

УДК 662.74.001.5

Г.И. Гринь^а, О.В. Кутовая^б, Д.С. Кутовой^а, И.В. Шульга^с

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДОГО ПРОДУКТА ТЕРМОЛИЗА

^а Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»^б Национальный фармацевтический университет, г. Харьков^с Государственное предприятие «Украинский государственный научно-исследовательский углехимический институт (УХИН)», г. Харьков

В статье рассматриваются вопросы оптимизации технологического процесса газификации угля. Анализируется подход к решению проблемы неудовлетворительности результатов анализа, полученных методом регрессии. Уравнения регрессии позволяют получать более детальную информацию о влиянии технологических параметров процесса на каждый по отдельности, заранее выбранный технологический показатель (критерий) и дают возможность оптимизировать этот показатель. Такой подход во многих практических задачах не дает удовлетворяющих результатов, так как в большинстве случаев требуется создание системы, наилучшей по совокупности нескольких критериев одновременно. Подход к решению данной проблемы основан на теории многокритериальной векторной оптимизации, который предполагает определение идеальной точки в пространстве критериев и введении нормы приближения к идеальной точке в этом пространстве. Полученное при этом решение обеспечивает максимальную близость критериев к своим наилучшим значениям. В результате использования данного подхода определены оптимальные значения технологических параметров, которые в наилучшей и равной степени приближают все анализируемые характеристики процесса газификации угля к заданным значениям. Использование метода многокритериальной векторной оптимизации даёт возможность быстро и точно определять оптимальные параметры для систем со многими переменными. Это даст ощутимую пользу для различных производственных, проектировочных, научных и других расчетов.

Ключевые слова: газификация, термолиз, функции отклика, уравнения регрессии, векторная оптимизация.

Введение

В настоящее время для решения задач оптимизации в каком-либо технологическом процессе, в том числе и газификации топлива, широко используется регрессионный анализ. Несмотря на детальность уравнений регрессии по отношению к каждому параметру, они не дают цельной картины. Сформулировать все требования к объекту исследования в одном уравнении невозможно и это обуславливает необходимость выражения отдельных качественных требований в виде системы уравнений регрессии, которая является по своей сути векторным критерием качества. Отсюда и возникает математическая проблема одновременной оптимизации совокупности уравнений регрессии, каждое из

которых отдельно оценивает определенное качество системы.

Анализируя литературные источники в области теории векторной оптимизации, мы остановились на подходе к решению задачи многокритериальной векторной оптимизации, основанной на идее определения идеальной точки в пространстве критериев качества и введении нормы приближения к идеальной точке в этом пространстве [1]. Полученное при этом решение обеспечивает максимальную близость критериев качества к своим наилучшим значениям. Указанный подход освобожден от выбора весовых коэффициентов, что в большинстве случаев затрудняет решение задачи.

Следует отметить, что от выбора меры при-

ближения к идеальной точке существенно зависит окончательный вид решения задачи векторной оптимизации и вопрос выбора такой меры должен быть тщательно изучен при рассмотрении каждой конкретной задачи.

В нашем случае функцией приближения может служить норма, которая является суммой квадратов отклонений функционалов от своих достижимых оптимальных значений, на определение которых накладываются вводимые исследователем ограничения. Принцип поиска решений базируется на минимизации степени приближения в пространстве критериев оптимальности.

Теория

Ранее, в результате проделанной авторами работы [2] были получены уравнения регрессии, адекватно описывающие процесс термоллиза. Анализ этих уравнений показывает, что влияние различных технологических параметров (x_1 – расход воздуха; x_2 – расход пара; x_3 – температура в реакционной зоне; x_4 – время пребывания материала в реакционной зоне) на характеристики процесса газификации ($y_1(x_1, x_2, x_3, x_4)$ – выход газа, м³/кг полукокса; $y_2(x_1, x_2, x_3, x_4)$ – влажность газа, г/м³; $y_3(x_1, x_2, x_3, x_4)$ – низшая теплота сгорания, ккал/м³; $y_4(x_1, x_2, x_3, x_4)$ – плотность газа, г/м³; $y_5(x_1, x_2, x_3, x_4)$ – степень конверсии углерода, %; $y_6(x_1, x_2, x_3, x_4)$ – степень конверсии водяного пара, %) взаимосвязано, о чем свидетельствует значительное количество нелинейных слагаемых в уравнениях регрессии, полученных для кодированных значений переменных:

$$y_1(x_1, x_2, x_3, x_4) = 4.45 - 0,1 \cdot x_3 + 0,072 \cdot x_4 + 0,051 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,057 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,059 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0,049 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 - 0,058 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 ;$$

$$y_2(x_1, x_2, x_3, x_4) = 104 + 26 \cdot x_2 + 10 \cdot x_3 - 7 \cdot x_4 + 4 \cdot x_2 \cdot x_3 - 3 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + 3 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 ;$$

$$y_3(x_1, x_2, x_3, x_4) = 953 - 113 \cdot x_1 + 12 \cdot x_2 + 72 \cdot x_4 - 13 \cdot x_1 \cdot x_2 - 25 \cdot x_1 \cdot x_3 + 13 \cdot x_1 \cdot x_4 + 25 \cdot x_2 \cdot x_4 - 15 \cdot x_2 \cdot x_3 + 11 \cdot x_3 \cdot x_4 - 26 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + 10 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + 24 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + 27 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 ;$$

$$y_4(x_1, x_2, x_3, x_4) = 1171 + 12 \cdot x_1 + x_2 - 9 \cdot x_4 + 2 \cdot x_2 \cdot x_3 + x_3 + x_4 + 2 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + 3 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 ;$$

$$y_5(x_1, x_2, x_3, x_4) = 91,85 - 2,15 \cdot x_1 + 1,5 \cdot x_2 - 0,15 \cdot x_3 + 3,65 \cdot x_4 - 0,1 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,1 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,1 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0,1 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0,1 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,1 \cdot x_3 \cdot x_4 - 0,1 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 ;$$

$$y_6(x_1, x_2, x_3, x_4) = 35 - 7,6 \cdot x_2 - 4,2 \cdot x_3 + 3,5 \cdot x_4 - x_2 \cdot x_4 - 0,9 \cdot x_2 \cdot x_3 - 1,2 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 .$$

Область решений этой системы уравнений ограничена диапазонами изменения переменных от их минимального значения до максимального в кодированном виде: $-1 \leq x_i \leq 1$. В этой области существует множество значений для переменных (x_1, x_2, x_3, x_4), которые могут обеспечить существование анализируемых технологических показателей в заданных пределах. В частности, технологический режим должен обеспечить устойчивую длительную работу установки с высокими технико-экономическими показателями. Для этого необходимо следующее. Приход тепла в установке должен несколько превышать расход, с тем, чтобы тепловые потери составляли не более 11% [3]. Время пребывания материала в реакционной зоне должно обеспечивать степень конверсии углерода в парогазовые продукты не менее 95%. Температура в реакционной зоне должна обеспечивать работоспособность конструкционных материалов используемого оборудования. Эти пределы следует определять для конкретных направлений использования генераторного газа. Следует отметить, что исследователь приходит к окончательному решению путем перебора возможных вариантов. При наличии более трех переменных, приходится определять область допустимых решений методом «проб и ошибок», так как трехмерная система координат ограничивает визуальное определение правильности заявленных условий.

Нами предлагается следующий подход к определению области возможных решений и выбора единственного решения из допустимого множества.

В нашем случае мы имеем шесть целевых функций с соответствующими областями решений, которые определяются введенными ограничениями по переменным. Из этой области необходимо выбрать одно, которое в равной степени удовлетворяло бы каждой их функций. Такая ситуация приводит к возможности рассматривать решаемую задачу как задачу векторной (многокритериальной) оптимизации.

Поведение анализируемой системы с математической точки зрения можно охарактеризовать четырехмерным вектором $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ и оценить шестимерной вектор-функцией $Y(X) = \{y_1(X), y_2(X), y_3(X), y_4(X), y_5(X), y_6(X)\}$, компоненты которой являются существующими функциями переменной X . Для определения оптимальных значений вектора X , по нашему мнению, можно использовать функцию $R(x_1, x_2, x_3, x_4)$, которая является суммой квадратов отклонений функционалов от своих оптимальных значений – безусловных или условных экстремумов, определенных по уравнениям регрессии при установленных ограничениях по x_1, x_2, x_3, x_4 .

Значения переменных x_1, x_2, x_3, x_4 , которые соответствуют минимуму функции $R(x_1, x_2, x_3, x_4)$ и будет оптимальным решением данной системы уравнений, которое ухудшает каждую отдельную функцию отклика, но это ухудшение распределяется по всему множеству откликов $Y(X)$ и является минимально возможным.

Если исследователь отдаёт предпочтение какому-либо из технологических показателей, то безусловный экстремум соответствующей функции меняется на условный, который основывается на экспериментальных данных [3–5].

Экспериментальная часть

В данной работе на систему регрессионных уравнений накладывались следующие ограничения по переменным: расход воздуха – $300 \leq x_1 \leq 500$, дм^3 на 100 г твердого продукта; расход пара – $60 \leq x_2 \leq 80$, г на 100 г твердого продукта; температура в реакционной зоне – $800 \leq x_3 \leq 1000$, $^\circ\text{C}$; время пребывания материала в реакционной зоне – $40 \leq x_4 \leq 60$, мин. Параметры процесса на выходе должны соответствовать следующим требованиям: низшая теплота сгорания газа должна быть максимальной; влажность газа – минимальной; выход газа – максимальным; плотность газа – максимальной; степень конверсии углерода – не менее 95%; степень конверсии водяного пара – максимальной.

Все расчеты проводились с помощью компьютерной программы Mathcad. Алгоритм расчетов включал следующие действия: определе-

ние регрессионных уравнений $y_i(X)$ на основе экспериментальных данных с помощью метода наименьших квадратов; поиск соответствующих минимальных или максимальных значений $y_i(X)$; определение вектора X , удовлетворяющего каждому $y_i(X)$ в равной степени для заданных условий.

Результаты и их обсуждение

Максимальное значение выхода газа находится в точках $y_1(1;1;-1;1)$ и составляет $4,896 \text{ м}^3/\text{кг}$ полукокса. Такой выход газа будет соответствовать расходу воздуха 500 г на 100 г твердого продукта и расходу пара 80 г на 100 г твердого продукта. Температура в реакционной среде поддерживается минимальной – 800°C при максимальной длительности процесса – 60 мин.

На влажность полученного газа существенно влияют расход водяного пара, температура и длительность процесса, от расхода воздуха в пределах исследуемого диапазона этот параметр практически не зависит. Минимальное значение влажности газа – $65 \text{ г}/\text{м}^3$ достигается при минимальном расходе пара и составляет 60 г на 100 г твердого продукта, минимальной температуре реакционной среды – 800°C и максимальной длительности процесса – 60 мин.

Максимальное значение низшей теплоты сгорания газа – $1169 \text{ ккал}/\text{м}^3$ приходится на точки $y_3(-1;1;-1;1)$, в которых расход воздуха соответствует минимальному значению и составляет 300 г на 100 г твердого продукта, расход пара максимален – 80 г на 100 г твердого продукта, температура в реакционной среде поддерживается минимальной – 800°C при максимальном времени – 60 мин.

Наибольшее значение плотности газа – $1194 \text{ кг}/\text{м}^3$ находится в точках $y_4(1;1;-1;-1)$, в которых расход воздуха составляет 500 г на 100 г твердого продукта, расход пара максимальный – 80 г на 100 г твердого продукта, температура в реакционной среде минимальна – 800°C , при времени сжигания газа – 40 мин.

Степень конверсии углерода достигает своего максимального значения 99,4% в предельных точках $y_5(-1;1;-1;1)$ при минимальном расходе воздуха 300 г на 100 г твердого продукта, максимальном расходе пара – 80 г на 100 г твердого продукта, минимальной температуре в реакционной среде 800°C , максимальном времени сжигания газа 60 мин.

Степень конверсии водяного пара соответствует максимальному значению 51,6% в предельных точках $y_6(1;-1;-1;1)$ при максимальном расходе воздуха 500 г на 100 г твердого продук-

та, минимальном расходе пара – 60 г на 100 г твердого продукта, минимальной температуре в реакционной среде 800°C, максимальном времени сжигания газа 60 мин.

Рассмотренный выше подход многокритериальной векторной оптимизации к определению единственного решения из множества возможных, реализуется в виде системы математических выражений:

$$\left\{ \begin{array}{l} R(x_1, x_2, x_3, x_4) = \left(\frac{y_1(x_1, x_2, x_3, x_4)}{4,896} - 1 \right)^2 + \left(\frac{y_2(x_1, x_2, x_3, x_4)}{65} - 1 \right)^2 + \left(\frac{y_3(x_1, x_2, x_3, x_4)}{1169} - 1 \right)^2 + \\ + \left(\frac{y_4(x_1, x_2, x_3, x_4)}{1194} - 1 \right)^2 + \left(\frac{y_5(x_1, x_2, x_3, x_4)}{99,4} - 1 \right)^2 + \left(\frac{y_6(x_1, x_2, x_3, x_4)}{51,6} - 1 \right)^2; \\ -1 \leq x_1 \leq 1; \quad -1 \leq x_2 \leq 1; \quad -1 \leq x_3 \leq 1; \quad -1 \leq x_4 \leq 1; \\ 4 \leq y_1(x_1, x_2, x_3, x_4) \leq 5; \quad 62 \leq y_2(x_1, x_2, x_3, x_4) \leq 150; \\ 780 \leq y_3(x_1, x_2, x_3, x_4) \leq 1170; \quad 1140 \leq y_4(x_1, x_2, x_3, x_4) \leq 1220; \\ 95 \leq y_5(x_1, x_2, x_3, x_4) \leq 100; \quad 17 \leq y_6(x_1, x_2, x_3, x_4) \leq 53; \\ R(x_1, x_2, x_3, x_4) = \min. \end{array} \right.$$

Результаты вычислений позволили определить точку, в которой функция приближения будет иметь минимальное значение – $R(-1; -1; -1; 1)$. В этом случае значения основных технологических параметров стадии газификации должны быть следующими (в расчете на 1 т продукта термолиза): расход воздуха – 3000 м³, расход пара – 600 кг, температура в реакционной среде – 800°C, длительности процесса – 60 мин. Полученные параметры процесса, которые соответствуют вектору $X = \{-1; -1; -1; 1\}$, должны обеспечить выход газа – $y_1(X) = 4,684$ м³/кг полукокса, влажность газа – $y_2(X) = 65,0$ г/м³, низшую теплоту сгорания – $y_3(X) = 1057$ ккал/м³, плотность газа – $y_4(X) = 1156$ г/м³; степень конверсии углерода – $y_5(X) = 96,4\%$, степень конверсии водяного пара – $y_6(X) = 49,2\%$.

Выбор оптимального решения на основе предлагаемой методики является адекватной альтернативой поиску решения, которое основывается на опыте исследователя. Кроме того, методика имеет ряд преимуществ:

1 – нет необходимости устанавливать область существующих решений, удовлетворяющих всем функциям отклика (особенно это актуально для трех и более переменных, когда нет возможности визуально определить область допустимых решений);

2 – нет необходимости проводить большое количество вычислений в области допустимых решений для определения всех функций откли-

ка;

3 – исключен трудоемкий сравнительный анализ возможных вариантов перед окончательным выбором решения;

4 – эффективный поиск единственного решения из множества возможных;

5 – возможность поиска решения в заданных диапазонах существования показателей качества как с позиции их равнозначности, так и с учетом их иерархии.

Выводы

Разработана методика поиска оптимальных технологических параметров процесса газификации твердого продукта термолиза на основе теории многокритериальной векторной оптимизации. В результате расчетов были определены значения основных технологических параметров стадии газификации, которые в равной степени приближают параметры стадии газификации, а именно: (в расчете на 1 т продукта термолиза): расход воздуха – 3000 м³, расход пара – 600 кг, температура в реакционной среде – 800°C. Время пребывания углеродистого материала в реакционной зоне 60 мин обеспечивает степень конверсии углерода 96,4%.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Салуквадзе М.Е. Задачи векторной оптимизации в теории управления. – Тбилиси: Мецниереба, 1975. – 202 с.
2. Оптимизация параметров экстрагирования лекарственного растительного сырья для получения сложной настойки «Венотон» / Кутова О.В., Рубан Е.А., Куценко С.А., Ковалевская И.В. // Вестник фармации. Белоруссия. – 2014. – № 2. – С.37-41.
3. Моделирование процесса газификации твердого продукта термоліза малометаморфизованных углей. Определение оптимальных параметров процесса / Шульга И.В., Скляр М.Г., Миненко Е.В., Васильев А.В., Кувшинов В.Е. // Кокс и химия. – 1999. – № 6. – С.8-12.
4. Оптимизация состава многокомпонентной лекарственной смеси / Кутова О.В., Ковалевская И.В., Шаповалов А.В., Маркова Н.Б. // Вестник национального политехнического университета «ХПИ»: сб. научн. тр., тематический выпуск «Химия, химическая технология и экология». – 2008. – С.144-148.
5. Оптимизация состава массы для инкапсулирования капсул «Венотон»/ Кутова О.В., Куценко С.А., Ковалевская И.В., Рубан Е.А. // Фундаментальные исследования. – 2013. – часть 13. – № 10. – С.2887-2890.

Поступила в редакцию 15.12.2017

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ГАЗИФІКАЦІЇ ТВЕРДОГО ПРОДУКТУ ТЕРМОЛІЗУ

Г.І. Гринь, О.В. Кутова, Д.С. Кутовий, І.В. Шульга

У статті розглядаються питання оптимізації технологічного процесу газифікації вугілля. Аналізується підхід до вирішення проблеми незадовільне результатів аналізу, отриманих методом регресії. Рівняння регресії дозволяють отримувати більш детальну інформацію про вплив технологічних параметрів процесу на кожен окремий, заздалегідь обраний технологічний показник (критерій) і дають можливість оптимізувати цей показник. Такий підхід у багатьох практичних задачах не задовольняє потреби, так як в більшості випадків потрібне створення системи, найкращою за сукупністю кількох критеріїв одночасно. Підхід до вирішення даної проблеми заснований на теорії багатокритеріальної векторної оптимізації, який передбачає визначення ідеальної точки в просторі критеріїв і веденні норми наближення до ідеальної точки в цьому просторі. Отримане при цьому рішення забезпечує максимальну близькість критеріїв до своїх найкращих значень. В результаті використання даного підходу визначені оптимальні значення технологічних параметрів, які в найкращою і рівною мірою наближають всі аналізовані характеристики процесу газифікації вугілля до заданих значень. Використання методу багатокритеріальної векторної оптимізації дає можливість швидко і точно визначити оптимальні параметри для систем з багатьма змінними. Це дасть відчутну користь для різних виробничих, проектувальних, наукових та інших розрахунків.

Ключові слова: газифікація, термоліз, оптимізація, функції відгуку, рівняння регресії, векторна оптимізація.

DETERMINATION OF THE OPTIMAL PARAMETERS FOR THE PROCESS OF GASIFICATION OF SOLID THERMOLYSIS PRODUCT

G.I. Gryn^a, O.V. Kutovaya^b, D.S. Kutovyi^a, I.V. Shulga^c

^a National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

^b National University of Pharmacy, Kharkiv, Ukraine

^c Ukrainian State Research Institute for Carbochemistry, Kharkiv, Ukraine

The article deals with the optimization of the technological process of coal gasification. The approach to the solution of the problem of unsatisfactory results of the analysis obtained by the regression method is analyzed. Regression equations allow receiving more detailed information on the influence of technological parameters of process on each pre-selected technological indicator (criterion) and optimizing this indicator. This approach does not provide satisfactory results in many practical problems, since it is necessary in most cases to create a system that is the best in the aggregate of several criteria simultaneously. The approach to solving this problem is based on the theory of multicriterion vector optimization, which involves determining the ideal point in the space of the criteria and maintaining the norm of approximation to the ideal point in this space. The obtained solution ensures maximum closeness of the criteria to their best values. As a result of using this approach, optimal values of technological parameters are determined which approximate all the analyzed characteristics of the coal gasification process to the given values. By using the multicriterion vector optimization method, it is possible to quickly and accurately determine the optimal parameters of systems with many variables. This will provide tangible benefits for various productions, design, scientific and other calculations.

Keywords: gasification; thermolysis; optimization; response functions; regression equations; vector optimization.

REFERENCES

1. Salukvadze M.E., *Zadachy vektornoj optymyzatsii v teorii upravleniya* [The problems of vector optimization in control theory]. Metsnyereba, Tbylysy, 1975. 202 p. (in Russian).
2. Shulga I.V., Sklyar M.G., Minenko E.V., Vasylyev A.V., Kuvshynov V.E. *Modelirovanie protsessa gazifikatsii tverdogo produkta termoliza malomet-amorfizovannykh ugley. Opredelenie optimalnykh parametrov protsessa* [Modeling of gasification process of solid product of thermolysis of low-metamorphosed coals. Determination of optimal process parameters]. *Coke and Chemistry*, 1999, no. 6, pp. 8-12.
3. Kutovaya O.V., Ruban E.A., Kutsenko S.A., Kovalevskaya I.V. *Optimizatsiya parametrov ekstragirovaniya lekarstvennogo rastitelnogo syr'ya dl'ya polucheniya slozhnoi nastoiki «Venoton»* [Optimization of parameters of extraction of medicinal vegetative raw materials to obtain complex tincture «Venoton»]. *Vestnik Farmatsii. Belorussiya*, 2014, no. 2, pp. 37-41. (in Russian).
4. Kutovaya O.V., Kovalevskaya I.V., Shapovalov A.V., Markova N.B. *Optimizatsiya sostava mnogokomponentnoi lekarstvennoi smesi* [Optimization of the composition of a multicomponent drug mixture]. *Vestnik Natsionalnogo Politehnicheskogo Universiteta «KhPI», Khimiya, Khimicheskaya Tekhnologiya i Ekologiya*, 2008, pp. 144-148. (in Russian).
5. Kutovaya O.V., Kutsenko S.A., Kovalevskaya I.V., Ruban E.A. *Optimizatsiya sostava massy dl'ya inkapsulirovaniya kapsul «Venoton»* [Optimization of mass composition to encapsulate capsules «Venoton»]. *Fundamentalnye Issledovaniya*, 2013, part 13, no. 10, pp. 2887-2890. (in Russian).