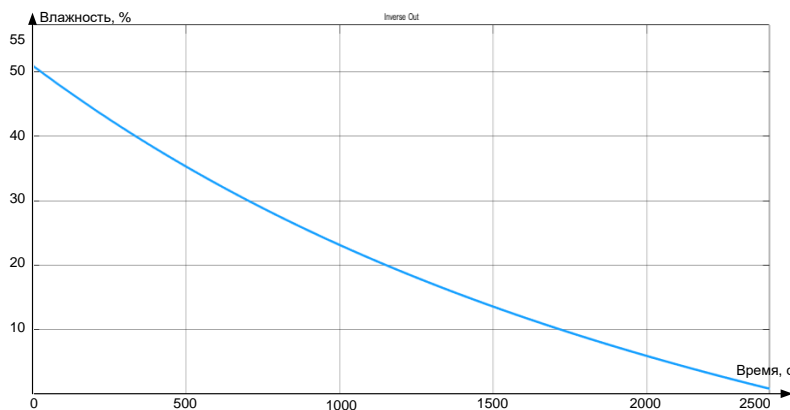


Рисунок 5 – Оптимизированная фазовая траектория изменения влажности в функции времени

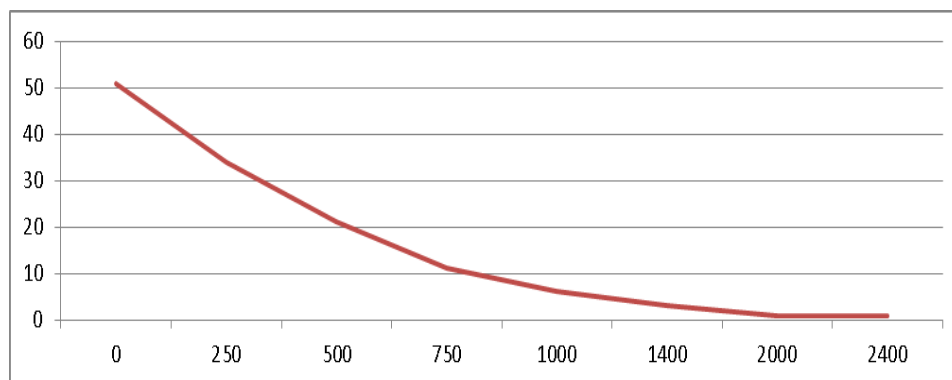


Рисунок 6 – Оптимизированная фазовая траектория изменения влажности в функции времени с учетом переменной скорости перемещения продукта

ЛИТЕРАТУРА

1. Ивановский В.И. Технический углерод / Процессы и аппараты. Омск, 2004. 229 с.
2. Орлов В.Ю. Производство и использование технического углерода. Ярославль, 2002. 512 с.
3. Конох И.С., Самчишин М.В., Копаевич А.В. Идентификация влажности гранулированного технического углерода в сушильном барабане для оптимизации управления по критерию максимальной эффективности. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук, 2016. Вип. 5/2016 (100) Ч. 2. С. 25–34.
4. Donnet J.-B., Chand Bansal R., Wang M.-J., Carbon Black. 1993. Vol. 2. URL: https://books.google.com.ua/books?id=SPpx6MkRY_wMC&pg=PA6&lpg=PA6&dq=carbon+black+manufacturing+process&source=bl&ots=P6ymFVs0wE&sig=uYRGM1-qJ8jf0VFSQu

svs5S2RW8&hl=ru&sa=X&ved=0ahUKEwjElpaHitXZAhUOhqYKHQwWBJo4ChDoAQiUATAJ#v=onepage&q=carbon%20black%20manufacturing%20process&f=false (дата звернення: 06.03.2018).

5. Tazimi M., Javadi S. M., Nabavi S. S. The Effect of H₂S on Hydrogen and Carbon Black Production from Sour Natural Gas: *Applied Mechanics and Materials*, 2012. Vols. 110–116. PP. 2131–2138.

6. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления: издание второе переработанное и дополненное. М.: Книга по Требованию, 2013. 414 с.

7. Черноруцкий И.Г. Методы оптимизации. Компьютерные технологии. – СПб. : БХВ-Петербург, 2011. 384 с.

8. Васильев Ф.П. Методы оптимизации. Пиксель, 2013. 620 с.

9. Zhang, Yu., Zhi Guo Feng, Xinsong Y. Finite-time stabilization for a class of nonlinear systems via optimal control. *MATHEMATICS AND COMPUTERS IN SIMULATION*. Web of Science Core Collection. T. 146, 2018. PP. 14–26.

10. Власов К. П. Специальный курс по теории автоматического управления: учебное пособие. /

Харьков: ХПИ, 1974. 198 с.

11. Шевченко И.В. Информационная технология оптимизации геометрических параметров тепловых узлов установок для выращивания монокристаллов. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук, 2013. Вип. 4/2013 (81). С. 114–120.

OPTIMIZATION OF THE PHASIC TRAJECTORIES OF THE GRANULATED TECHNICAL CARBON DRYING PROCESS

I. Konokh, N. Rylova

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: kis_sau@mail.ru

Purpose. To increase the efficiency of the granulated technical carbon drying process through estimation of optimal phasic trajectory of product humidity change under passing drying tube. Estimation of optimal phasic trajectory is support implementation of advanced method automatic control of the processing plant. **Methodology.** In the paper the estimation of experimental data by typical second-order dynamic unit, method of conditional optimization of trajectories at phase space by Euler-Poisson with Lagrange multiplier are used. The sub integral function of integral optimality criterion contains humidity value, humidity derivative, control action. The obtained differential equation describes humidity dependence on fuel consumption. Also this differential equation is used as limitations of optimization results. **Results.** The search of optimal phasic trajectory equation as general form of time function has been carried out using analytic method. The result can be recalculated on tube length subject to current angular velocity of drying tube. The desired dependency of technical carbon humidity at the end of each conventional drying tube section is obtained based on data of natural experiments. This desired dependency takes into account variable travel speed of product and spatial placement of combustion burner. **Originality.** For the first time, the optimal phasic trajectory of product humidity change on length of modernized drying tube BS-40 has been obtained. This allows realize advanced method of automatic control of the processing plant under technical features of Kremenchuk Carbon Black Plant. **Practical value.** The results of the conducted researches make possible calculation of current control action for each combustion burner. During calculation we ground on obtained desired value of humidity. Also obtained results allows to reduce specific fuel consumption per product unit and except overrun of product humidity on 0,2 – 0,9 %. References 11, tables 1, figures 6.

Key words: carbon black, optimization, drying process, Euler-Lagrange method.

REFERENCES

1. Ivanovskiy, V.I. (2004), *Tekhnicheskii uglerod. Protsessy i apparaty*, Omsk, Russia.

2. Orlov, V.Yu. (2002), *Proizodstvo i ispol'zovanie tekhnicheskogo ugleroda*, Yaroslavl, Russia.

3. Konokh, I.S., Samchishyn M.V., Kopaievych O.V. (2016), "Identifikatsiya vlazhnosti granulirovannogo tekhnicheskogo ugleroda v sushilnom barabane dlya optimizatsii upravleniya po kriteriyu maksimalnoy effektivnosti" [Identification of humidity of the granulated technical carbon in the drying cylinder for management optimization by the maximum efficiency criterion], *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, iss.1, no. 100, pp. 25–34.

4. Donnet, J.-B., Chand Bansal, R., Wang, M.-J., Carbon, Black (1993), "Carbon Black", 2nd ed, rev. & expanded, available at: <https://books.google.com.ua/books?id=SPpx6MkRYwMC&pg=PA6&lpg=PA6&dq=carbon+black+manufacturing+process&source=bl&ots=P6ymFVs0wE&sig=uYRGMI-qJ8jf0VFSQusvs5S2RW8&hl=ru&sa=X&ved=0ahUKewjElpaHitXZAhUOhqYKHQwWBJo4ChDoAQiUATAJ#v=onepage&q=carbon%20black%20manufacturing%20process&f=false> (accessed March 06, 2018).

5. Tazimi, M., Javadi, S.M., Nabavi, S.S. (2012), "The Effect of H₂S on Hydrogen and Carbon Black Production from Sour Natural Gas", *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 110-116, pp. 2131-2138.

6. Boltianskiy, V.G. (2013), "Matematicheskie metody optimalnogo upravleniya", Moscow, *Kniga po trebovaniu*.

7. Chernorutskiy I.G. (2011), "Metody optimizatsii. Komputernye tekhnologii", Peterburg, Russia.

8. Vasilyev, V. F. (2002), *Metody optimizatsii [Optimization methods]*, Factorial-Press, Moscow, Russia.

9. Zhang, Yu., Feng, Zhi Guo, Y., Xinsong (2018), "Finite-time stabilization for a class of nonlinear systems via optimal control" *Mathematics and computers in simulation [Web of science core collection]*, –Vol. 146, pp. 14–26.

10. Vlasov, K. (1974), "Spetsialnyy kurs po teorii avtomaticheskogo upravleniya" [A special course on automatic control theory (tutorial), Izd-vo Harkov, HPI.

11. Shevchenko, I.V. (2013), "Informatsionnaya tekhnologiya optimizatsii geometricheskikh parametrov teplovykh uzlov ustanovok dlya vyrashchivaniya monokristalov" [Optimization of information technology of geometric parameters of thermal units for single crystals growing plants], *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, no. 81, pp. 114–120.

Стаття надійшла 29.01.2018.