

УПРАВЛЕНИЕ СУШКОЙ СУСПЕНЗИИ ХЛОРЕЛЛЫ С УЧЕТОМ ВЯЗКОСТИ

О.Л. АХРЕМЧИК, д-р техн. наук, Н.В. КУЗНЕЦОВ, асп.

Тверской государственной технической университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: axremchic@mail.ru

© Ахремчик О.Л., Кузнецов Н.В., 2024

Представлены результаты, полученные в ходе процедур структурного синтеза систем управления сушкой суспензии микроводоросли. Снижение дисперсии показателей качества порошка хлореллы обеспечивается за счет использования корректирующего воздействия по вязкости суспензии в регуляторе температуры сушильного агента. Вязкость измеряется перед подачей суспензии на распылительное сопло дополнительно введенным в состав системы управления прибором. Рассмотрена структура измерителя вязкости суспензии. В качестве регулятора температуры предлагается применять нечеткий регулятор температуры сушильного агента. Лингвистическая оценка регулируемого и корректирующего воздействий осуществляется по трем термам на основе прямоугольных функций принадлежности.

Ключевые слова: управление, вязкость, температура, переменная, нечеткий регулятор, сушка, суспензия, структура.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-100-107

ВВЕДЕНИЕ

Технологические приемы выращивания одноклеточных водорослей позволяют повсеместно осуществлять производство эмульсий и суспензий для получения биодобавок, комбикормов, дрожжей и пр. Широкое применение в качестве сырья получили суспензии водоросли *Chlorella vulgaris* [1]. Суспензия образуется на выходе биореактора и представляет собой клетки микроводоросли, суспендированные в питательном растворе на основе воды. Температура питательного раствора и суспензии в биореакторе поддерживаются на заданном уровне [2]. Во многих случаях производится также сухой порошок хлореллы. Процесс изготовления порошка включает подготовку посадочного материала, приготовление растворов, культивирование субстрата в биореакторе, фильтрацию и флокуляцию субстрата, сушку суспензии, упаковку и хранение порошка.

Авторы рассматривают процесс сушки суспензии хлореллы в прямоточных распылительных сушилках, когда сушильный агент вступает в контакт с рассеиваемыми через сопло каплями суспензии в верхней части сушильной камеры. Капли имеют максимальную влажность при температуре мокрого термометра, и поток сушильного агента передает большую часть тепла на испарение влаги.

Исследования моделей распылительных сушилок показали, что капли при рассеивании в сушилке имеют разный размер. Капли, меньшие по размеру, концентрируются вблизи оси сушильной камеры, и их температура быстро сравнивается с температурой сушильного агента. Более крупные капли движутся к периферии камеры и сохраняют большее количество влаги за одно и то же время сушки [3]. Это явление приводит к значительному разбросу показателей качества сухого

продукта, в качестве которых рассматриваются влажность порошка хлореллы после сушки и дисперсность высушенных частиц.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель работы состоит в снижении дисперсии показателей качества высушенного продукта. Объект исследования – процесс управления распылительной сушкой суспензии водоросли хлорелла. Предмет исследования – состав системы управления. Методология исследования основана на процедуре структурного синтеза системы управления процессом сушки суспензии.

Основные задачи исследования:

- выделение измеряемых, возмущающих, управляющих переменных;
- определение структуры системы управления с коррекцией по промежуточной переменной;
- разработка структуры измерительного прибора вязкости суспензии;
- выбор типа регулятора температуры сушильного агента в системе управления процессом сушки.

Поиск решения задачи структурного синтеза системы управления сложным объектом, к которому относится процесс сушки суспензии, происходит в ходе итераций процедур анализа, синтеза и рационального выбора. Структура системы управления считается определенной, если выявлены управляющие, наблюдаемые и возмущающие воздействия, определены координирующие и корректирующие сигналы между контурами и подсистемами системы управления [4]. Выделение новой переменной в качестве наблюдаемой может изменять (и изменяет) структуру регулятора и системы управления. Авторами процедура синтеза разбита на стадии выделения целей управления, контуров регулирования, измеряемых и управляющих переменных.

ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В СОСТАВЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПРОЦЕССА СУШКИ

Распылительная сушка суспензии хлореллы производится после ее фильтрации на выходе биореактора. Сушка осуществляется нагретым воздухом, используемым в качестве сушильного агента.

В состав распылительной сушилки входят (рис. 1):

- 1, 11 – фильтры;
- 2 – нагреватель воздуха;
- 3 – прибор для измерения вязкости суспензии;
- 4 – система управления;
- 5 – насос подачи суспензии;
- 6 – распылительная форсунка;
- 7 – компрессор сжатого воздуха;
- 8 – сушильная камера;
- 9 – циклон;
- 10 – емкость для порошка хлореллы;
- 12 – вентилятор;
- 13 – измерительный преобразователь температуры сушильного агента.

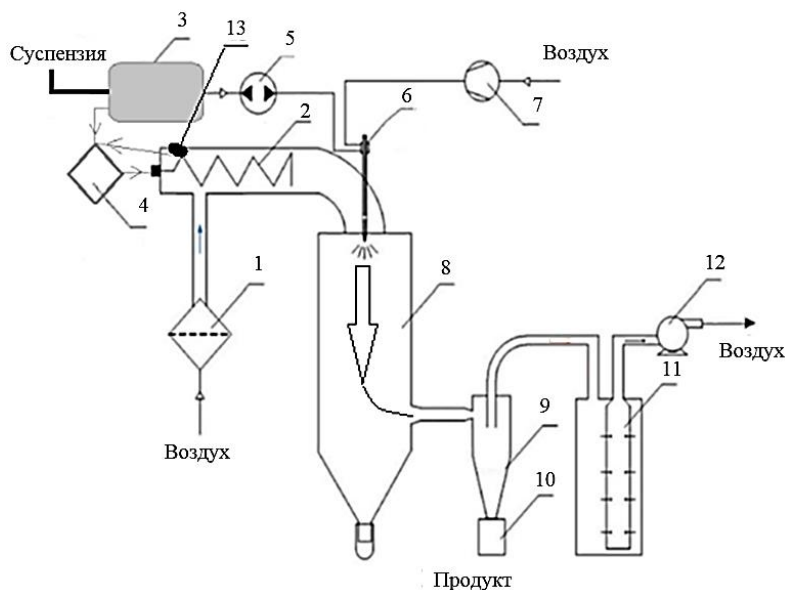


Рис. 1. Схема сушилки для производства порошка хлореллы

При рассмотрении камеры распылительной сушилки как объекта управления ранее были выделены температура сушильного агента и температура суспензии на входе в сушилку как доминирующие факторы, определяющие эффективность сушки [5]. В ходе рассмотрения в качестве целевой функции управления дисперсии показателей качества порошка хлореллы выделена дополнительная переменная – вязкость суспензии водоросли после фильтрации (перед сушкой). Измерение и учет вязкости при сушке позволяют снизить инерционность канала управления «температура сушильного агента → содержание влаги в продукте». Таким образом, новизна авторского подхода заключается в совместном рассмотрении в задаче управления процессом производства сухого продукта стадий фильтрации и сушки на основе дополнительно вводимого наблюдателя вязкости суспензии и учета сигнала с выхода наблюдателя как корректирующего в контуре регулирования температуры сушильного агента.

Система управления поддерживает температуру воздуха на входе сушилки в пределах, установленных на основе экспериментальных исследований процесса сушки суспензии. Если температура окажется недостаточно высокой, то порошок будет иметь избыточную влагу; если же температура будет повышенной, то пересушенный продукт потеряет полезные свойства [6].

Авторами предлагается проводить непрерывный контроль вязкости суспензии, подаваемой на форсунку сушилки. Сущность корректирующего воздействия по переменной «Вязкость» заключается в том, что если значение вязкости суспензии ниже заданного значения (нормы), то нужно выработать дополнительное управление для поддержания температуры сушильного агента (воздуха) на входе в сушилку (и, соответственно, температуры в сушильной камере) для полного испарения избыточной влаги.

Для измерения вязкости суспензии хлореллы в состав системы управления вводится вискозиметр, построенный на основе модифицированного решения, предложенного учеными Тверского государственного технического университета [7].

Прибор контроля вязкости включает (рис. 2):

1, 2 – привод и шестеренчатый насос, обеспечивающие точную подачу суспензии;

3, 4 – измерительный узел (капилляр и диафрагму);

5, 6 – преобразователи перепада давлений в электрический сигнал на составляющих измерительного узла;

7 – измерительный преобразователь температуры;

8 – накопительный резервуар;

9 – измерительный преобразователь уровня суспензии;

10 – насос;

11 – подсистему анализа и сбора измерительной информации;

12 – термостат;

13 – локальный регулятор температуры в термостате.

Насос 10 на рис. 2 и насос 5 на рис. 1 являются одним и тем же агрегатом. После измерения вязкости (см. поз. 3 рис. 1) прибором, построенным по принципу капиллярного вискозиметра (рис. 2), сигнал с выхода анализатора (см. поз. 11 на рис. 2) подается в систему управления температурой сушильного агента (см. поз. 4 на рис. 1).

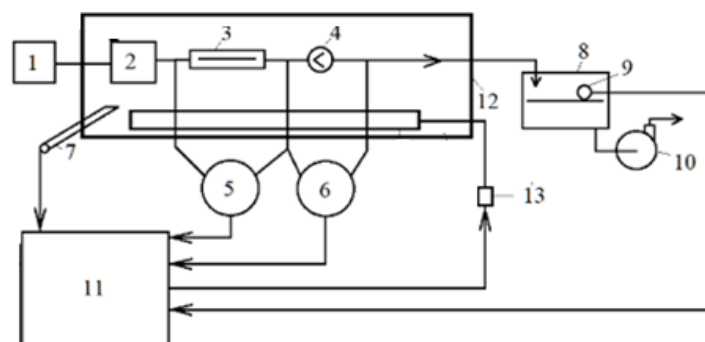


Рис. 2. Структура прибора для измерения вязкости суспензии

НЕЧЕТКИЙ РЕГУЛЯТОР ТЕМПЕРАТУРЫ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА

В ходе выбора закона регулирования температуры выявлены сложности, связанные с масштабированием технологических схем распылительных сушилок, а также трудности получения передаточных функций по каналам ошибки и возмущений в системе управления температурой сушильного агента. Поэтому в качестве регулятора температуры сушильного агента (воздуха) предлагается использовать нечеткий регулятор (НР), применяемый при недостаточных знаниях для построения моделей объекта, но при наличии опыта управления им [8].

В авторской разработке входными сигналами НР являются сигналы (t) с датчика температуры сушильного агента T в камере нагрева (см. поз. 13 на рис. 1) и вязкости (μ) с подсистемы анализа (см. поз. 11 рис. 2). Выход регулятора (u), обеспечивающий расход энергии на нагрев, формируется на основе правил нечеткого вывода (рис. 3).

В НР применяются лингвистические переменные «Вязкость», «Температура», «Управление». На естественном языке закон управления температурой сушильного агента с использованием дополнительного корректирующего воздействия по вязкости можно сформулировать следующим образом: если значение вязкости превысит значение $\mu_0 + \Delta_\mu$ (больше нормы μ_0), то значение температуры агента нужно снизить до $t_0 - \Delta_t$, а если значение вязкости окажется меньше $\mu_0 - \Delta_\mu$ (меньше нормы μ_0), то значение температуры агента следует повышать до $t_0 + \Delta_t$.

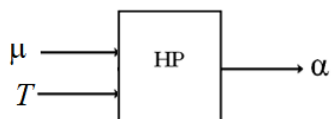


Рис. 3. Структура регулятора температуры

Фаззификация входных сигналов в законе регулирования температуры сушильного агента осуществляется на основе прямоугольных функций принадлежности. Детализация правил закона управления проводится для формулировки с использованием термов. Для лингвистических переменных предлагается использовать по три терма для каждой переменной (табл. 1). Цветовым фоном в таблицах выделяется переход от минимального управляющего воздействия (фиолетово-синеватый фон) к максимальному (красно-коричневый фон).

Таблица 1. Правила формирования управления в законе регулирования температуры

Вязкость \ Температура	Меньше нормы $\mu < \mu_0 - \Delta_\mu$	Норма $\mu_0 - \Delta_\mu \leq \mu < \mu_0 + \Delta_\mu$	Больше нормы $\mu \geq \mu_0 + \Delta_\mu$
Меньше нормы $t < t_0 - \Delta_t$	Значительно увеличиваем «Управление»	Увеличиваем «Управление»	Не меняем «Управление»
Норма $t_0 - \Delta_t \leq t < t_0 + \Delta_t$	Увеличиваем «Управление»	Не меняем «Управление»	Уменьшаем «Управление»
Больше нормы $t \geq t_0 + \Delta_t$	Не меняем «Управление»	Уменьшаем «Управление»	Значительно уменьшаем «Управление»

Функции фаззификации для корректирующего воздействия имеют вид:

значение параметра вязкость «меньше нормы»:

$$\alpha_\mu^1 = \begin{cases} 1, & \text{при } \mu < \mu_0 - \Delta_\mu; \\ 0, & \text{при } \mu \geq \mu_0 - \Delta_\mu; \end{cases}$$

значение параметра вязкость – «норма»:

$$\alpha_\mu^2 = \begin{cases} 0 & \text{при } \mu_0 - \Delta_\mu < \mu \\ 1 & \text{при } \mu_0 - \Delta_\mu \leq \mu < \mu_0 + \Delta_\mu; \\ 0, & \text{при } \mu \geq \mu_0 + \Delta_\mu \end{cases}$$

значение параметра вязкость «больше нормы»:

$$\alpha_\mu^3 = \begin{cases} 0, & \mu < \mu_0 + \Delta_\mu \\ 1, & \mu \geq \mu_0 + \Delta_\mu \end{cases}$$

Функции принадлежности для управляемого параметра имеют вид:

1) значение параметра температура «меньше нормы»:

$$\alpha_t^1 = \begin{cases} 1, & \text{при } t < t_0 - \Delta_t, \\ 0, & \text{при } t \geq t_0 - \Delta_t, \end{cases}$$

2) значение параметра температура – «норма»:

$$\alpha_t^2 = \begin{cases} 0, & \text{при } t_0 - \Delta_t < t \\ 1, & \text{при } t_0 - \Delta_t \leq t < t_0 + \Delta_t, \\ 0, & \text{при } t \geq t_0 + \Delta_t \end{cases}$$

3) значение параметра температура «больше нормы»:

$$\alpha_t^3 = \begin{cases} 0, & t < t_0 + \Delta_t \\ 1, & t \geq t_0 + \Delta_t. \end{cases}$$

Формализацию правил вывода $R^j (j = 1, \dots, 9)$ для управления u для шага k при работе логико-лингвистического регулятора можно представить в виде набора:

R^1 : если α_μ^i есть α_μ^1 и α_t^i есть α_t^1 , то $u_k = u_{k-1} + 2\Delta$, иначе R^2 ;

R^2 : если α_μ^i есть α_μ^1 и α_t^i есть α_t^2 , то $u_k = u_{k-1} + \Delta$, иначе R^3 ;

R^3 : если α_μ^i есть α_μ^1 и α_t^i есть α_t^3 , то $u_k = u_{k-1}$, иначе R^4 ;

...

R^9 : если α_μ^i есть α_μ^3 и α_t^i есть α_t^3 , то $u_k = u_{k-1} - 2\Delta$, иначе R^1 .

Процесс перехода от функций принадлежности к числовым значениям называется дефазсификацией. Авторами сформулирован набор правил дефазсификации для НР температуры сушильного агента (табл. 2). В качестве аргументов правил используются переменные «Температура» (регулируемая) и «Вязкость» (корректирующая).

Таблица 2. Правила расчета выходного воздействия «Управление»

Температура \ Вязкость	Меньше нормы	Норма	Больше нормы
	$\mu < \mu_0 - \Delta_\mu$	$\mu_0 - \Delta_\mu \leq \mu < \mu_0 + \Delta_\mu$	$\mu \geq \mu_0 + \Delta_\mu$
Меньше нормы $t < t_0 - \Delta_t$	$0,5(\alpha_\mu^1 + \alpha_t^1)$	$0,5(\alpha_\mu^2 + \alpha_t^1)$	$0,5(\alpha_\mu^3 + \alpha_t^1)$
Норма $t_0 - \Delta_t \leq t < t_0 + \Delta_t$	$0,5(\alpha_\mu^1 + \alpha_t^2)$	$0,5(\alpha_\mu^2 + \alpha_t^2)$	$0,5(\alpha_\mu^3 + \alpha_t^2)$
Больше нормы $t \geq t_0 + \Delta_t$	$0,5(\alpha_\mu^1 + \alpha_t^3)$	$0,5(\alpha_\mu^2 + \alpha_t^3)$	$0,5(\alpha_\mu^3 + \alpha_t^3)$

Числовой расчет выходных значений НР позволяет перейти от лингвистических термов к количественным значениям управляющего воздействия на изменение расхода энергии (табл. 3). Интерпретация количественного значения при использовании энергии пара означает степень открытия регулирующего клапана, а при использовании электронагревателя – отношения продолжительности включения термонагревающего элемента ко времени работы нагревателя.

Таблица 3. Таблица значений выходного параметра регулятора

Вязкость Температура	Меньше нормы $\mu < \mu_0 - \Delta_\mu$	Норма $\mu_0 - \Delta_\mu \leq \mu < \mu_0 + \Delta_\mu$	Больше нормы $\mu \geq \mu_0 + \Delta_\mu$
Меньше нормы $t < t_0 - \Delta_t$	1	0,5	0
Норма $t_0 - \Delta_t \leq t < t_0 + \Delta_t$	0,5	0	0,5
Больше нормы $t \geq t_0 + \Delta_t$	0	0,5	1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс распылительной сушки суспензии водоросли *Chlorella vulgaris* при производстве порошка является сложным и трудноформализуемым с точки зрения управления объектом. Снижение дисперсии показателей качества сухого продукта возможно на основе совершенствования системы управления сушкой. При управлении температурой сушильного агента предлагается применять коррекцию на основе измерения вязкости суспензии после фильтрации. Прибор для измерения вязкости вводится в структуру системы управления как составляющая контура регулирования температуры сушильного агента. Нечеткий регулятор температуры работает по трем термам каждой из переменных «Температура» и «Вязкость» с выработкой управляющего воздействия на основе прямоугольных функций принадлежности. Предложенные правила фаззификации и дефаззификации для регулирования температуры работают на множестве «норма», «меньше нормы», «больше нормы». Это множество целесообразно применять при оценке показателей качества сухого порошка на верхнем уровне управления для обеспечения условий информационной совместимости локальных регуляторов и машин принятия решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаева Ю.В., Ефимова М.В. Микроскопическая водоросль хлорелла // *Молодой ученый*. 2022. № 24 (419). С. 111–113.
2. Ахремчик О.Л., Мурзахметов В.С. Моделирование роста штамма *Chlorella Vulgaris* в лабораторном биореакторе. *Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: Материалы VI Всероссийской науч. конференции*. Тольятти: ТГУ, 2023. С. 29–34.
3. Шевцов А.А., Муравьев А.С. Модельные представления процесса распылительной сушки фильтрата спиртовой барды на основе уравнений Навье – Стокса // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2015. № 4. С. 11–16.

4. Дивеев А.И., Софронова Е.А. Задача структурного синтеза системы автоматического управления // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2007. № 1. С. 48–58.

5. Максименко Ю.А., Феклунова Ю.С., Теличкина Э.Р., Пшеничная Н.Э. Кинетика распылительной сушки растительных материалов // *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания*. 2016. № 3. С. 77–81.

6. Kalenov S.V., Gordienko M.G., Murzina E.D., et al. Halobacterium Salinarum Storage and Rehydration after Spray Drying and Optimization of the Processes for Preservation of Carotenoids // *Extremophiles*. 2018. V. 22. № 3. P. 511–523.

7. Патент РФ 2760922. *Автоматический капиллярный вискозиметр* / Илясов Л.В., Кузнецов Н.В.; Заявл. 12.04.2021. Оpubл. 01.12.2021. Бюл. № 34.

8. Mann G.K.I., Bao-Gang Hu., Gosine R.G. Analysis of Direct Action Fuzzy PID Controller Structures // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1999. Part B. V. 29. Is. 3. P. 371–388.

Для цитирования: Ахремчик О.Л., Кузнецов Н.В. Управление сушкой суспензии хлореллы с учетом вязкости // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 2 (22). С. 100–107.

CONTROL OF DRYING OF CHLORELLA SUSPENSION TAKING INTO ACCOUNT VISCOSITY

O.L. AKHREMCHIK, Dr. Sc., N.V. KUZNETSOV, postgraduate

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver, e-mail: axremchic@mail.ru

The results obtained during structural synthesis of microalgae suspension drying control systems are presented. Reduction of dispersion of chlorella powder quality parameters is ensured by using corrective action by viscosity of suspension in temperature controller of drying agent. Viscosity is measured before the slurry is fed to the spray nozzle further incorporated into the instrument control system. The structure of the suspension viscosity meter is considered. As the temperature controller, it is proposed to use a fuzzy temperature controller of the drying agent. Linguistic assessment of controlled and corrective actions is carried out according to three terms on the basis of rectangular belonging functions.

Keywords: control, viscosity, temperature, variable, fuzzy regulator, drying, suspension, structure.

Поступила в редакцию/received: 25.02.2024; после рецензирования/revised: 29.02.2024;
принята/accepted: 01.03.2024