

УДК 579.6::004.942

Разработка математической модели процесса выращивания грибов в культивационной камере

Береговых Ю.В., Орлов Ю.К., Грынь О.В.
Донецкий национальный технический университет
ojk1407@gmail.com

Береговых Ю.В., Орлов Ю.К., Грынь О.В. Разработка математической модели процесса выращивания грибов в культивационной камере. В статье приведена разработка динамической математической модели для прогноза характеристик процесса роста грибов в культивационной камере. Для решения задачи был проведен анализ характеристик объекта моделирования, исследованы химико-технологические особенности протекания процесса, сформирована гипотеза о механизме процесса и формализованы математические зависимости модели.

Введение

Вешенка – самый доступный гриб для выращивания. Плоды вешенки содержат до 30% усвояемого белка по сухому весу. Он включает 17 различных аминокислот, в том числе 8 незаменимых. Употребление вешенки снижает высокое кровяное давление, улучшает пищеварение [1].

Производство грибов относится к одному из наиболее перспективных направлений развития пищевой промышленности. Крупные грибные хозяйства используют разнообразные автоматизированные системы для поддержания заданных параметров процесса выращивания грибов. Обзор литературных источников по подобным системам показал, что, несмотря на успешное решение задачи регулирования, эти системы не предполагают решение задач оптимального управления процессом [2,6-9].

Постановка проблемы

Рост конкурентной борьбы на этом рынке повышает требования к уровню эффективности управления процессом, что обуславливает актуальность задачи синтеза системы оптимального управления процессом культивирования грибов с целью увеличения объемов производства.

В данной работе приведена разработка динамической математической модели, позволяющей прогнозировать характеристики процесса выращивания грибов. Решение данной задачи включает:

- анализ характеристик объекта моделирования;
- исследование химико-технологических особенностей протекания процесса на протяжении

всего цикла роста грибов;

- формирование гипотезы о механизме процесса;
- формализацию математических зависимостей.

Объект моделирования

Грибница вешенки обладает активными ферментами для усвоения растительного сырья. За счет высокой скорости роста грибницы вешенка имеет конкурентное преимущество перед плесенью. Поэтому, в отличие от других грибов, вешенка может вырасти даже при не очень качественной термической обработке субстрата. Субстратный блок для культивирования вешенки представляет собой полиэтиленовый мешок плотно набитый древесными опилками или другими растительными материалами [1]. На рисунке 1 показан процесс выращивания вешенки.



Рисунок 1 – Выращивание вешенки

Анализ объекта моделирования содержит исследование устройства культивационной камеры и процесса выращивания грибов.

Культивационная камера схематически представлена на рисунке 2

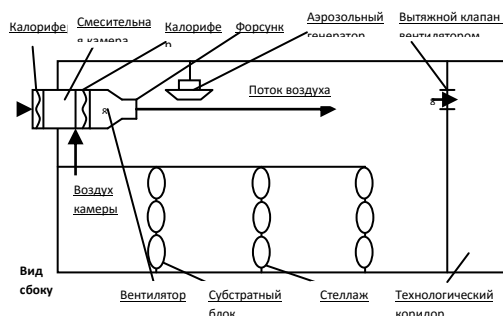


Рисунок 2 – Схематическое представление культивационной камеры

Как видно на рисунке 2, культивационная камера представляет собой закрытое помещение,

которое содержит: стеллажи для подвешивания блоков (три яруса); субстратные блоки (мицелий, субстрат, грибы); аэрозольный генератор; блок предварительной подготовки воздуха окружающей среды (калориферы, смесительная камера, приточный вентилятор); блок вывода воздуха культивационной камеры (вытяжной клапан, вентилятор) [3].

При производстве грибов выделяют четыре глобальные стадии. Первая стадия – стадия застарения субстратных блоков мицелием, вторая – стадия плодоношения и первая волна плодоношения, третья – стадия отдыха между двумя волнами плодоношения, или стадия сна, и последняя – это стадия плодоношения и вторая волна плодоношения (таблица 1).

Таблица 1 – Климатические условия в культивационной камере в процессе роста грибов вешенки в зависимости от фаз развития

№	Стадия роста	Количество дней	Фаза развития	Условия	Примечание
1	Зарастание субстратных блоков мицелием	13	Инкубация	Т воздуха 22-25°C RH 70-75% CO ₂ до 3000-5000 ppm	В период максимального разогрева температура субстрата достигает 30°C
		2	Инициация увлажнением	RH 90-95%	
		1	Образование примордиев	CO ₂ до 2000 ppm	
2	Плодообразование и 1-я волна плодоношения	4	Плодообразование	Т воздуха 14-15°C RH 90-92% CO ₂ до 900-1100 ppm	Для плодообразования не требуется резкого понижения температуры При умеренно низкой температуре качество грибов лучше
		9	Сбор 1-й волны	RH 86-88% CO ₂ 850-900 ppm	
3	Отдых между двумя волнами	5	Нагрев	Т воздуха 20-23°C RH 90-92% CO ₂ до 2000 ppm	Массово появляются примордии
4	Плодообразование и 2-я волна плодоношения	5	Плодообразование	Т воздуха 14-15°C RH 90-92% CO ₂ до 900-1100 ppm	На второй волне температуру воздуха поднимают на 1-2 °C
		10	Сбор 2-й волны	Т воздуха 15-16°C RH 86-88% CO ₂ до 900 ppm	

В таблице приведены, в зависимости от стадии развития грибов, климатические условия для всего цикла роста вешенки (50 дней).

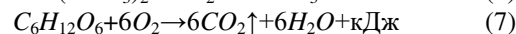
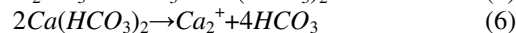
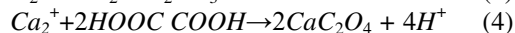
Процесс культивирования грибов возможен при определенных параметрах микроклимата. На

скорость роста грибов и их качество влияют следующие факторы: значения концентрации углекислого газа; значения оптимальной влажности; значения скорости подачи свежего воздуха; значения температуры [4]. Для

выявления механизма влияния указанных факторов на процесс производства необходимо исследовать его химико-биологические особенности.

В результате исследования химико-биологических особенностей протекания процесса культивирования грибов были выявлены основные химические реакции, происходящие в зоне субстратного блока и в зоне плодовых тел [5].

В зоне субстратного блока основными являются следующие реакции:



В зоне плодовых тел (грибов) основными химическими реакциями являются реакции (1), (2) и (3).

По результатам проведенного химико-технологического анализа сформирована гипотеза о механизме процесса.

Зона культивирования грибов разбивается на три псевдооднородные зоны (рисунок 3):

- 1-я зона – зона субстратного блока;
- 2-я зона – зона плодовых тел (грибов);
- 3-я зона – зона культивационной камеры.

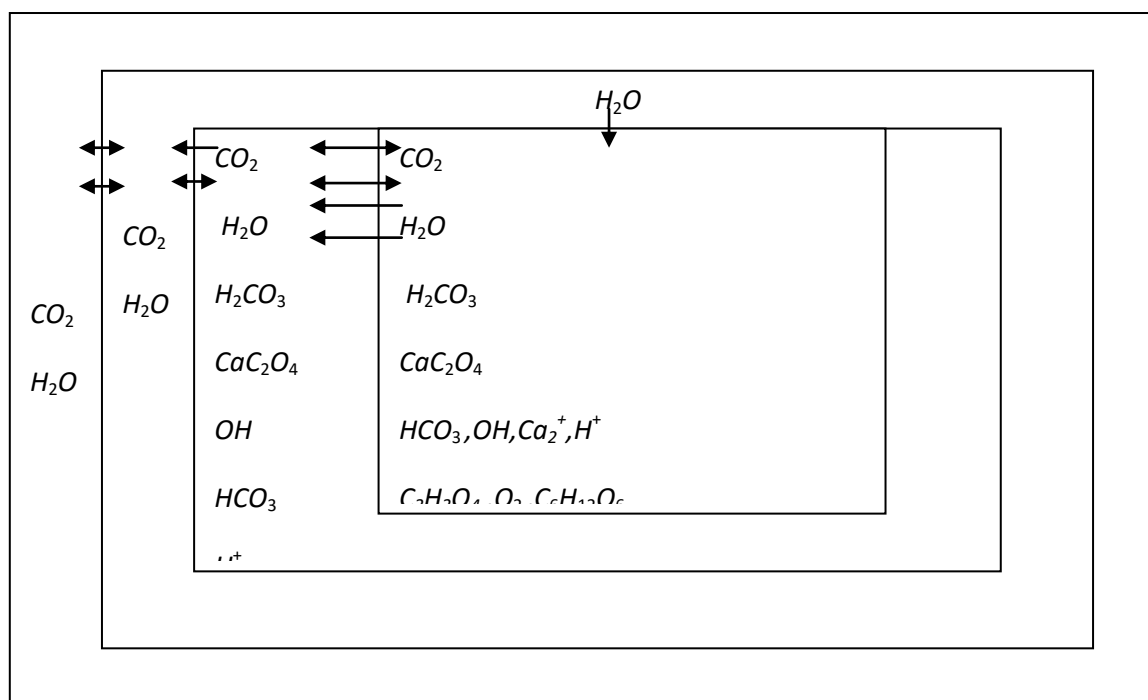


Рисунок 3 – Схематическое представление процесса культивирования грибов вешенки с разбиением на зоны

Для каждой из зон сформирован материальный и тепловой баланс, отображенный схематически на рисунке 3.

Материальный баланс характеризует изменение количества веществ в зоне, а тепловой баланс – изменение количества тепла в зоне.

При формировании гипотезы о механизме процесса приняты допущения: градиенты плотностей внутри каждой из зон отсутствуют, химические реакции протекают лишь в первой и второй зонах, а реакции (4) и (5) не принимаются во внимание из-за их незначительного влияния на процесс культивирования грибов вешенки. В качестве органической добавки в субстрате присутствует только щавелевая кислота.

Разработка математической модели

На основе сформированной гипотезы разработаны уравнения математической модели в виде системы дифференциальных уравнений. Некоторые типовые уравнения приведены ниже.

Изменение количества угольной кислоты H_2CO_3 в зоне 1:

$$\frac{dG_1^{H_2CO_3}}{dt} = \chi_{H_2CO_3}^{CO_2} \cdot g_{13}^{CO_2}(t) - g_{d11}^{H_2CO_3}(t) - \beta_1 F_{1-2} \gamma_1 ([H_2CO_3]_1 - [H_2CO_3]_2) \quad (8)$$

где $\chi_{вещ-во}^{вещ-во}$ – коэффициент стехиометрии;

$g_{13}^{CO_2}(t)$ – количество углекислого газа CO_2 ,

потраченное на реакцию (1.3) (кг/с); $g_{d11}^{H_2CO_3}(t)$ – количество угольной кислоты H_2CO_3 , потраченное на реакцию (1.1) (кг/с); β_i – коэффициент переноса массы из i -ой зоны (м/с); $i = \overline{1,4}$; F_{1-2} – площадь контакта 1-ой и 2-ой зоной (m^2); γ_i – плотность i -й зоны (кг/ m^3); $[вещество]_i$ – концентрация вещества в i -ой зоне (доли).

Изменение количества тепла в зоне 2:

$$\frac{dQ_2}{dt} = \beta_3 F_{2-3} \gamma_3 C_3 (T_3 - T_2) + K_1 F_{1-2} (T_1 - T_2) - \beta_2 F_{2-3} \gamma_2 C_2 (T_2 - T_3) \quad (9)$$

где C_i – удельная теплоемкость i -ой зоны (Дж/К·кг); T_i – температура i -ой зоны (К); K_i – параметры модели.

Расчет нелинейных зависимостей в правых частях уравнений приведен ниже.

Расчет количества диссоциированной угольной кислоты H_2CO_3 по реакции (3) в зоне i :

$$g_{di3}^{H_2CO_3} = K_2 \exp\left(-\frac{E_{H_2CO_3}}{RT_i}\right) \cdot [H_2CO_3]_i \quad (10)$$

где $E_{вещ-во}$ – энергия активации (Дж/моль); $R = 8,314$ (Дж/(моль·К)) – универсальная газовая постоянная.

Расчет количества углекислого газа CO_2 по реакции (3) в зоне i :

$$g_{i3}^{CO_2} = K_3 \exp\left(-\frac{E_{CO_2}}{RT_i}\right) \cdot [CO_2]_i \cdot [OH]_i \quad (11)$$

Расчет количества глюкозы $C_6H_{12}O_6$ по реакции (7) в зоне 1:

$$g_{17}^{C_6H_{12}O_6} = K_4 \exp\left(-\frac{E_{C_6H_{12}O_6}}{RT_1}\right) \cdot [C_6H_{12}O_6]_1 \cdot [O_2]_1 \quad (12)$$

Расчет концентраций веществ для всех псевдооднородных зон приведен ниже.

Концентрация угольной кислоты H_2CO_3 для i -ой зоны:

$$[H_2CO_3]_i = \frac{G_i^{H_2CO_3}(t)}{G_i(t)} \quad (13)$$

где $G_i^{H_2CO_3}(t)$ – масса угольной кислоты H_2CO_3 в i -ой зоне (кг); $G_i(t)$ – масса всех веществ i -ой зоны (кг).

Концентрация углекислого газа CO_2 для i -

ой зоны:

$$[CO_2]_i = \frac{G_i^{CO_2}(t)}{G_i(t)} \quad (14)$$

где $G_i^{CO_2}(t)$ – масса углекислого газа CO_2 в i -ой зоне (кг).

Концентрация ионов OH для i -ой зоны:

$$[OH]_i = \frac{G_i^{OH}(t)}{G_i(t)} \quad (15)$$

где $G_i^{OH}(t)$ – масса ионов OH в i -ой зоне (кг).

Концентрация глюкозы $C_6H_{12}O_6$ для зоны 1:

$$[C_6H_{12}O_6]_1 = \frac{G_1^{C_6H_{12}O_6}(t)}{G_1(t)} \quad (16)$$

где $G_1^{C_6H_{12}O_6}(t)$ – масса глицерина $C_6H_{12}O_6$ в зоне 1 (кг).

Концентрация кислорода O_2 для зоны 1:

$$[O_2]_1 = \frac{G_1^{O_2}(t)}{G_1(t)} \quad (17)$$

где $G_1^{O_2}(t)$ – масса кислорода O_2 в зоне 1 (кг).

Плотности зон рассчитываются по нижеприведенной формуле.

Плотность i -ой зоны:

$$\gamma_i(t) = \frac{G_i(t)}{V_i(t)} \quad (18)$$

где $V_i(t)$ – это объем i -ой зоны (m^3).

Расчет массы зоны:

$$G_i(t) = \sum G_i^{вещ-во}(t) \quad (19)$$

где $\sum G_i^{вещ-во}(t)$ – сумма масс всех веществ в зоне i .

Выводы

Таким образом, разработана структура динамической математической модели для прогноза характеристик процесса роста грибов в культивационной камере. Для её практического применения необходимо провести процедуру параметрической идентификации и сформировать критерии и алгоритм оптимального управления процессом.

Литература

1. <http://keisideas.ru/novye-biznes-idei/vyrashhivanie-gribov-domashnyaya-biznes-ideya.html?/> – Выращивание грибов – домашняя бизнес идея.
2. Дудка И.А., Вассер С.П., Бухало А.С. Промышленное культивирование съедобных грибов. – К.: Наукова думка, 1978. – 264с.
3. Тищенко А.Д. Субстраты для культивирования вешенки. Часть 1 //Школа грибоводства – Донецк: Биотехнологии, 2003. – 60с.
4. Дудка И.А., Вассер С.П. Грибы: Справочник миколога и грибника. – К.: Наукова думка, 1987. – 535с.
5. Тищенко А.Д. Субстраты для культивирования вешенки. Часть 2 //Школа грибоводства – Донецк: Биотехнологии, 2003. – 78с.
6. Рысс А.А., Гурвич Л.И. Автоматическое управление температурным режимом в теплицах. – М.: Агропромиздат, 1986. – 128 с.: ил.
7. Крушель Е.Г. Нелинейные алгоритмы регулирования микроклимата. / Крушель Е.Г., Семенов В.Г., Степанченко И.В., Сургутанов В.В. // Известия ВолгГТУ. – 2007. -№3. – с.89-92.
8. Хребтович А.М., Гарбуз В.М., Иванов В.И. Способ регулирования микроклимата в теплице и система для его осуществления. Патент 1819537 от 28.06.91.
9. Изаков Ф.Я., Попова С.А., Ждан А.Б. Способ автоматического управления температурным режимом в теплице и система для его осуществления. Патент 2128425 от 28.07.94.
10. Суханова Н.В. Разработка математической модели ферментации дрожжей с учетом распределенности параметров. – Воронеж: Воронеж, гос. технол. ин-т, 1995. – 18 с. – Деп. в ВИНТИ 21.02.95., * 493– В 95.

Береговых Ю.В., Орлов Ю.К., Грынъ О.В. Разработка математической модели процесса выращивания грибов в культивационной камере.

В статье приведена разработка динамической математической модели для прогноза характеристик процесса роста грибов в культивационной камере. Для решения задачи был проведен анализ характеристик объекта моделирования, исследованы химико-технологические особенности протекания процесса, сформирована гипотеза о механизме процесса и формализованы математические зависимости модели.

Берегових Ю.В., Орлов Ю.К., Гринь О.В. Розробка математичної моделі процесу вирощування грибів в камері культивування.

В статті наведена розробка динамічної математичної моделі для прогнозу характеристик процесу росту грибів у культивуванні камері. Для рішення задачі був проведений аналіз характеристик об'єкта моделювання, досліджені хіміко-технологічні особливості протікання процесу, сформована гіпотеза про механізм процесу і формалізовані математичні залежності моделі.

Beregovych YU.V., Orlov Yu.K., Gryn O.V. Development of mathematical model of process of cultivation of mushrooms in a kultivatsionny chamber.

In actual development of dynamic mathematical model is resulted for the prognosis of characteristics of process of growth of mushrooms in a cultivating chamber. For the decision of task the analysis of characteristics of object of modeling and research of chemical-technological of flowing of process was conducted, a hypothesis is formed about the mechanism of process and mathematical dependences of model are formalized.

*Статья поступила в редакцию 20.05.2016
Рекомендована к публикации д-ром техн. наук В.Н. Павлышом*