

УДК 631.563.2:664.6/.7

Профессор А.Н. Остриков

(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра процессов и аппаратов химических и пищевых производств, тел. (473) 255-38-87

Старший научный сотрудник С.А. Шевцов

(ФГБУ ВПО «Воронежский институт ГПС МЧС России»)

Формализованный подход к экстремальному управлению процессом сушки растительного сырья перегретым паром

Сущность формализованного подхода к экстремальному управлению процессом сушки растительного сырья перегретым паром состоит в том, что коррекция режима сушки осуществляется в зависимости от начальной влажности и температуры исходного продукта. При этом ведется поиск оптимального расхода исходного продукта, соответствующего максимуму удельной производительности сушилки по испаренной влаге.

The formalized approach to extreme control of plant raw material drying process by superheated steam means that the correction of drying regime takes place in the dependence of initial and final water content and temperature of raw material. Besides the search of optimal raw material outflow capacity which corresponds to dryer maximum specific capacity by evaporation is being carried out.

Ключевые слова: процесс сушки, управление, экстремум функции.

Применение перегретого пара атмосферного давления в качестве сушильного агента вместо воздуха накладывает свои отличия на особенности управления процессом сушки. Вследствие однородности используемого теплоносителя и испаряемой из продукта влаги появляется возможность полной утилизации энергии отработанного перегретого пара.

В известных способах сушки пищевого сырья перегретым паром атмосферного давления часть отработанного перегретого пара в количестве испаряемой из продукта влаги отводится из контура рециркуляции на предварительный подогрев продукта в теплообменнике без раздела поверхности фаз. Однако для повышения энергетической эффективности процесса сушки необходимо поддерживать балансовые соотношения материальных и энергетических потоков с объемом перегретого пара в контуре рециркуляции, соответствующего максимальному количеству испаряемой из продукта влаги.

В этой связи предлагается формализованный подход к экстремальному управлению процессом сушки растительного сырья перегретым паром, в соответствии с которым осуществляется непрерывный поиск оптимального (экстремального) значения функции цели, в качестве которой

продукта влаги в единицу времени к расходу исходного продукта:

$$R = \frac{U_{исп}}{G_{np}^{ex}} = \frac{G_{np}^{ex} \left(\frac{W_n - W_k}{100} \right)}{G_{np}^{ex}} \quad (1)$$

где $G_{np}^{ex} = G_{np}^{ex} \frac{100 - W_n}{100 - W_k}$, W_n , W_k – влажность исходного и высушенного продукта, %.

Существование экстремума критерия R можно объяснить следующими соображениями. При чрезмерном увеличении расхода исходного продукта, входящего в знаменатель (1), значение критерия уменьшается. С другой стороны, чрезмерное уменьшение расхода исходного продукта приводит к снижению скорости влагоудаления, то есть уменьшению количества испаренной из продукта влаги в единицу времени, входящего в числитель критерия, а следовательно, ведет к снижению R .

Таким образом, очевидно существование компромисса между количеством испаренной из продукта влаги и производительностью сушилки по исходному продукту, определяемого оптимальным значением расхода исходного продукта $(G_{np}^{ex})^*$, соответствующего максимальному значению отношения (1).

Изменение температуры исходного продукта зависит от количества отработанного перегретого пара, подаваемого на предварительную тепловую обработку, и определяется из уравнения теплового баланса:

$$G_{np}^{ex} c_{np} t_{np1} + G_{para}^{ex} i' = G_{np}^{ex} c_{np}'' t_{np2} + G_{para}^{ex} i'' + Q_{nom}, \quad (2)$$

где $G_{np}^{ex}, G_{np}^{exx}$ – расход исходного и высушенного продукта, кг/ч; c_{np}', c_{np}'' – теплоёмкость

исходного и высушенного продукта, кДж/(кг·К) (в расчётах для простоты примем $c_{np}' = c_{np}'' = \bar{c}$); t_{np1}, t_{np2} – температура продукта

после теплообменника и на выходе из сушилки, К; $G_{para}^{ex}, G_{para}^{exx}$ – расход перегретого пара

на входе и выходе из сушилки, кг/ч; i', i'' – теплосодержание перегретого пара на входе и выходе из сушилки, кДж/кг; Q_{no} – потери теплоты в окружающую среду, кДж/ч.

Выразим расход перегретого пара на выходе из сушилки через расход пара на входе и количество перегретого пара, отводимого из контура рециркуляции на предварительный подогрев продукта:

$$G_{para}^{exx} = G_{para}^{ex} + U_{отвод}, \quad (3)$$

Причём G_{para}^{ex} зависит от расхода исходного продукта, подаваемого в сушилку.

Подставим (3) в (2) и разрешим относительно $U_{отвод}$:

$$U_{отвод} = \frac{G_{np}^{ex} \left(c_{np}' t_{np1} - \frac{100-W}{100-W} c_{np}'' t_{np2} \right) + G_{para}^{ex} (i' - i'') - Q_{nom}}{i''} \quad (4)$$

Уравнение (4) позволяет в статике определять количество пара, отводимого из контура рециркуляции, и может быть использовано для расчета теоретического процесса сушки, когда параметры исходного продукта и прежде всего его начальная влажность остается постоянной, а следовательно, можно с высокой долей вероятности считать, что постоянной будет и производительность сушилки по влажному продукту.

В действительности же для реального процесса сушки возможно не только изменение начальной влажности продукта в определенном диапазоне, обусловленного погодными

климатическими условиями, но и изменение темпа подачи продукта на сушку в связи с переборами в поставках и заготовках сырья.

Найдем производную отношения (количества испаряемой из продукта влаги в единицу времени к расходу исходного продукта) по расходу исходного продукта $\partial R / \partial G_{np}^{ex}$, по которой определим экстремальное (оптимальное) значение расхода исходного продукта $(G_{np}^{ex})^*$, обеспечивающего максимальное значение оптимизируемого показателя (1):

$$R = \frac{U_{исп}}{G_{np}^{ex}} \rightarrow \max. \quad (5)$$

По данным экспериментальных исследований зависимость $(U_{исп} / G_{np}^{ex}) = f(G_{np}^{ex})$ может быть аппроксимирована уравнением второй степени в исследуемом интервале значений G_{np}^{ex} :

$$\frac{U_{исп}}{G_{np}^{ex}} = -A(G_{np}^{ex})^2 + B(G_{np}^{ex}) - C, \quad (6)$$

где A, B, C – эмпирические коэффициенты, $A, B, C > 0$.

Необходимое условие экстремума:

$$\frac{\partial (U_{исп} / G_{np}^{ex})}{\partial G_{np}^{ex}} = -2AG_{np}^{ex} + B = 0. \quad (7)$$

Отсюда следует оптимальное значение расхода исходного продукта:

$$(G_{np}^{ex})^* = B/2A \quad (8)$$

$$\text{Так как } \frac{\partial^2 (U_{исп} / G_{np}^{ex})}{\partial (G_{np}^{ex})^2} = -2A < 0, \text{ то в точке}$$

экстремума (5) имеет место максимум.

Изменение начальной влажности продукта существенно влияет на смещение (сдвиг) оптимума, поэтому выбор оптимальных решений по алгоритму (5) – (8) относится к задаче с дрейфующим оптимумом. Оптимальные значения расхода исходного продукта следует выбирать из условия максимума экстремальных характеристик $(U_{исп} / G_{np}^{ex}) = f(G_{np}^{ex}, W_n)$, эмпирические коэффициенты которых A, B, C определяются экспериментально.

Предлагаемый формализованный подход позволил разработать способ автоматического управления процессом сушки продуктов растительного происхождения перегретым

тым паром атмосферного давления, обеспечивающий повышение производительности сушильных установок с учетом ограничений, накладываемых на управляемые параметры в условиях случайных возмущений.

Способ осуществляется следующим образом (рисунок 1).

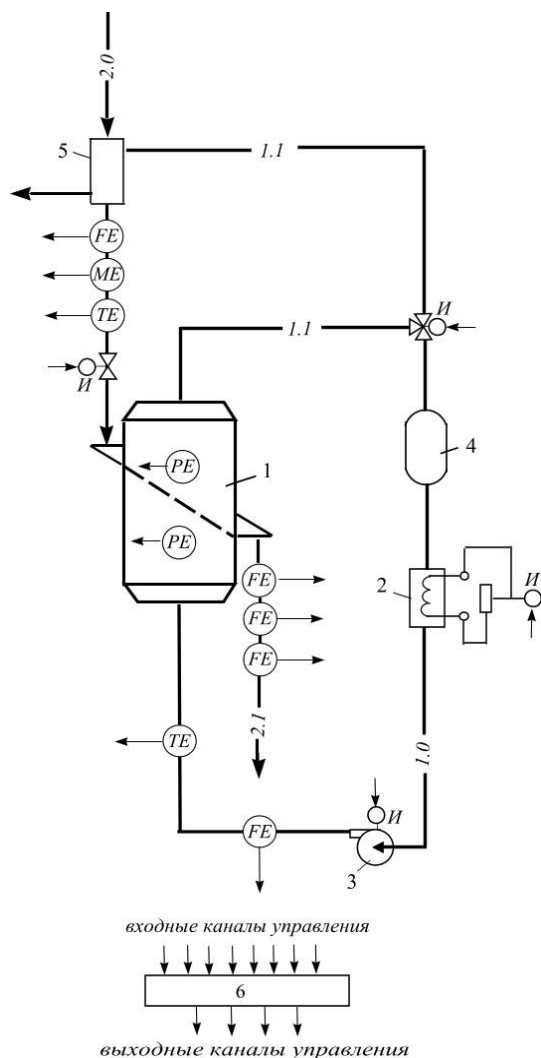


Рисунок 1 - Схема экстремального управления процессом сушки перегретым паром атмосферного давления:

1 – сушилка; 2 – пароперегреватель; 3 – вентилятор;
4 – ресивер; 5 – теплообменник; 6 – микропроцессор;
датчики: *TE* – температуры, *FE* – расхода;
PE – давления; *ME* – влажности; *И* – исполни-
тельные механизмы;
1.0 – перегретый пар, *1.1* – отработанный пере-
гретый пар; *2.0* – влажный продукт, *2.1* – высу-
шенный продукт

По информации датчиков о текущих значениях расхода и влажности исходного продукта микропроцессор вычисляет фактический поток влаги, подаваемый с исходным продук-

том по линии 2.0 в сушилку 1, в соответствии с которым устанавливает расход перегретого пара на входе в сушилку по линии 1.0.

По сигналу рассогласования текущего значения расхода перегретого пара и заданного микропроцессор посредством исполнительного механизма регулируемого привода вентилятора высокого давления 3 устанавливает необходимый расход перегретого пара на входе в сушилку.

Микропроцессор определяет перепад давления перегретого пара в слое продукта и при достижении предельно допустимого значения перепада давления формирует сигнал на изменение расхода перегретого пара на входе в сушилку 1, тем самым предотвращая унос частиц продукта с отработанным перегретым паром, а по температуре исходного продукта после теплообменника, устанавливает мощность ТЭНов пароперегревателя.

По текущим значениям влажности исходного и высушенного продукта температуры исходного продукта после теплообменника и высушенного продукта, расхода исходного продукта, температуры и расхода перегретого пара на входе в сушилку микропроцессор по формуле (4) вычисляет количество отработанного перегретого пара, отводимого из контура рециркуляции в теплообменник 5 на предварительный подогрев исходного продукта.

Во избежание технологических сбоев в линии рециркуляции установлен ресивер 4.

В процессе сушки микропроцессор вычисляет отношение количества испаряемой из продукта влаги в единицу времени к расходу исходного продукта по формуле (1), определяет производную этого соотношения, находит оптимальное значение расхода исходного продукта из условия экстремума и поддерживает его в установившемся режиме сушки.

Изменение расхода исходного продукта будет осуществляться в антибатной (экстремальной) зависимости и определяться знаком производной $\mathcal{R}/\mathcal{G}_{\text{пр}}^{\text{вх}}$. Если $\mathcal{R}/\mathcal{G}_{\text{пр}}^{\text{вх}} > 0$, то расход исходного продукта будет уменьшаться, и наоборот, если $\mathcal{R}/\mathcal{G}_{\text{пр}}^{\text{вх}} < 0$, то расход исходного продукта будет увеличиваться.

Предлагаемый способ реализован в экспериментальных условиях кафедры процессов и аппаратов химических и пищевых производств на полупромышленной сушильной установке, предназначенной для сушки пищевого расти-

тельного сырья в кипящем слое перегретым паром. В качестве объекта сушки использовались топинамбур, грибы «Шампиньоны», белые коренья петрушки, пастернака и сельдерея.

Рациональные параметры процесса сушки [1 - 4], значения эмпирических коэффициентов в уравнении (6) (таблица 1) позволили реализовать экстремальное управление в широком диапазоне изменения начальной влажности выбранных объектов сушки.

Возможные изменения начальной влажности продукта даже приводят к изменению гидродинамической обстановки в рабочем объеме сушилки. При уменьшении начального влагосодержания, например, топинамбура с 7 кг/кг до 6,7 кг/кг, необходимо снизить расход перегретого пара на входе в сушилку и обеспечить перепад его давления в слое продукта

1000 Н/м², при увеличении начальной влажности крупы до 7,4 кг/кг необходимо увеличить расход перегретого пара до достижения предельно допустимого значения перепада давления в слое продукта, например 1030 Н/м². Ограничения расхода перегретого пара на входе в сушилку по перепаду его давления в слое частиц топинамбура обеспечивает необходимый расход перегретого пара на входе в сушилку, а следовательно, и скорость витания частиц, исключая их унос с отработанным перегретым паром.

В таблице 2 представлены результаты сравнения некоторых технико-экономических показателей известного и предлагаемого способов. В качестве известного используется заводской способ управления процессом сушки на Грязинском пищекомбинате.

Т а б л и ц а 1

Значения режимных параметров и эмпирических коэффициентов

Продукт	u	$G_{\text{п}}$	$T_{\text{п}}$	$v_{\text{п}}$	$\left(\frac{U_{\text{исп}}}{G_{\text{пр}}^{\text{вх}}} \right)_{\text{max}}$	$(G_{\text{пр}}^{\text{вх}})^*$	Значения эмпирических коэффициентов в уравнении (6)		
	кг/кг	кг/ч	К	м/с	кг/кг	кг/ч	$A \cdot 10^{-3}$	B	C
Топинамбур	7,2		417	1,5	0,160	130,00	4,0	1,040	67,440
Сельдерей	3,5		393	1,5	0,175	129,35	3,6	0,931	60,058
Петрушка	3,7		423	1,5	0,176	129,40	3,6	0,932	60,060
Шампиньоны	7,0		433	1,5	0,210	131,04	3,7	1,042	66,174
Пастернак	3,8		393	1,5	0,182	128,00	3,2	0,822	52,657

Т а б л и ц а 2

Технико-экономические показатели сравниваемых способов управления

Технико-экономические показатели	Известный способ	Предлагаемый способ
Производительность сушилки по испаренной влаге, кг/ч	26,4	22,5
Вид используемого сушильного агента	Воздух	Перегретый пар
Удельные энергозатраты, Дж/кг	3780	3517
Колебания конечной влажности продукта, %	9,8±1,0	9,8±0,3
Продолжительность сушки, мин	48	4,5 - 5,0
Удельный расход сушильного агента, (м ³ /с·кДж)·10 ⁻³	0,74	0,18

Как показали предварительные эксперименты, для начального влагосодержания топинамбура $u_{\text{н}} = 7,2 \pm 0,2$ кг/кг и его расхода $G_{\text{пр}}^{\text{вх}} = 130 \pm 3$ кг/ч расход перегретого пара на входе в сушилку должен составлять $G_{\text{пара}}^{\text{вх}} = 0,587$ м³/с, а его температура $T_{\text{пара}}^{\text{вх}} = 144 \pm 1$ °С.

По расходу и начальной влажности топинамбура микропроцессор определяет поток

влаги по формуле:

$$G_{\text{влаги}} = G_{\text{пр}}^{\text{вх}} \cdot \frac{W_{\text{н}}}{100}, \quad (9)$$

в соответствии с которым, устанавливает необходимый расход перегретого пара на входе в сушилку. В установившемся режиме сушки при постоянных показателях исходного продукта с температурой после теплообменника, например $30 \pm 0,5$ °С, температура перегретого пара на входе в сушилку должна составлять

$148 \pm 0,5$ °С. Для текущих значений расхода и температуры топинамбура (125 кг/ч и 24 °С) и значений расхода и температуры перегретого пара на входе в сушилку (1080 кг/ч и 147 °С) количество излишней части отработанного перегретого пара $U_{\text{отвод}} = 22,5$ кг/ч. Сигнал, пропорциональный этому количеству перегретого пара, с микропроцессора подаётся на исполнительный механизм и отводит излишнюю часть отработанного перегретого пара в теплообменник 5 на предварительный подогрев исходного продукта. В результате теплообмена топинамбур нагревается, его температура на выходе из теплообменника фиксируется датчиком. Сигнал, пропорциональный изменению текущей температуры топинамбура после теплообменника, подаётся в микропроцессор, который в свою очередь корректирует температурный режим сушки воздействием на теплоподвод путём изменения мощности ТЭНов пароперегревателя.

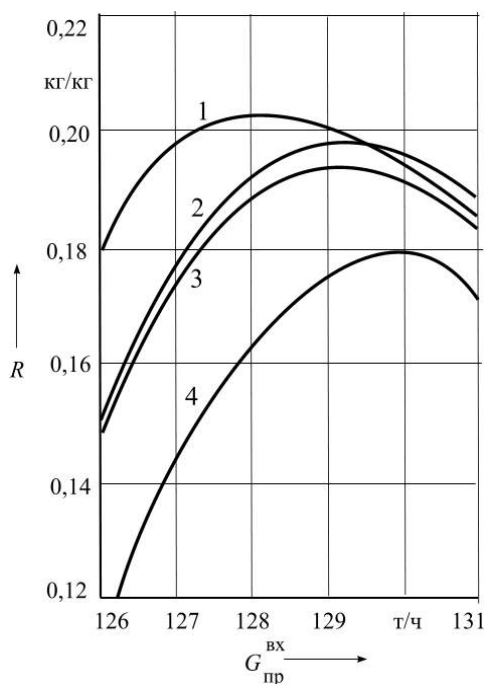


Рисунок 2 - Экстремальные характеристики управления процессом сушки продуктов растительного происхождения в кипящем слое перегретым паром при технологических режимах (таблица 2): 1 – шампиньоны, 2 – пастернак, 3 – петрушка, 4 – сельдерей

Стабилизация текущего значения влажности высушенного топинамбура в интервале заданных значений, например $9,8 \pm 0,2$ %, осуществляется посредством двойной коррекции температуры перегретого пара на входе в сушилку, обеспечивая получение высушенного продукта заданной конечной влажности.

Таким образом, в предлагаемом способе

управления одновременно обеспечивается коррекция режима сушки в зависимости от случайных возмущений (начальной влажности и температуры исходного продукта) и непрерывно осуществляется поиск оптимального расхода исходного продукта, соответствующего максимуму удельной производительности сушилки по испаренной влаге.

Предлагаемый способ позволяет повысить энергетическую эффективность процесса сушки на 10 %; увеличить производительность сушилки по испаренной влаге на 15-20 %; сократить продолжительность сушки; обеспечить максимальное использование теплоты отработанного перегретого пара; вследствие снижения инерционности управления сузить интервал отклонений конечной влажности продукта; улучшить экологическую безопасность за счет проведения процесса сушки в замкнутом цикле.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Остриков, А.Н. Математическое моделирование процесса сушки пищевого растительного сырья перегретым паром [Текст] / А.Н. Остриков, С.А. Шевцов // Известия вузов. Пищевая технология. – 2013. – № 1. – С. 83-87.
- 2 Остриков, А. Н. Энергетическая оценка процесса сушки культивируемых грибов перегретым паром атмосферного давления [Текст] / А.Н. Остриков, С. А. Шевцов // Современные наукоемкие технологии – 2004. – № 2. – С. 88-89.
- 3 Патент РФ № 2246841. Способ производства сушеных грибов [Текст] / А.Н. Остриков, С.А. Шевцов. - Заявл. 31.12.2003; Опубл. 27.02.2005; Бюл. № 6.
- 4 Остриков, А.Н. Энергосберегающие технологии и оборудование для сушки пищевого сырья [Текст] /А.Н. Остриков, И.Т. Кретов, А.А. Шевцов и др. – Воронеж: ВГТА, 1998. – 344 с.
- 5 Патент РФ № 2133094. Способ сушки овощей и фруктов [Текст] / В.Г. Кашников, Е.Ф. Сафьянов, Г.И. Яроцкий. – Заявл. 04.01.1996; Опубл. 20.07.1999.
- 6 Остриков, А. Н. Исследование кинетики переменных режимов сушки корней петрушки [Текст] / А.Н. Остриков, Ю.В. Складчикова // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2009. – № 2. – С. 67-69.

REFERENCES

- 1 Ostrikov, A.N. Mathematical modeling of drying food plant materials with superheated

steam [Text] / A. N. Ostrikov, S.A. Shevtsov // News of high schools. Food technology . - 2013. - № 1. - P. 83-87 .

2 Ostrikov, A.N. Energy valuation is the process of drying of cultivated mushrooms superheated steam at atmospheric pressure [Text] / A.N. Ostrikov, S.A. Shevtsov // Modern high technologies. - 2004. - № 2. - P. 88-89.

3 Patent RF № 2246841 . Method of production of dried mushrooms [Text] / A.N. Ostrikov, S.A. Shevtsov. - Appl. 31.12.2003, Publ. 27.02.2005; Bull. № 6.

4 Ostrikov, A. N. Energy-saving technolo-

gies and equipment for drying food raw [Text] / A.N. Ostrikov , I.T. Kretov, S.A. Shevtsov et al. - Voronezh: VSTA, 1998. - 344 p.

5 Patent RF № 2133094. The method of drying fruits and vegetables [Text] / V.G. Kashnikov, E.F. Safyanov, G.I. Yarotskiy. - Appl . 04.01.1996, Publ. 20.07.1999.

6 Ostrikov, A.N. Kinetics of variable modes of drying parsley root [Text] / A.N. Ostrikov, Y.V. Skladchikova // Storage and refining agricultural raw materials. - 2009. - № 2. - P. 67-69 .