

УДК 674.047

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ДРЕВЕСНЫХ ПЕЛЛЕТ НА ОСНОВЕ АКТИВНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Зотова Е.В.

ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия», Воронеж, Россия (394087, Воронеж, ул. Тимирязева, 8), e-mail: zev.23021980@yandex.ru

Представлены результаты математической идентификации выходных целевых функций процесса производства биотоплива в виде пеллет из отходов древесины. Был разработан план активных производственных экспериментов с учетом специфических особенностей применяемого промышленного оборудования, технической характеристики, а также определенных свойств сырья. На основе активных производственных экспериментов при достаточно широком варьировании режимных параметров получена объективная информация о выходных целевых функциях или технико-экономических показателях рассматриваемого процесса. При этом были учтены параметры, объективно изменяющиеся по вероятностным законам в реальных достаточно широких диапазонах. Полученные уравнения изменения энергоемкости и механической прочности пеллет, температуры матрицы, производительности применяемого оборудования, себестоимости выпускаемой продукции оказались достаточно адекватными реальному процессу при средней ошибке 0,562 % для всей серии экспериментов для всех вышеуказанных целевых функций. Эти уравнения дают возможность проводить однокритериальную и многокритериальную оптимизацию для повышения эффективности процесса производства пеллет, проведения технико-экономического анализа в производственных условиях с целью оптимизации применяемых режимов и создания математического аппарата для систем автоматического управления оборудованием.

Ключевые слова: моделирование пеллета, процесс, уравнение, эксперимент.

IDENTIFICATION PARAMETERS OF PRODUCTION WOOD PELLETS PROCESS BASED ON ACTIVE PRODUCTION EXPERIMENTS

Zotova E.V.

Voronezh State Academy of Forestry and Technologies, Voronezh, Russia (394087, Voronezh, street Timiryazeva, 8), e-mail: zev.23021980@yandex.ru

The results of mathematical identification of output objective functions of the process of biofuel production in the form of pellets from waste wood are presented. Plan of active industrial experiments was developed, taking into account the specific features of the used industrial equipment, technical specification, as well as certain properties of raw materials. Based on active industrial experiments with sufficient variation of operating parameters, objective information about the output objective function or technical and economic parameters of the process was get. At the same time, parameters, objectively changing according to the laws of probability in real rather wide ranges, were considered. The resulting equations of energy intensity changes and mechanical strength of the pellets, the temperature of the matrix, the performance of the used equipment, production costs were quite adequate to the real process with an average error of 0.562 % for the entire series of experiments for all of the above-mentioned objective functions. These equations make it possible to carry out single-criterion and multi-criteria optimization to enhance the effectiveness of the production process of pellets, feasibility analysis in industrial environment to optimize the possible modes and create mathematical apparatus for automatic control systemsequiment.

Keywords: modelling, pellet, process, equation, experiment.

Задачи эффективной утилизации образующихся древесных отходов, увеличения полезного выхода, повышения общей экологии производства, снижения себестоимости выпускаемых древесных материалов и изделий при их заданном качестве всегда являются актуальными [5]. Актуальность этих задач растет пропорционально как увеличению образующихся древесных отходов от различных технологий, так и росту мировых цен на ископаемые источники энергии [2].

Однако технологические процессы производства биотоплива из древесных отходов имеют значительные сложности в управлении, несмотря на относительную простоту регулирования оборудования. Существенные трудности возникают при определении оптимальных характеристик сырья и условий его хранения, определении режимов, технической настройке оборудования, синхронизации отдельных технологических операций. Не правильные действия становятся причиной снижения общей эффективности производства пеллет. Многие технические, технологические, экономические показатели являются определяющими при принятии решения об организации такого промышленного производства.

Добиться успеха при современном уровне высокой и достаточно устойчивой конкурентной среды на рынке, используя ручное управление такими технологиями, не обладая достоверной информацией о свойствах процесса пеллетирования, практически невозможно. Здесь большую роль играет проведение исследований на действующем промышленном оборудовании, направленных на установление зависимостей изменения, взаимного влияния различных характеристик, описывающих процесс производства различных видов биотоплива.

Имеются примеры низкоэффективного использования автоматизированного, точного, высокопроизводительного оборудования. Часто показатели независимы друг от друга, их целевые функции имеют разнонаправленные экстремумы. Получая удовлетворяющие параметры одной группы, производители из-за отсутствия информации о взаимосвязях между характеристиками процесса, пренебрегают параметрами другой группы, снижая тем самым общую эффективность процесса [3]. Так, при максимальной производительности процесса, можно получить продукцию с недопустимо низкой механической прочностью, при максимальной теплотворной способности биотоплива получить неконкурентную себестоимость изготовленных древесных пеллет.

Эта многокритериальная задача решается методами планирования экспериментов, математического анализа результатов, моделирования показателей с получением адекватных зависимостей.

Экспериментальная часть

Проведенные исследования процесса производства древесных пеллет заключались в составлении плана активного эксперимента и его реализации на промышленном оборудовании. Для получения достоверной информации об исследуемом процессе с целью определения важности всех параметров, методом экспертных оценок может быть определен ряд показателей [1].

Они были условно разделены по типам на: режимные, объективно изменяющиеся неуправляемые воздействия, технико-экономические показатели. Методом экспертных

оценок проведен опрос инженерно-технических работников предприятий и исследовательских организаций, занимающихся изучением указанного процесса. Оказалось, что процесс пеллетирования с достаточной точностью можно описать следующими характеристиками.

Режимные параметры X_i : количество подаваемого сырья X_1 , кг/ч; влажность подаваемого сырья X_2 , %; фракционный состав сырья X_3 , мм; содержание лигнина X_4 , %; расстояние между роликками и матрицей X_5 , мм; частота вращения матрицы X_6 , мин⁻¹; температура пара X_7 , °С; температура охлаждения пеллет X_8 , °С.

Неуправляемые возмущающие воздействия F_e : температура атмосферного воздуха F_1 , °С; влажность атмосферного воздуха F_2 , %; температура подаваемого в пресс-гранулятор сырья F_3 , °С.

Выходные технико-экономические показатели Y_n : удельная теплотворная способность древесных пеллет Y_1 , МДж/кг; механическая прочность древесных пеллет Y_2 , %; температура прессующей матрицы Y_3 , °С; производительность применяемого пресса-гранулятора Y_4 , кг/ч; себестоимость производимых древесных пеллет с учетом отсева мелкой фракции Y_5 , руб/т.

Затем с целью получения данных для моделирования исследуемого процесса пеллетирования на основе теории планирования был составлен план активного производственного эксперимента. При этом требовалось руководствоваться известными принципами минимизации опытов и получения достоверной информации об объекте исследования [4].

Уровни варьирования всех наиболее важных технологических режимных параметров с учетом мнения инженерно-технических работников предприятий, производящих рассматриваемый вид биотоплива, научных работников, занимающихся указанной проблемой, и характеристик применяемого в производственных условиях пресса-гранулятора, а также производственных наблюдений за процессом пеллетирования приведены в табл.1.

Таблица 1

Уровни варьирования режимов процесса производства древесных пеллет из отходов древесины

| Наименование режимного параметра | Min | Среднее | Max |
|---|-----|---------|------|
| Количество подаваемого сырья X_1 , кг/ч | 900 | 1550 | 2200 |
| Влажность подаваемого сырья X_2 , % | 8 | 10 | 12 |
| Фракционный состав сырья X_3 , мм | 1 | 3 | 5 |

| | | | |
|--|-----|-----|-----|
| Содержание лигнина X_4 , % | 21 | 24 | 27 |
| Расстояние между роликами и матрицей X_5 , мм | 0,4 | 0,6 | 0,8 |
| Частота вращения матрицы X_6 , мин ⁻¹ | 100 | 120 | 140 |
| Температура пара X_7 , °C | 130 | 140 | 150 |
| Температура охлаждения X_8 , °C | 10 | 15 | 20 |

Планирование активного производственного эксперимента предполагает возможность выбора исследователем в каждом промышленном опыте требуемых уровней управляемых параметров X_i . На процесс производства древесных пеллет влияют управляемые параметры X_i и неуправляемые факторы F_e .

Факторы F_e несомненно могут оказывать влияние на воспроизводимость эксперимента, поэтому их учитывают при проведении исследований и непрерывно контролируют допустимые уровни колебаний.

Для планирования активного производственного эксперимента был выбран план Хартли. При этом учитывалась специфика конкретного промышленного производства во избежание создания аварийных ситуаций и выхода из строя основных дорогостоящих узлов, таких как прессующая матрица.

Полученные данные изменения технико-экономических показателей при регулировании режимных параметров и соответствующих допустимых уровнях объективно изменяющихся факторов дают возможность моделировать процесс пеллетирования.

Используемая контрольно-измерительная аппаратура для определения параметров отвечала требованиям точности, быстродействия и позволяла получать достоверную информацию. В общем виде технико-экономические показатели пеллетирования в зависимости от режимных параметров и объективно изменяющихся уровней нерегулируемых факторов представляются в виде ряда Тейлора, учитывающего квадратичные и парные взаимодействия (1):

$$Y_j = B_0 \cdot X_0 + B_1 \cdot X_1 + \dots + B_n \cdot X_n + B_{11} \cdot X_1^2 + \dots + B_{nn} \cdot X_n^2 + B_{F1} \cdot F_1 + \dots + B_{Fk} \cdot F_k + B_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + \dots + B_{n-1} \cdot X_{n-1} \cdot X_n \quad (1)$$

Получение коэффициентов уравнения (1) для каждого технико-экономического показателя осуществлялось с помощью современного пакета прикладных компьютерных программ «StatisticaAdvanced».

Результаты и обсуждение

В результате математического моделирования с учетом интервалов варьирования режимных параметров и соответствующих уровней колебаний нерегулируемых объективно изменяющихся факторов, получены коэффициенты по каждой предварительно

нормализованной целевой функции процесса производства древесных пеллет из отходов древесины. Значения коэффициентов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов B_n процесса производства древесных пеллет из древесных отходов

| Коэффициент B_n | Y_1 | Y_2 | Y_3 | Y_4 | Y_5 |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| B_0 | -3,492405 | -3,448225 | -0,059907 | -3,610954 | 3,5218929 |
| X_1 | 0,0003703 | 0,0004984 | -0,000011 | 0,0008404 | -0,001124 |
| X_2 | 0,0743231 | 0,0822564 | -0,026645 | 0,0776937 | -0,025552 |
| X_3 | -0,417546 | -0,272171 | -0,042282 | -0,243028 | 0,096074 |
| X_4 | 0,1663211 | 0,1712087 | 0,102484 | 0,1161083 | -0,092459 |
| X_5 | -1,619317 | 0,146696 | -0,202592 | 0,165019 | -0,025786 |
| X_6 | 0,0896124 | 0,0082049 | -0,004621 | 0,007477 | -0,002798 |
| X_7 | -0,031709 | 0,020298 | -0,000836 | 0,018938 | -0,006983 |
| X_8 | 0,0054292 | -0,003422 | 0,0505752 | 0,0031198 | 0,0058473 |
| F_1 | -0,006467 | 0,0007154 | 0,0001434 | 0,0001316 | -0,000599 |
| F_2 | 0,0000263 | -0,000172 | 0,0001919 | -0,000103 | 0,0000962 |
| F_3 | 0,0052467 | 0,0017415 | -0,001515 | 0,0009031 | -0,001119 |
| X_1^2 | 0,0000001 | 0,0000001 | 0,0000001 | -0,000001 | 0,0000002 |
| X_2^2 | 0,0004788 | -0,003101 | 0,0004842 | -0,002468 | 0,0013176 |
| X_3^2 | 0,0047757 | -0,003231 | -0,003630 | -0,002603 | 0,0013289 |
| X_4^2 | -0,000916 | -0,003933 | -0,003031 | -0,002731 | 0,002051 |
| X_5^2 | 0,2906942 | -0,338072 | -0,084538 | -0,253092 | 0,1555025 |
| X_6^2 | -0,000066 | -0,000018 | -0,000055 | -0,000018 | 0,000006 |
| X_7^2 | 0,0001341 | -0,000093 | 0,0000048 | -0,000081 | 0,0000358 |
| X_8^2 | 0,0000332 | -0,000379 | -0,000882 | -0,000334 | 0,0001362 |
| $X_1 \cdot X_2$ | -0,000085 | -0,000062 | -0,000024 | -0,000053 | 0,0000234 |
| $X_1 \cdot X_3$ | 0,000098 | 0,0000649 | 0,0000215 | 0,0000544 | -0,000026 |
| $X_1 \cdot X_4$ | 0,0000043 | 0,0000012 | 0,0000021 | 0,0000036 | 0,0000014 |
| $X_1 \cdot X_5$ | 0,0000129 | 0,0000251 | -0,000003 | -0,000001 | -0,000026 |
| $X_1 \cdot X_6$ | -0,000001 | -0,000001 | -0,000001 | 0,0000001 | 0,0000002 |
| $X_1 \cdot X_7$ | -0,000001 | 0,0000001 | 0,0000004 | -0,000003 | -0,000001 |
| $X_1 \cdot X_8$ | -0,000001 | 0,0000005 | 0,0000003 | -0,000003 | -0,000006 |
| $X_2 \cdot X_3$ | 0,0253889 | 0,0208722 | 0,0077665 | 0,0174082 | -0,008274 |
| $X_2 \cdot X_4$ | 0,001543 | 0,0004619 | 0,0003895 | 0,00007 | -0,00042 |

| | | | | | |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| X ₂ ·X ₅ | 0,0068162 | 0,010229 | -0,00481 | 0,0036372 | -0,007747 |
| X ₂ ·X ₆ | -0,000208 | -0,00003 | 0,0000436 | 0,0000021 | 0,0000347 |
| X ₂ ·X ₇ | -0,000313 | -0,000027 | 0,000134 | -0,00003 | 0,0000015 |
| X ₂ ·X ₈ | -0,000402 | 0,0002031 | 0,0001116 | 0,0001188 | -0,000116 |
| X ₃ ·X ₄ | -0,001469 | -0,000555 | -0,000755 | -0,000079 | 0,0005119 |
| X ₃ ·X ₅ | 0,0119189 | -0,012192 | -0,000209 | -0,003672 | 0,0098332 |
| X ₃ ·X ₆ | -0,000083 | 0,0000472 | 0,0000052 | 0,0000062 | -0,000046 |
| X ₃ ·X ₇ | 0,0000788 | 0,0000081 | -0,000189 | 0,0000431 | 0,0000247 |
| X ₃ ·X ₈ | 0,0003759 | -0,000282 | -0,00007 | -0,000182 | 0,0001523 |
| X ₄ ·X ₅ | 0,2219015 | 0,0152931 | -0,045785 | 0,0113424 | -0,006075 |
| X ₄ ·X ₆ | -0,002259 | -0,000157 | 0,0005283 | -0,000123 | 0,0000726 |
| X ₄ ·X ₇ | -0,000288 | 0,0002107 | 0,0000339 | 0,000171 | -0,000087 |
| X ₄ ·X ₈ | 0,0000215 | 0,0000672 | -0,000041 | -0,000055 | -0,000103 |
| X ₅ ·X ₆ | -0,036041 | -0,000531 | 0,0105174 | -0,000799 | -0,000329 |
| X ₅ ·X ₇ | -0,000826 | -0,0006 | 0,0017233 | 0,0000134 | 0,0006287 |
| X ₅ ·X ₈ | 0,0011414 | -0,005645 | 0,0004474 | -0,005094 | 0,0021427 |
| X ₆ ·X ₇ | 0,0000468 | -0,000006 | -0,000012 | -0,000005 | -0,000002 |
| X ₆ ·X ₈ | 0,0000235 | 0,0000577 | -0,000009 | 0,0000523 | -0,000022 |
| X ₇ ·X ₈ | -0,00004 | 0,000055 | -0,000159 | 0,000031 | -0,000032 |

Средние значения нерегулируемых факторов по серии активных экспериментов были следующие: F₁ ср = 2,2 °С, F₂ ср = 46,5 %, F₃ ср = 5,2 °С.

Полученные зависимости проверены на адекватность по формуле (2):

$$\Delta_j = \frac{|Y_{j \text{ измеренное}} - Y_{j \text{ рассчитанное}}|}{Y_{j \text{ измеренное}}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где Y_{j измеренное}, Y_{j рассчитанное} – соответственно измеренные и рассчитанные значения каждого выходного технико-экономического показателя в каждом активном производственном эксперименте.

Значения для каждой целевой функции или технико-экономического показателя при проверке на адекватность реальному процессу полученных математических зависимостей по всей серии производственных экспериментальных исследований не превышали 1,067 %, что вполне соответствует принятым в деревопереработке уровням точности.

Заключение

Впервые полученные уравнения изменения технико-экономических показателей процесса изготовления пеллет из отходов древесины оказались достаточно адекватными реальным производственным условиям.

Ошибка по серии активных производственных экспериментов не превышает погрешность измерения применяемой при проведении процесса контрольно-измерительной аппаратуры и регулирующих технических средств систем управления.

Эти уравнения, достоверно описывающие процесс, можно эффективно применять в автоматических системах управления прессующим древесное сырье и вспомогательным оборудованием. С этой целью является целесообразным определение методами экспертной оценки и свертки критериев аддитивной функции полезности, направленное на одновременное получение экстремальных значений всех целевых функций или технико-экономических показателей.

Такой подход дает возможность проводить однокритериальную и многокритериальную оптимизации для повышения эффективности процесса производства пеллет, проведения непрерывного технико-экономического анализа в производственных условиях. Это позволит осуществлять оптимизацию применяемых технологических режимов, учитывать ряд важных нерегулируемых факторов и одновременно получать максимальные уровни теплотворной способности выпускаемой продукции, ее прочностных свойств, производительности применяемого оборудования, а также минимальные значениями температуры матрицы пресса-гранулятора и общей себестоимости рассматриваемой технологии.

В ряде случаев целесообразно производить корректировку представленных в таблице 2 коэффициентов по разработанной методике путем проведения дополнительных исследований на конкретном промышленном оборудовании для учета рассматриваемых производственных условий, отличающихся особенностями основного и вспомогательного оборудования, свойствами исходного сырья, уровнями нерегулируемых факторов и другими обстоятельствами. Для этого необходимо определить уровни варьирования режимных параметров, построить план активного производственного эксперимента, провести промышленные исследования. Затем методами математического моделирования и анализа получить достоверные значения коэффициентов целевых функций или технико-экономических показателей, описывающих процесс конкретного производства пеллет.

Список литературы

1. Петровский В.С. Статика процесса сушки древесных частиц в барабанных сушилках / В.С. Петровский, А.О. Сафонов. — Воронеж: Воронеж. гос. лесотехн. акад., 2000. – 114 с.
2. Пути рационального использования отходов древесины и сельскохозяйственных растений / А.О. Сафонов [и др.]// Вестник Таджикского технического ун-та. – 2012. – № 4 (16). – С. 10-14.

3. Сафонов А.О. Тепломассоперенос и динамика сушки дисперсных материалов в барабанных сушилках. – Воронеж: Воронеж. гос. ун-т, 2002. – 240 с.
4. Investigations of the plant nanofibers for the production of modified plate materials / A. Safonov [et al.] // 8th international science conference «Chip and chipless woodworking»: proceedings. – Zvolen, 2012. – P. 12—18.
5. Safonov A.O. Prospects for the development of the biofuel market // The VII international Conference on Agricultural, Biosystems, Biotechnology and Biological Engineering»: proceedings. — Singapore, 2011. — P. 145-148.

Рецензенты:

Стариков А.В., д.т.н., доцент, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия», г. Воронеж.

Шамаев В.А., д.т.н., профессор кафедры древесиноведения ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия», г. Воронеж.