

УДК 66.011+004.896

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА КОКСОВАНИЯ УГЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА СИМВОЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ

Ярошенко Е.А., Секирин А.И.

Донецкий национальный технический университет

Коксование представляет собой сложный двухфазный процесс, складывающийся из процессов теплопередачи, диффузии и большого количества разнообразных химических реакций [1].

Сырьем для коксования служит смесь – шихта, состоящая не только из коксующихся углей, но и углей других марок. Например, шихта из донецких углей имеет примерно следующий состав: газовых углей 20%, жирных 40%, коксовых 20%, и отошенных спекающихся 20%. Включение в шихту угля различных марок позволяет расширить сырьевую базу коксохимической промышленности, получить качественный кокс и обеспечить высокий выход смолы, бензола и коксового газа.

Актуальность данной темы определена тем, что технология коксования при заданной производительности коксовых печей является достаточно консервативным и трудно управляемым в смысле воздействия на качество фактором, и, естественно предположить, что реальным объектом воздействия на качество кокса являются ресурсы угля. Таким образом, чтобы получить кокс требуемого качества необходимо сформировать шихту с определенными свойствами.

На сегодняшний день проведено уже достаточно много исследований, посвященных изучению зависимостей параметров технологического процесса. В основном исследования производились с использованием либо математических моделей, основанных на аналитических уравнениях, либо с помощью статистических методов, предоставляющих в результате модель в виде уравнения регрессии.

Следует заметить, что каждая из этих моделей имеет ряд недостатков, поэтому выбран метод символьной регрессии генетического программирования.

Качество полученного кокса зависит в значительной мере от подготовки углей и правильности составления угольной шихты [2]. На коксохимические заводы уголь поступает обычно со многих шахт и углеобогатительных фабрик, и специалист должен не только знать свойства и состав углей, но и умело составлять из них смесь, которая дает наилучший кокс. Составление угольных шихт для коксования (шихтование) производится эмпирически. Одно из основных требований к качеству кокса — высокая прочность при достаточной крупности.

Основные характеристики, описывающие шихту (входные параметры модели):

1. зольность (7-10%),
2. сернистость (0,5-3%),
3. влажность (4-10%),
4. марка угля.

Основные характеристики, описывающие кокс (выходные параметры модели):

1. зольность (9-12%),
2. сернистость (1,6-2%),
3. структурная прочность (65-85%),
4. выход летучих веществ (1-2%),
5. общая пористость (45-55%),
6. реакционная способность (0,47-0,82 мл/(г*с)).

Пусть множество $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ представляет характеристики шихты.

Требуется найти набор аппроксимирующих функций вида:

$$Y_i^* = f(X), \quad (1)$$

где Y_i^* — расчетное значение зависимой переменной, т.е. одного из показателей готового кокса;

X – факторы, показатели шихты.

При этом задача сводится к оптимизационной задаче – минимизации квадратичной ошибки:

$$f_{\text{ц}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - Y_i^*)^2}}{N} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где f – ошибка аппроксимации;

Y_i – априорное значение выходного параметра;

Y_i^* – расчетное значение выходного параметра;

N – размер выборки.

Метод решения задачи – метод символьной регрессии генетического программирования [3,4], который предложен вследствие своих преимуществ по сравнению с другими методами моделирования. Данный метод является эволюционным методом [4], т.к. он основан на процессе естественной эволюции, который развивается в процессе работы алгоритма решения, которые

Таблица 1

Ограничения на значения показателей

Обозначение	Описание	Ограничение
x_1	влажность шихты	$0 \leq x_1 \leq 0.15$
x_2	зольность шихты	$0 \leq x_2 \leq 0.15$
x_3	сернистость шихты	$0 \leq x_3 \leq 0.05$
x_4	процентное вхождение i -ой марки угля в шихту	$0 \leq x_{4i} \leq 1, i = \overline{1, k}$, где k – количество используемых марок угля; $\sum_{i=1}^k x_{4i} = 1$
y_1	прочность кокса	$0 \leq y_1 \leq 1$
y_2	зольность кокса	$0 \leq y_2 \leq 0.15$
y_3	сернистость кокса	$0 \leq y_3 \leq 0.05$
y_4	выход летучих веществ кокса	$0 \leq y_4 \leq 0.05$

представляют собой математические формулы.

Задачей метода символьной регрессии является нахождение такого математического выражения функциональной зависимости, которое с минимальной погрешностью аппроксимирует заданные выборкой значения.

Практическая ценность работы заключается в том, что моделирование технологического процесса коксования углей позволяет получать оценки значений выходных параметров процесса коксования и определять значения параметров технологического процесса. Проведение на модели анализа различных вариантов значений параметров дает возможность разработать практические рекомендации, которые обеспечивают эффективность процесса коксования.

Использование модифицированного генетического алгоритма совместно с аналитической моделью в качестве функции оценки пригодности потенциальных решений позволяет получать субоптимальные значения параметров технологического процесса коксования.

Следует отметить, что для формирования особи (математического выражения) должно быть определено функциональное (набор операторов (действий), которые можно выполнять над терминальным множеством) и терминальное множество (набор терминалов: значений факторов (X) и констант) [4].

Для данной задачи определены такое функциональное множество: «+, −, *, /, ^ (возведение в степень), exp» и такое терминальное множество: значения факторов и вещественных констант из интервала [-5,5].

Для представления особи использована древовидная структура [4] (рис. 1).

Каждый узел дерева представляет собой либо терминал (переменную, константу), либо символ функции. На функции накладывается ограничение по количеству параметров - не более двух. Если в узле записан символ функции, то узел должен иметь

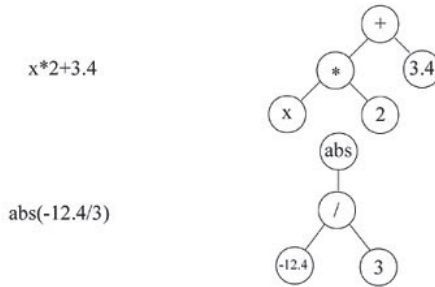


Рисунок 1 – Древоподобное кодирование особей

потомков – аргументы функции, т.е. терминалы. Оконечные узлы – это всегда терминалы.

Настраиваемые параметры алгоритма: вероятность кроссинговера, вероятность мутации, процент «элиты», количество итераций алгоритма или точность решения, размер популяции, вероятность выбора константы в качестве терминала, вероятность терминального кроссинговера, максимальная глубина дерева-хромосомы.

Значение пригодности каждой особи (т.е. ее значение целевой функции) определяется как среднеквадратическая ошибка, полученная в результате аппроксимации данной особью-формулой данных обучающей выборки.

$$f_u = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - Y_i^*)^2}}{N} \rightarrow \min \quad (3)$$

В начале работы алгоритма необходимо произвести инициализацию популяции особей. Общим для всех представлений является ограничение на глубину дерева.

Для инициализации особей применяются два метода [4]. Первый - метод роста деревьев: дерево начинает строиться с корня, запись в узел производится случайным образом из множества, включающего терминальное и функциональное множество. Если выбирается функция, то процесс рекурсивно продолжается

для ее потомков. Второй метод – полный метод: строится дерево аналогично методу роста, но узел выбираются только из множества функций, пока дерево не достигнет заданной глубины. Затем заполняются оконечные узлы из множества переменных и констант.

Использование только полного метода инициализации способствует вырождению генетического материала и преждевременной сходимости [4]. Поэтому применяется комбинированный метод. Популяция делится на 2 равные части, половина деревьев строится по методу роста, другая - по полному методу.

Условием завершения алгоритма является неизменение наилучшего решения в течение последних 5 итераций алгоритма или выполнение алгоритмом заданного количества итераций.

Для определения относительной пригодности особи (в %) использован метод линейного ранжирования [4], т.к. он применим без модификаций для задачи минимизации и не требует масштабирования для предотвращения преждевременной сходимости. Выбор пары для кроссинговера осуществляется с помощью пропорционального отбора (т.н. метода «рулетки»).

Оператор кроссинговера для древовидного представления осуществляется либо обменом узлами, либо обменом поддеревьями. Случайным образом выбирается 2 особи, а затем узел в одном дереве и в другом дереве. Для обмена поддеревьями требуется убедиться, что поддеревья взаимозаменяемы, иначе – продолжать подбор особи. Для узлового оператора производится обмен узлами, для кроссинговера поддеревьев – поддеревья отделяются в соответствующих узлах, и ставятся на место соответствующего поддерева в другом дереве. На рис. 2 представлено образование потомка методом обмена поддеревьев особей-родителей.

Перед выполнением оператора кроссинговера поддеревьями проверяется размер ожидаемых потомков, и с учетом этой проверки выполняется или отменяется обмен.

Мутация хромосом представлена 3 видами: узловая,

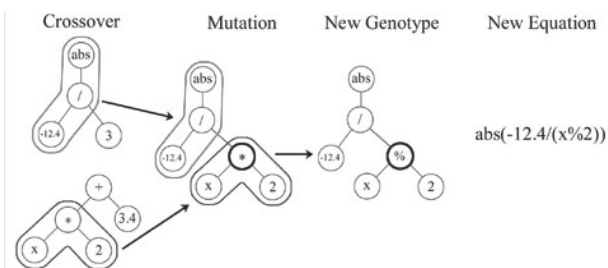


Рисунок 2 – Выполнения оператора кроссингвера и узловой мутации

усекающая и растущая. Растущей мутации отдается предпочтение, т.к. этот оператор обладает большими возможностями [4]. При выполнении оператора мутации также проверяется размер мутировавшей особи.

Для формирования новой популяции из текущего поколения с учетом потомков и мутированных особей применяются 2 метода. Первый – элитарная схема, заключающийся в копировании определенного количества особей с наилучшими значениями фитнес-функции в последующую популяцию. Второй метод – пропорциональный отбор.

Программная реализация метода моделирования на базе ГП выполнена в среде разработки приложений C++ Builder 6.0.

Программа позволяет пользователю выбрать зависимую переменную, количество факторов и факторы, получить модель коксохимического процесса и проверить ее адекватность на проверочном множестве данных.

В результате проведенных экспериментальных исследований с использованием реальных производственных данных определена достаточно высокая степень адекватности модели объекту (погрешность составляет не более 17%).

Исследования проводились на экспериментальных данных о сернистости кокса и 5 параметров шихты: влажности, зольности, сернистости, выхода летучих веществ и помола шихты.

Качество функционирования алгоритма в значительной

степени зависит от эффективного применения оператора кроссинговера. Поэтому данный параметр был исследован (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что значение параметра «вероятность кроссинговера» необходимо выбирать из промежутка [50;70] % с целью минимизировать ошибку аппроксимации.

Исследование показало, что наиболее эффективным значением параметра ГА «мощность популяции» является значение из диапазона [50; 80] особей, т.к. именно в этом промежутке наблюдается минимум ошибки аппроксимации.

В данной работе была рассмотрена актуальность проблемы моделирования и оптимизации процесса коксования угля, сделан

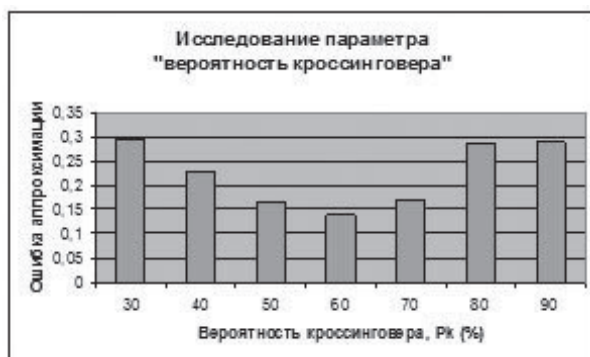


Рисунок 3 – Исследование параметра «вероятность кроссинговера»

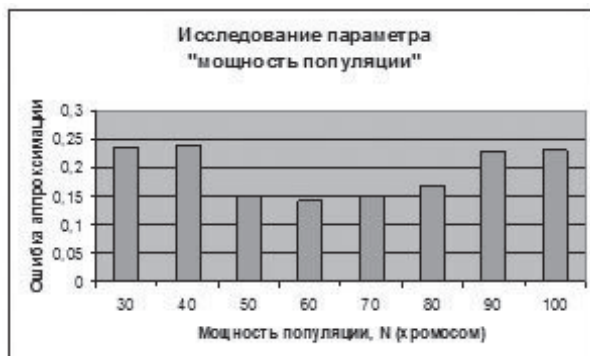


Рисунок 4 – Исследование параметра «мощность популяции»

обзор существующих методов решения данной проблемы, разработан алгоритм эволюции, определены параметры алгоритма эволюции, разработана программная реализация метода решения – метода символьной регрессии. Также проведена проверка адекватности полученной модели и выполнены экспериментальные исследования с целью определить рациональные значения параметров алгоритма эволюции. Проведенные исследования показали целесообразность применения данного подхода в моделировании коксохимического процесса.

Литература

- [1] Лейбович Р.Е. Технология коксохимического производства / Лейбович Р.Е., Яковлева Е.И., Филатов А.Б. – М.: Металлургия, 1982
- [2] Шубеко П.З. Непрерывный процесс коксования / П.З. Шубеко, Г.И. Еник – М.: “Металлургия”, 1974.
- [3] Zelinka I. Symbolic regression - an overview / I. Zelinka. – Tomas Bata University Zlin, 2002.
- [4] Основы эволюционных вычислений: учебное пособие для вузов/ Скобцов Ю.А. Донецк. нац. техн. ун-т. – Донецьк: ДонНТУ, 2008. – 326с.