

УДК 681.51

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВЛАЖНОСТИ ГРАНУЛИРОВАННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА  
В СУШИЛЬНОМ БАРАБАНЕ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ  
ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

**И. С. Конох, М. В. Самчишин, А. В. Копаевич**

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

Приведена характеристика процесса сушки гранулированного технического углерода, особенности работы технологического оборудования и требования к параметрам выходного продукта. Описаны действующие факторы, затрудняющие автоматическую стабилизацию влажности технического углерода на выходе сушильного барабана. Для класса непрерывных технологических процессов сушки техуглерода построена продуктовая модель, обеспечивающая расчет всех значимых параметров, позволяющая выполнять глобальную оптимизацию управления с точки зрения максимальной эффективности. Предложен способ реализации непрямої идентификации состояния продукта на отдельных участках сушильного барабана на основе вычислительной модели технологического процесса и доступных технологических сигналов. Показана взаимосвязь процессов вычислений в нотации IDEF0 и разработанные функциональные блоки модели как системы передаточных функций и функциональных зависимостей для математического пакета MATLAB. Показаны результаты тестирования модели на контрольных примерах. Предложен принцип стабилизации влажности продукта в допустимых пределах, учитывающий информацию о влажности, температуре и количестве материала, полученную на основе непрямых измерений.

**Ключевые слова:** технический углерод, сушка, идентификация, модель.

**ІДЕНТИФІКАЦІЯ ВОЛОГОСТІ ГРАНУЛЬОВАНОГО ТЕХНІЧНОГО ВУГЛЕЦЮ  
В СУШИЛЬНОМУ БАРАБАНІ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ  
ЗА КРИТЕРІЄМ МАКСИМАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ**

**І. С. Конох, М. В. Самчішин, О. В. Копаєвич**

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

Наведено характеристику процесу сушіння гранульованого технічного вуглецю, особливості роботи технологічного обладнання і вимоги до параметрів вихідного продукту. Описано діючі фактори, що ускладнюють автоматичну стабілізацію вологості технічного вуглецю на виході сушильного барабана. Для класу безперервних технологічних процесів сушки техвуглецю побудована продуктова модель, що забезпечує розрахунок всіх значущих параметрів і дозволяє виконувати глобальну оптимізацію управління з точки зору максимальної ефективності. Запропоновано спосіб реалізації непрямої ідентифікації стану продукту на окремих ділянках сушильного барабана на основі обчислювальної моделі технологічного процесу і доступних технологічних сигналів. Показано взаємозв'язок процесів обчислень в нотатії IDEF0 і розроблені функціональні блоки моделі як системи передавальних функцій і функціональних залежностей для математичного пакета MATLAB. Показані результати тестування моделі на контрольних прикладах. Запропоновано принцип стабілізації вологості продукту в допустимих межах, що враховує інформацію про вологість, температуру і кількості матеріалу, отриману на основі непрямих вимірювань.

**Ключові слова:** технічний вуглець, сушка, ідентифікація, модель.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Технический углерод – важный компонент, который применяется как укрепляющая составляющая в производстве резин и пластических масс. Около 70 % всего производимого техуглерода используется в производстве автомобильных шин, примерно 20 % в производстве резино-технических изделий [1]. Остальное количество находит применение как черный пигмент; замедлитель «старения» пластмасс; компонент, придающий пластмассам специальные свойства: электропроводные, способность поглощать ультрафиолетовое излучение, излучение радаров).

Технологический процесс сушки гранулированного углерода является конечным этапом его производства перед складированием и отправкой потребителям. Гранулирование позволяет транспортировать продукт без специальной тары железнодорожным транспортом и облегчает потребителям дальнейшие манипуляции с этим сырьем.

При выполнении операций гранулирования и

сушки важно поддерживать экстремальное значение общей эффективности процесса при соблюдении ограничений на параметры качества.

Потребители жестко регламентируют содержание влаги в гранулах в пределах 0,2 – 0,9 % [2, 3]. Пересушенный или недосушенный технический углерод возвращается на повторную грануляцию и сушку, что снижает производительность технологической линии, увеличивает удельные затраты энергоносителей и другие издержки. Например, в условиях ОАО «Кременчугский завод технического углерода», объем суточного производства составляет несколько сот тонн. Возникающие отклонения в условиях протекания техпроцесса приводят, в среднем за месяц, к 0,5 – 1,5 % некондиционной продукции, что соответствует убыткам в несколько десятков тысяч гривен.

Целью работы является повышение эффективности технологического процесса и обеспечение точности стабилизации влажности гранулированного

технического углерода путем идентификации его состояния на отдельных участках сушильного барабана непрямыми измерениями на основе вычислительной модели.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** *Характеристика технологического процесса.* На предприятии ОАО «Кременчугский завод технического углерода» получение гранулированного продукта производится в пять потоков. На каждом потоке имеется сушильный барабан, представляющий собой специальную 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.

Из основного бункера-накопителя через шлюзовой затвор высокодисперсный углерод поступает в смеситель-гранулятор. В этот же аппарат с помощью форсунок поступает смачиватель (раствор мелассы в воде), нагретый до 60 – 90 °С. На выходе гранулятора образуются влажные (от 40 до 55%) гранулы технического углерода, которые высыпаются в приемный патрубок сушильного барабана. Расход углерода и ВМР в гранулятор может варьироваться в пределах 0,5 – 1,2 кг/с. Барабан обогревается газовыми и жидкотопливными горелками, сгруппированными в условные три зоны сушки. Дополнительно в середину барабана подаются продукты горения аксиального 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 (АЭП).

В выходной части барабана, находящейся на грани топки, установлена диафрагма, которая частично задерживает перемещения техуглерода и увеличивает массу высушиваемого материала в барабане. Для интенсификации процесса сушки техуглерода в выходной части барабана осуществляется отсос центробежным вентилятором пара и топочных газов. Процесс сушки происходит за счет подвода тепла от топочных газов аксиального газовой горелки и подвода тепла от жидкотопливных и газовых горелок топки через стенки барабана.

Схема сушильного барабана, расположение горелок и точек контроля температуры приведена на рис. 1.

Топочные газы аксиального газовой горелки проходят через массу гранулированного углерода, пересыпается внутри барабана, осуществляя дополнительный подогрев материала и выпаривания влаги. Расход газа составляет 15 – 30 м<sup>3</sup>/час.

Жидкотопливные горелки являются основными источниками тепловой энергии для процесса сушки, в которых жидкое коксохимическое сырье распыляется подогретым сжатым воздухом с помощью форсунок. Далее пары распыленного топлива смешиваются с подогретым воздухом для полного сгорания в топке. Температура пламени составляет 1100 – 2100 °С. Расход жидкого топлива на каждую горелку может варьироваться в диапазоне 70 – 110 л/час. Горелки данного типа установлены в 1-й и 2-й зонах топки (по два на зону).

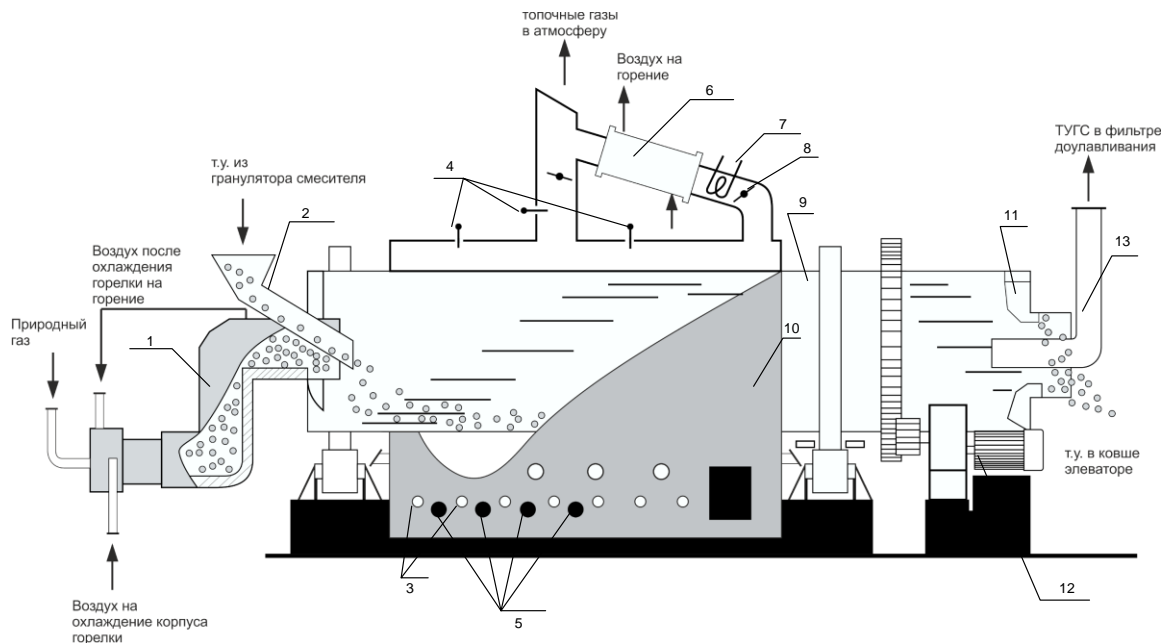


Рисунок 1 – Технологическая установка – сушильный барабан: 1 – газы аксиальной горелки, 2 – загрузочный патрубок влажного техуглерода, 3 – газовые горелки, 4 – термопары контроля топочных газов, 5 – жидкотопливные горелки, 6 – теплообменник подогрева воздуха на горение, 7 – теплообменник воздуха на распыл,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

Газовые горелки топки – инжекторного типа с ручной настройкой сечения воздушного канала. Природный газ поступает в горелки под давлением до 1,6 кг/см<sup>2</sup>, воздух автоматически инжектируется струей сжатого газа и образует горючую смесь. Горелки данного типа установлены по обе стороны топки – 6 в первой зоне, 6 во второй зоне, 8 в третьей зоне.

Типичная схема включения горелок – одна жидкотопливная горелка в 1-й зоне, одна жидкотопливная горелка во 2-й зоне, газовые горелки в 3-й зоне на промежуточном уровне мощности. В переходных режимах жидкотопливные и газовые горелки могут быть включены в любых комбинациях.

Существует возможность контролировать расход техуглерода и водно-мелассового раствора (ВМР) в гранулятор и ротора гранулятора средствами АЭП, контролировать токовую нагрузку электроприводов.

Реализовано измерение температуры в следующих точках технологической схемы:

- газов аксиального горелки на входе сушильного барабана;
- углеродно-газовой смеси (ТУГС) на выходе барабана;
- сухого гранулированного углерода на выходе барабана;
- дымовых газов в дымовой трубе;
- в верхней части топки в 1-й зоне;
- в верхней части топки во 2-й зоне;
- в верхней части топки в 3-й зоне;
- сжатого воздуха на горение после теплообменника;
- водно-мелассового раствора на входе гранулятора.

Для контроля качества технического углерода проводится периодический отбор проб перед его поступлением в бункер готовой продукции. Период отбора – 4 часа. Испытуемый техуглерод анализируется на физико-химические показатели.

Следует учитывать тот факт, что локальная пересушка приводит к снижению механической прочности отдельных гранул и повышенному пылению углерода внутри барабана, что сильно снижает эффективность технологического процесса. При работе технологической линии выведена эмпирическая зависимость – при влажности продукции, получаемой с выхода сушильного барабана 0,2 % температура составляет 200°C, при влажности 0,9% – 115°C.

Таким образом, задача стабилизации влажности сведена к стабилизации температуры выходного гранулированного техуглерода.

Вследствие действия ряда факторов (связанных с изменениями режима горения и сушки), наблюдается возникновение колебаний температур ТУГС и техуглерода на выходе сушильного барабана. Оперативному персоналу требуется, основываясь на показаниях датчиков вспомогательных величин и субъективном опыте, принимать решения по изменению продуктивности аксиальной и топочных горелок, скорости подачи влажного углерода в барабан, угловой скорости сушильного барабана.

В настоящее время полная автоматизация данно-

го технологического процесса невозможна без получения актуальной информации о состоянии гранулированного техуглерода по зонам сушильного барабана и прогноза изменения параметров продукта по мере его продвижения от начала к позиции выгрузки. Осуществление прямых измерений температуры и влажности продукта внутри барабана невозможно.

Объект управления характеризуется наличием транспортной задержкой до 30 – 40 минут по продвижению техуглерода и 15 – 20 минут по углеродно-газовой смеси. Также ситуацию осложняют широкие диапазоны изменения начальной влажности и температуры входного продукта, общей загрузки барабана; температуры и влажности воздуха, участвующего в процессе горения, нестабильность работы жидкотопливных горелок, существенная нелинейность эффективной продуктивности горелок от изменения проходных сечений воздушных и топливных задвижек.

*Критерий эффективности процесса.* Данный технологический процесс и соответствующее оборудование можно отнести к системам преобразования продукта и, в общем виде, состоит из технологической подсистемы, подсистемы контроля, подсистемы учета, подсистемы координации и подсистем оптимизации [4, 5]. Распространен подход к оптимизации технологического процесса, при котором добиваются экстремально высоких показателей качества выходной продукции или минимума энергозатрат при минимально допустимых качественных параметрах. Однако, с точки зрения метасистемы – производственного предприятия в целом, требуется задать такой режим функционирования технологического оборудования, при котором будут правильно учтены затраты на сырье, энергоносители, ресурс оборудования, время операций, стоимость выходной продукции.

Известен глобальный показатель эффективности целевых операций (критерий оптимального управления) [5, 6]:

$$E = \frac{(PE - RE)^2 T_l^2}{PE \cdot RE \cdot T_{op}^2},$$

где  $RE$  – суммарная стоимость сырья, энергоносителей, потраченного ресурса, сопутствующих затрат;  $PE$  – стоимость выходного продукта;  $T_{op}$  – время операции;  $T_l$  – размерный коэффициент.

Установлено, что данный показатель позволяет дать системную оценку исследуемым операциям. Более высокое значение эффективности исследуемой операции, по отношению к сравниваемой операции, говорит о том, что обеспечивается накопление более высокой добавленной стоимости (прибыли) с учетом затрат и времени операции.

Проведенная идентификация процесса сушки и созданная на ее основе продуктовая вычислительная модель позволяют провести глобальную оптимизацию эффективности функционирования системы сушки гранулированного техуглерода в соответствии с принятым критерием.



*Структура вычислительной модели.* Повышение эффективности технологического процесса сушки гранулированного технического углерода возможно через решение задачи идентификации ряда параметров для каждой условной зоны сушильного барабана. К ним можно отнести:

- вес материала;
- температура материала;
- влажность материала;
- вес и температура газопаровой смеси;
- калорийность газов.

Для моделирования барабан был разделен на 7 условных зон, для каждой из которых рассчитывается поступление тепловой энергии.

Модель отражает продвижение порции технического углерода вдоль барабана от одной зоны к другой. Одновременно рассчитывается нагрев воды, углерода и пара согласно поступлению тепловой энергии от аксиальной и топочных горелок. Эффективная температура и калорийность на участке рассчитывается отдельно от каждой горелки с учетом явления переноса энергии вдоль барабана. На каждом участке моделируется испарение влаги из гранул углерода и изменение массы материала в зависимости от скорости барабана, количества тепловой энергии, которую поглощает материал на нагрев и испарение.

Модель учитывает существующие внутренние обратные связи объекта управления. Например, уменьшение угловой скорости барабана приводит к увеличению массы материала на участках, которую сложнее нагреть, но совместно с этим, более длительное нахождение порции на каждом участке приводит к большему испарению влаги.

Реализация модели выполнены в программном пакете MATLAB 2011b в виде системы передаточных функций и многомерных функциональных зависимостей. Процесс моделирования в нотации IDEF0 приведен на рис. 2.

Моделирование работы горелок выполнялось на основе известных экспериментальных зависимостей [3, 7], учитывающих соотношение воздух-топливо, температуру и влажность воздуха, калорийность топлива. Входными сигналами этих блоков модели являются объемные расходы топлива и воздуха, выходными – температура и калорийность пламени, объем продуктов горения.

Перемещение материала вдоль барабана рассчитывается с помощью последовательности блоков управляемой транспортной задержки. Величина задержки вычисляется на основании известной скорости вращения сушильного барабана. Наличие диафрагмы учитывается коэффициентами замедления продвижения материала, увеличения загрузки барабана перед диафрагмой и уменьшения после.

На каждом участке от имеющейся в техуглероде массы воды отнимается рассчитанное количество испаренной влаги с учетом времени нахождения продукта на данном участке. Структура элемента модели, вычисляющего динамику изменения загрузки участков барабана, приведена на рис. 3.

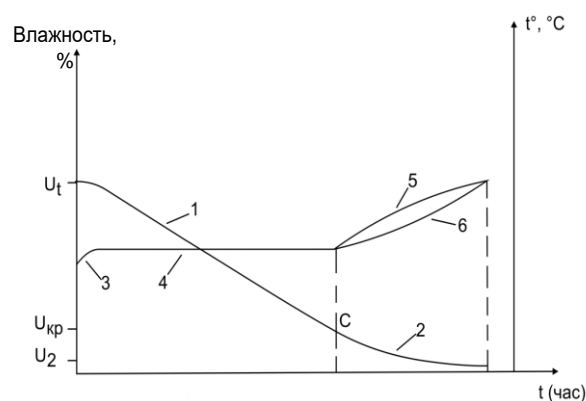


Рисунок 3 – Диаграмма процесса сушки технического углерода

Динамику процессов нагрева и испарения на каждом участке сушильного барабана описывает подсистема модельных блоков, показанных на рис. 4.

Входными воздействиями являются:

- эффективная температура и калорийность газов аксиальной горелки;
- температура и калорийность топочных горелок с учетом их пространственного расположения;
- масса углерода, воды и пара;
- начальная температура углерода и пара, проходящих через данный участок.

Подсистема формирует следующие выходные сигналы:

- приращение температуры техуглерода;
- приращение температуры пара;
- количество испаряемой влаги;
- калорийность и температура выходных топочных газов.

Так как количество калорий конечно, в модели предусмотрено определение соотношения потребляемых калорий на нагрев и испарение. В расчетах учитываются теплоемкости углерода и воды, влажность углерода. Пока она не снизилась до 15 %, считается, что вся тепловая энергия тратится на испарение, если температура продукта достигла 100 °С.

Так как процессы нагрева хорошо описываются аperiodическим законом [7, 8] и постоянная времени нагрева сравнима с временем прохождения порции техуглерода через элементарный участок барабана, реализован расчет изменения температуры аperiodическим звеном первого порядка с возможностью предустановки начального значения температуры по срезу тактового импульса (рис. 5, б).

В модели приращение температуры после достижения значения 100°С зависит от влажности техуглерода, то есть температура гранул техуглерода может меняться только согласовано с изменением влажности. Поэтому в модели этот эффект учтен и при расчете величины возможного приращения температуры и при вычислении динамики ее изменения (рис. 5, а). Если расчетное значение температуры превышает возможное при текущей влажности, входное значение аperiodического звена корректируется. Аналогично выполняется расчет приращения температуры пара.

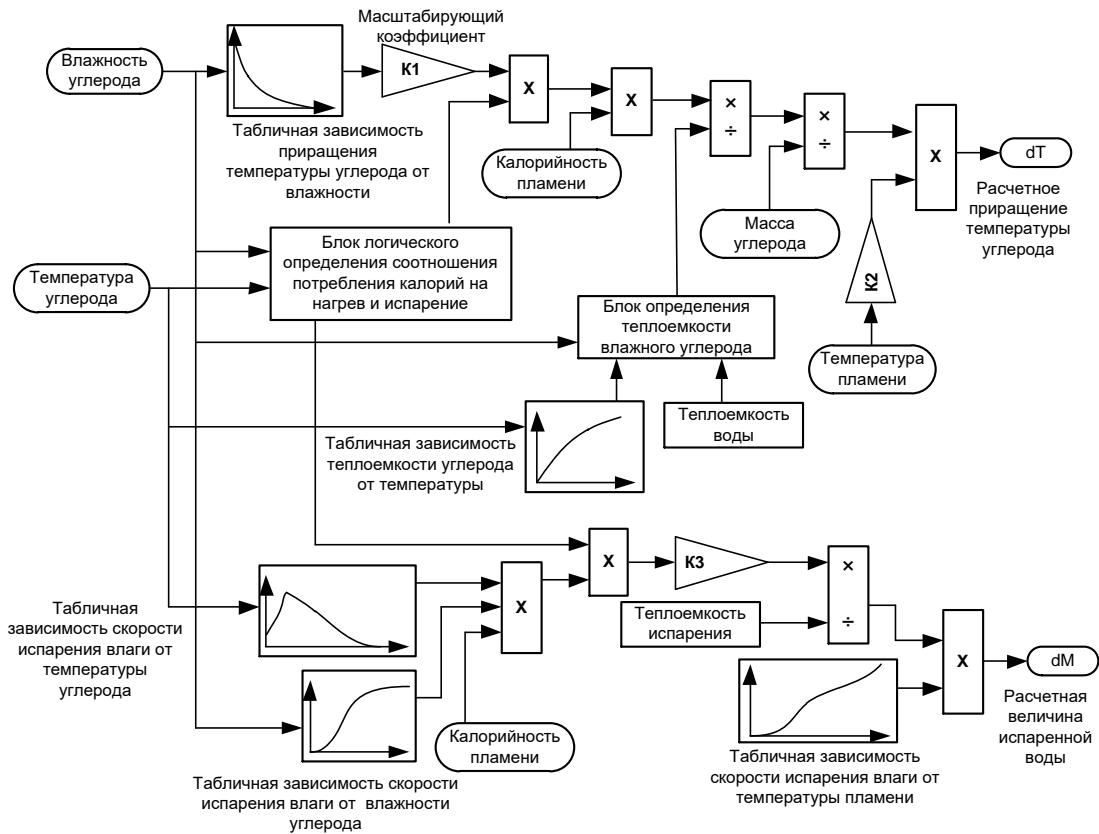


Рисунок 4 – Структурная схема расчета приращения температуры продукта и количества испаренной воды на отдельном участке

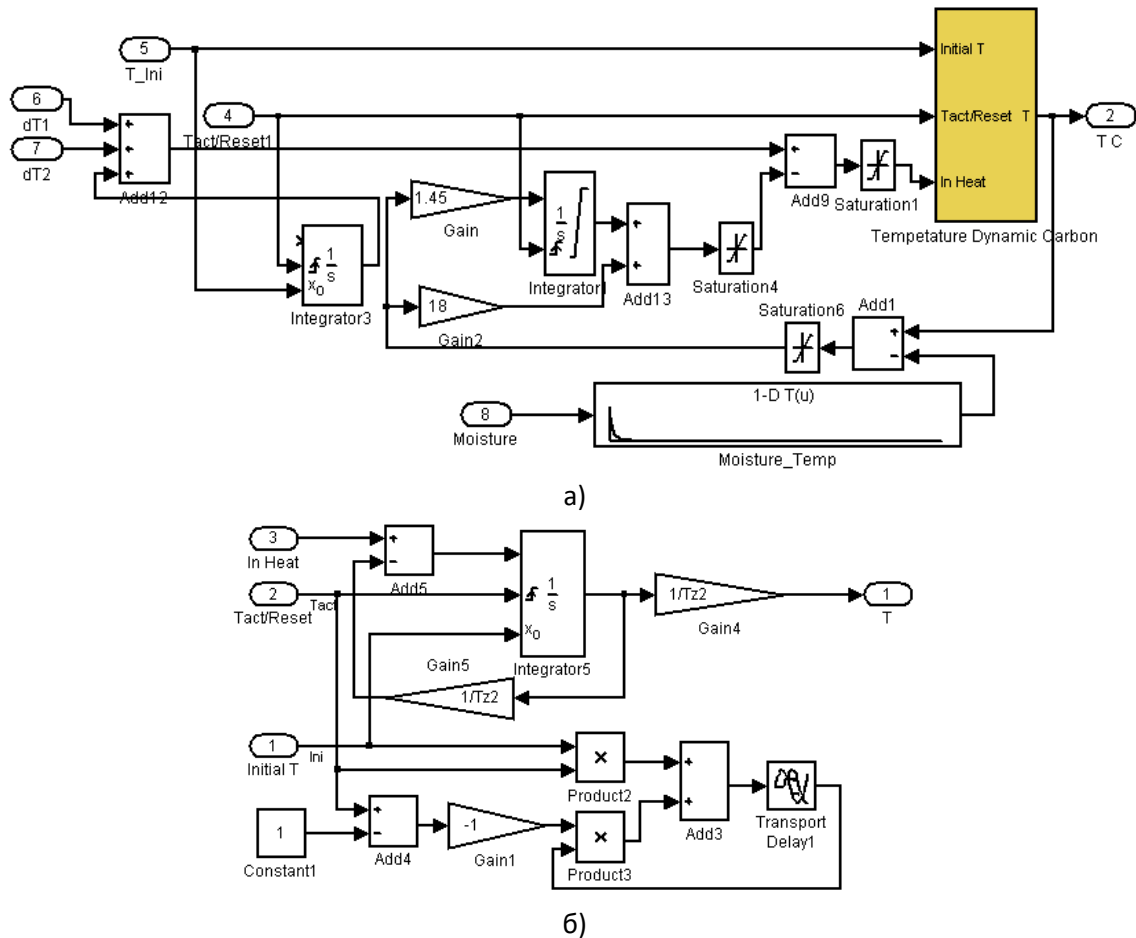


Рисунок 5 – Структурная схема вычисления динамики изменения температуры: а) общая схема; б) аперидическое звено с запоминанием начального состояния

В моделі учитывається кінетика процесу сушки (в вигляді табличних функцій), установленна експериментально і описана діаграмою на рис. 3 [9–11]. Проявляються наступні закономірності процесу сушки:

– швидкість сушки характеризується двома періодами – на першому періоді, коли видаляється головним чином поверхнева волога, швидкість постійна і максимальна; на другому періоді, коли видаляється волога, яка переміщується з внутрішніх шарів за рахунок дифузії, швидкість зменшується по мірі висихання матеріалу;

– температура матеріалу в перший період сушки постійна, так як все тепло витрачається тільки на випаровування вологи; во в другому періоді температура матеріалу постійно зростає і до кінця сушки може наблизитися до температури теплоносія.

Графічна залежність швидкості сушки від часу називається кривою швидкості сушки, а залежність вмісту вологи в матеріалі від часу – кривою сушки (рис. 3).

Спочатку проходить прогрів матеріалу (ділянка 3) до температури, при якій починається випаровування вологи (так називається температура вологого термометра).

Температура матеріалу залишається незмінною впродовж всього першого періоду сушки (ділянка 4).

Затем, во в другому періоді сушки, коли лімітуючим фактором стає швидкість надходження вологи з внутрішніх шарів матеріалу, температура його неперервно підвищується до досягнення матеріалом кінцевої вологості, причому на поверхні матеріалу (ділянка 5) вона зростає швидше, ніж в центрі гранул (ділянка 6).

Во кінці процесу сушки температура матеріалу на поверхні і в центрі практично вирівнюється. Вміст вологи в матеріалі в період його прогріву не змінюється.

Затем, при досягненні температури вологого термометра, волога починає випаровуватися і вміст її в матеріалі зменшується в прямій 1 (період постійної швидкості сушки). Затем вміст вологи зменшується по кривій 2, що характеризує період падаючої швидкості сушки.

Точка С переходу від прямої до кривої знаходиться на межі між першим і другим періодами сушки і вологість матеріалу в цій точці називається критичною вологістю ( $U_{кр}$ ). Процес сушки закінчується, коли вміст вологи в матеріалі досягає заданої кінцевої вологості ( $U_2$ ). При сушці гранул тегулерода критична вологість по різних даних знаходиться в межах від 5 до 17%. Слід мати на увазі, що критична вологість не є константою матеріалу. Вона залежить від щільності гранул, розмірів гранул і режиму сушки – температури і швидкості теплоносія [7, 12].

Перезапис внутрішніх станів динамічних ланок відбувається по індивідуальним синхронімпулсам, формуваними блоком синхронізації. Причому, спочатку змінюється стан блоку, що відповідає кінцевим зонам барабана, а потім початковим. Таким чином, кінцева температура умовної порції тегулерода на попередньому ділянці стає початковою на наступній.

Ілюстрація описаного процесу показана на рис. 6.

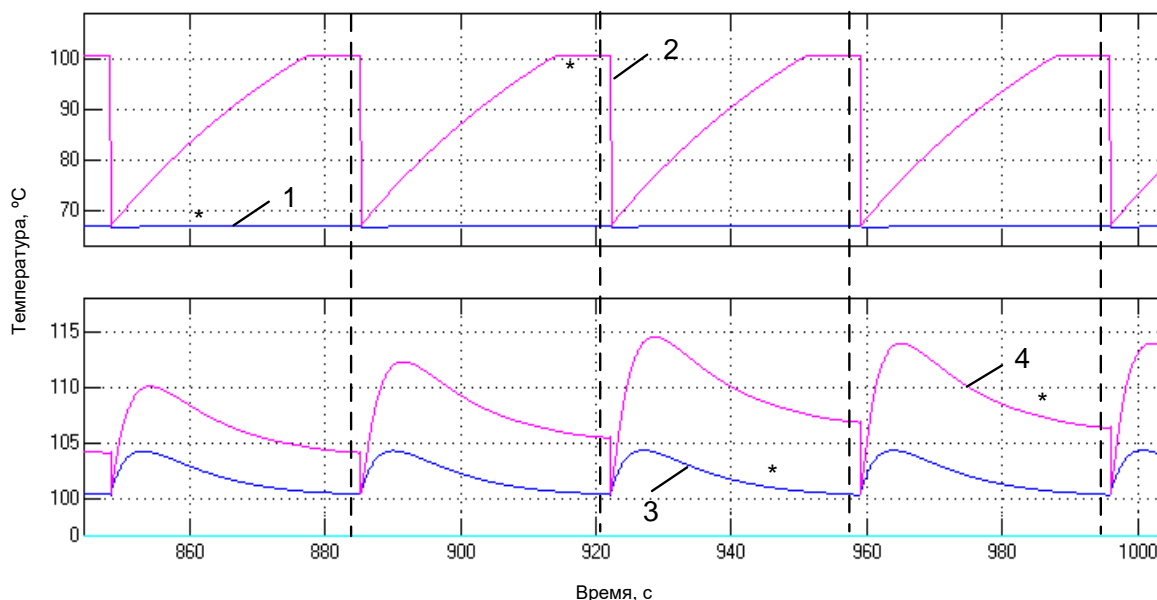


Рисунок 6 – Діаграми зміни температури порції тегулерода по мірі проходження початкового і середнього ділянок барабана

Ділянки діаграми, позначені маркером «\*», відповідають проходженню і нагріву однієї і тієї ж порції тегулерода по мірі проходження двох початкових (лінії 1 і 2) і двох середніх ділянок (лінії 3 і 4) сушильного барабана.

Во процесі досліджень виявлено, що ступінь

впливу аксіальної і топкових горелок на процес випаровування вологи і нагрів тегулерода сильно відрізняється. Для урахування цього явища потрібно окремо розраховувати внесок горелок різних типів на випаровування і нагрів матеріалу. Це дозволило визначити зміну температури і калорійності

газов аксиальной горелки по мере их продвижения по сушильному барабану и учесть изменение их влияния на процессы в каждой зоне.

*Оценка качества работы модели.* Разработанная в рамках данного исследования вычислительная модель требует проверки на адекватность. Прежде всего, проверено соответствие результатов моделирования реальным значениям технологических параметров, приведенных в табл. 1. В модельных экспериментах входные воздействия не выходили за предельные границы, которые были определены в ходе изучения техпроцесса (приведены в табл. 2).

Таблица 1 – Диапазоны изменения контрольных параметров технологического процесса

№ пп	Название параметра	Численные значения
1	Температура ТУГС на выходе сушильного барабана, °С	120 – 250
2	Температура газов по зонам топки сушильного барабана, °С, не больше	780
3	Желаемая температура техуглерода на выходе сушильного барабана, °С	115 – 200
4	Влажность техуглерода при соблюдении желаемого диапазона температур, %	0,9 – 0,2
5	Температура ТУГС на выходе сушильного барабана, °С	120 – 250
6	Максимальное время задержки реакции температуры ТУГС, с	1250
7	Максимальное время задержки реакции температуры техуглерода, с	2400

Таблица 2 – Диапазоны изменения входных величин технологического процесса

№ пп	Название параметра	Численные значения
1	Нагрузка на гранулятор по воде и углероду, кг/ч	500 – 5000
2	Температура воды, подаваемой в гранулятор, °С	60 – 90
3	Массовая часть влаги на выходе гранулятора, %	40 – 55
4	Скорость вращения барабана, об/мин	2,0 – 3,6
5	Температура ТУГС на выходе сушильного барабана, °С	120 – 250
6	Температура сжатого воздуха на горение, °С	130 – 190

Проверка адекватности модели выполнялась путем ретроспективного анализа технологических сигналов и данных лабораторных анализов влажности материала, полученных при завершении анализируемого периода [13].

Был рассмотрен ряд примеров функционирования технологического оборудования. В качестве входных значений модели задавались комбинации технологических параметров, реально зафиксированные в ходе наблюдения за техпроцессом.

Из-за отсутствия возможности прямо контролировать вес, влажность и температуру техуглерода, выполнялась сверка значений доступных для измерения величин в процессе прохождения условных порций гранулированного техуглерода по сушильному барабану.

Пример трендов технологических сигналов для одного из рассмотренных случаев приведен на рис. 6. Решение задачи определения температуры (как и определения влажности) сходится к моментам времени, задаваемых тактовыми импульсами (соответствующие моменты обозначены пунктирными линиями). Для сигналов датчиков температуры топки рассогласования не превышает 8 – 15%, для сигналов температуры сухого техуглерода на выходе 6 – 10%, для ТУГС – 12%. Изменение влажности и температуры продукта согласуется с эмпирическим зависимостями. Для отдельных тестовых сценариев значения сведены в табл. 3. Участок номер 1 соответствует выходу гранулятора, номер 8 – зоне выгрузки готового продукта. Сценарии отличаются производительностью топочных горелок – для второго они больше на 15% для первой и третьей зон.

Таблица 3 – Изменение выходных величин влажности и температуры

№ участка	Влажность, %	Температура, °С
1	51,3/51,3	66,5/66,5
2	44,88/43,88	66,9/66,95
3	35,96/33,06	100/100
4	15,28/9,44	100/100
5	3,55/2,6	104/105,9
6	1,93/1,44	110/111,9
7	0,786/0,614	125,25/141,7
8	0,75/0,586	128,85/142,6

**ВЫВОДЫ.** Сушильный барабан является динамическим объектом управления, который характеризуется большой инерционностью, значительной транспортной задержкой и невозможностью прямо определить состояние продукта. По результатам проведенных исследований можно утверждать следующее:

- реализация эффективного автоматического управления процессом сушки с использованием жидкотопливных горелок требует разработки средств косвенного определения состояния продукта внутри барабана, без которых традиционные регуляторы малоприменимы и отсутствует возможность повысить точность поддержания температуры выходного продукта в заданных границах;

- разработанная модель отображает основные качественные зависимости, описывающие влияние управляющих величин и внутренних обратных связей на динамику процесса сушки, что является необходимым для повышения точности расчетов загрузки, температуры и влажности материала по каждой условной зоне барабана;



– для обеспечения сходимости решений необходимо тактировать работу модели на основании скорости перемещения сыпучего материала и газов внутри барабана, которые зависят от его угловой скорости и разряжения, создаваемого вытяжным вентилятором;

– точность воспроизведения реальных технологических сигналов для контрольных примеров характеризуется погрешностью в 6 – 10%, что свидетельствует о достаточной адекватности модели и позволяют утверждать о возможности использования разработанной математической модели для косвенных измерений актуальных значений влажности и температуры на всех участках сушильного барабана.

В ходе проведенных исследований усовершенствована математическая модель сушки гранулированного технического углерода. Данная модель, воспроизводит процессы накопления и перемещения материала, расчет количества испаренной влаги и приращения температуры продукта с учетом влияния каждой из горелок, кинетических характеристик сушки и начальных условий для каждой зоны, что позволило идентифицировать загрузку, температуру и влажность продукта в семи отдельных зонах сушильного барабана, предсказать выходные характеристики продукта и организовать предикторное управление с улучшенной стабилизацией температуры и влажности.

На основании продуктовой модели, обеспечивающей расчет всех значимых параметров, становится возможным выполнять глобальную оптимизацию управления с точки зрения максимальной эффективности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Берёзкин В.И. Углерод: замкнутые наночастицы, макроструктуры, материалы. – СПб.: АРТЭГО, 2013. – 450 с.
2. Carbon black manufacturing. – 2013. – Режим доступа до ресурсу: [http://www.asahicarbon.co.jp/global\\_site/product/cb/manufacturing.html](http://www.asahicarbon.co.jp/global_site/product/cb/manufacturing.html).
3. Ивановский В. И. Технический углерод. Процессы и аппараты. – Омск, 2004 – 229 с.
4. Kirk, E. Optimal Control Theory: An Introduction (Dover Books on Electrical Engineering) [Text] / E. Kirk. – New York : Dover Publications, 2004. – 464 p.
5. Lutsenko I. Identification of target system operations. Development of global efficiency criterion of target operations // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – Vol. 2. – Issue 2 (74). – PP. 35–40. – doi: 10.15587/1729-4061.2015.38963
6. Lutsenko I. Optimal control of systems engineering. Development of a general structure of the technological conversion subsystem (Part 2) // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – Vol. 1. – Issue 2 (73). – PP. 43–50. – doi: 10.15587/1729-4061.2015.36246
7. Орлов В. Ю. Производство и использование технического углерода. – Ярославль, 2002 – 512 с.
8. Monography making carbon black– 2013. – Режим доступа до ресурсу: <https://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol93/mono93-6.pdf>.
9. Q. Li, M. Li, «Modeling of Heat Network Heating Process», Applied Mechanics and Materials, Vols. 325-326, pp. 1253-1257.
10. System Model of Heat and Mass Transfer Process for Mobile Solvent Vapor Phase Drying Equipment, Shiwei Zhang, Yufang Zhu, Baozhen Qiao, and Zhijun Zhang Volume 2014 (2014), Article ID 267276, 11 pages.
11. The Process Research on VN-Making which Deploy Vanadium Pentoxide Powder, Graphite and Carbon Black in the Lab / A. G. Ning, H. N. Ding, J. J. Ma, H. J. Guo // *Advanced Materials Research*. – 2013. – Vol. 668. – pp. 115–119.
12. The Effect of H<sub>2</sub>S on Hydrogen and Carbon Black Production from Sour Natural Gas / M. Tazimi, S. M. Javadi, S. S. Nabavi // *Applied Mechanics and Materials*. – 2012. – Vols. 110-116. – pp. 2131–2138.
13. Адаптивные динамические системы идентификации и управления в условиях неопределенности / Кориков А. М., Сергеев В. Л. [и др.] // Доклады ТУСУРа, No 2 (22), часть 2, декабрь 2010 – Режим доступа: <http://www.tusur.ru/filearchive/reports-magazine/2010-2-2/230.pdf>

### IDENTIFICATION OF GRANULATED CARBON BLACK MOISTURE IN A TUBE DRYER FOR CONTROL OPTIMIZATION ON THE MAXIMUM EFFICIENCY CRITERION

I. Konokh, M. Samchishyn, O. Kopaievych

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: [kis\\_sau@mail.ru](mailto:kis_sau@mail.ru)

**Purpose.** To research the process of carbon black drying and to increase stabilization accuracy of humidity of granulated carbon black using identification of carbon black states at separated sections of drying tube by indirect measuring based on computational model. **Methodology.** We have led out researches of operating modes of manufacturing equipment at Kremenchug Carbon Black Plant. We have systematized factors which complicated automatic stabilization of humidity by leading out full-scale experiments. Also, using these experiments, we have identified processes influenced on drying and heating of raw material. As result of identification we got imitation model implemented on the base of MATLAB package. **Results.** We have developed identification method of raw material temperature and humidity at 7 separated sections of drying tube using indirect way based on measurement of accessible process variables and obtained imitation model. We have carried out control measurement for evaluation of identification model accuracy: divergence between model and real results was within 6-10%. For the class of continuous technological processes drying carbon black, a product model has been built that ensures the calculation of all relevant parameters, allowing global optimization controls in terms of maximum efficiency. **Originality.** For the thirteenth time, we have developed

---

mathematical model of granulated carbon black drying under technical features of Kremenchug Carbon Black Plant. Obtained imitation model allows identifying weight, humidity and temperature of raw material subject to operating features of each type of burners. **Practical value.** We have realized the indirect control of carbon black states throughout drying tube using identification model and developed predictor control of humidity with increased accuracy.

**Key words:** carbon black, drying, identification model.

#### REFERENCES

1. Berezkin, V.I. (2013), Uglyrod: zamknutyte nanochastitsy, makrostruktury, materialy, ARTEGO, St. Petersburg, Russia.
2. (2013), Aashicarbon: Carbon black manufacturing, available at: [http://www.asahicarbon.co.jp/global\\_site/product/cb/manufacturing.html](http://www.asahicarbon.co.jp/global_site/product/cb/manufacturing.html) (accessed January 25, 2017).
3. Ivanovskiy, V.I. (2004), *Tekhnicheskii uglyrod. Protsessy i apparaty*, Omsk, Russia.
4. Kirk, E. (2004), *Optimal Control Theory: An Introduction* (Dover Books on Electrical Engineering), Dover Publications, New York, USA.
5. Lutsenko, I. (2015), "Identification of target system operations. Development of global efficiency criterion of target operations", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2, issue 2 (74), pp. 35-40. doi: 10.15587/1729-4061.2015.38963
6. Lutsenko, I. (2015), "Optimal control of systems engineering. Development of a general structure of the technological conversion subsystem (Part 2)", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, issue 2 (73), pp. 43-50. doi: 10.15587/1729-4061.2015.36246
7. Orlov, V.Yu. (2002), *Proizodstvo i ispol'zovanie tekhnicheskogo uglyroda*, Yaroslavl, Russia.
8. (2006), Carbon black, titanium dioxide, and talc, *IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, Lyon, France, available at: <https://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol93/mono93-6.pdf> (accessed January 12, 2017).
9. Li, Q. and Li, M. (2013), "Modeling of Heat Network Heating Process", *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 325-326, pp. 1253-1257.
10. Shiwei Zhang, Yufang Zhu, Baozhen Qiao, and Zhijun Zhang (2014), "System Model of Heat and Mass Transfer Process for Mobile Solvent Vapor Phase Drying Equipment", *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2014 (2014), Article ID 267276, 11 p.
11. Ning, A.G., Ding, H.N., Ma, J.J. and Guo, H.J. (2013), "The Process Research on VN-Making which Deploy Vanadium Pentoxide Powder, Graphite and Carbon Black in the Lab", *Advanced Materials Research*, Vol. 668, pp. 115-119.
12. Tazimi, M., Javadi, S.M. and Nabavi, S.S. (2012), "The Effect of H<sub>2</sub>S on Hydrogen and Carbon Black Production from Sour Natural Gas", *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 110-116, pp. 2131-2138.
13. Korikov, A.M., Sergeev, V.L., Sevostyanov, D.V., Sergeev, P.V. and Anikanov, A.S. (2010), "Adaptive dynamic systems for identification and control under uncertainty", *Proceedings of TUSUR University*, No. 2 (22), part 2, available at: <http://www.tusur.ru/filearchive/reports-magazine/2010-2-2/230.pdf> (accessed January 12, 2017).

Стаття надійшла 07.10.2016.