

На правах рукописи

МОСКОВЕЦ Андрей Леонидович

**ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИМ
ПРОЦЕССОМ КОМПОСТИРОВАНИЯ В БИОРЕАКТОРЕ**

Специальность 05.13.06 – “Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами (промышленность)”

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Краснодар – 2006

Работа выполнена
в Кубанском государственном технологическом университете

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Пиотровский Дмитрий Леонидович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Косачев Вячеслав Степанович;

кандидат технических наук, доцент
Левченко Владимир Иванович

Ведущая организация: Кубанский государственный аграрный
университет

Защита состоится “20” декабря 2006 г. в 16.00 на заседании
диссертационного совета Д 212.100.04 в Кубанском государственном
технологическом университете по адресу: 350072, г. Краснодар,
ул. Московская, 2а, конференц-зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Кубанского
государственного технологического университета по адресу: 350072,
г. Краснодар, ул. Московская, 2а

Автореферат разослан “20” ноября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.100.04
канд. техн. наук, доцент



А.В. Власенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Снижение плодородия почвы, ужесточение экологических требований и рыночные механизмы хозяйствования в агропромышленном комплексе по-новому ставят задачу переработки органических отходов животноводства и растениеводства. С этой точки зрения перспективным является интенсивное компостирование в биореакторе для получения органического удобрения – компоста.

Основными параметрами процесса компостирования являются температура субстрата и концентрация кислорода. Для получения качественного продукта эти параметры должны быть однородны в течение времени процесса. В существующих устройствах задачи управления процессом решаются с помощью вентилирования и перемешивания субстрата. Применение вентиляции позволяет отводить теплоту экзотермической реакции за счет испарительного охлаждения. Однако при движении по объему субстрата воздух нагревается и увлажняется. Это приводит к возникновению существенной неоднородности параметров процесса и в конечном итоге к получению некачественного продукта. Такой недостаток можно устранить за счет дополнительной подачи воздуха с заданными параметрами при его движении вдоль оси биореактора.

Существующие системы управления периодическим процессом компостирования не используют математическую модель процесса при выработке управляющего воздействия и имеют недостатки, приводящие либо к усложнению системы, либо к дополнительным затратам на управление процессом и снижению качества получаемого продукта. За последние 30 лет опубликовано более трех десятков работ, в том числе классические работы R.T. Naug (1993), H.M. Keener (1993), K. Nakasaki (1987), посвященных разработке моделей процесса компостирования. Управление основными параметрами процесса возможно за счет управления системой вентиляции. Однако в на-

стоящее время в литературе нет опубликованных исследований, посвященных оптимальному управлению системой вентиляции.

Поэтому актуальны задачи снижения неоднородности параметров процесса и синтеза оптимального управления системой вентиляции при периодическом процессе компостирования в биореакторе на основе существующих моделей.

Работа выполнена в соответствии с тематическим планом НИР КубГТУ по теме 8.1.01-05, «Автоматизированное управление техническими и технологическими объектами», § 47.

Цель работы. Целью диссертационной работы является оптимизация управления системой вентиляции при периодическом процессе компостирования в биореакторе и снижение неоднородности параметров процесса за счет управления дополнительной подачей воздуха с заданными параметрами.

Основные задачи исследования. Для достижения цели работы поставлены следующие задачи:

- разработка модели тепломассообмена субстрата компостирования с воздухом системы вентиляции при дополнительной подаче воздуха с заданными параметрами;
- разработка оптимального управления системой вентиляции биореактора с использованием модели процесса компостирования;
- разработка управления количеством дополнительно подаваемого воздуха для достижения минимальной неоднородности параметров процесса.

Методы исследований и достоверность полученных результатов. При выполнении работы применялись методы теории управления, теории систем и математического моделирования, регрессионного анализа, вычислительной математики. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных методик теоретического и экспериментального исследования, применением современных вычислительных методов, согласием экспериментальных данных и результатов теоретического исследо-

вания.

Научная новизна. Научная новизна заключается в получении следующих научных результатов:

- поставлена и решена задача оптимального управления системой вентиляции при компостировании в биореакторе в смысле максимизации качества получаемого продукта либо улучшения режима работы системы автоматике при неизменной производительности биореактора;
- разработана модель тепломассообмена субстрата компостирования при дополнительной подаче воздуха с заданными параметрами;
- поставлена и решена задача оптимального управления дополнительным потоком воздуха системы вентиляции с заданными параметрами в смысле снижения неоднородности скорости процесса компостирования по объему субстрата.

Основные положения, выносимые на защиту:

- алгоритм квазиоптимального управления системой вентиляции биореактора в режиме полной рециркуляции;
- способ представления уравнений состояния при дополнительной подаче воздуха с заданными параметрами;
- представление замыкающих соотношений в виде суммы экспонент переменных состояния;
- алгоритм управления подачей дополнительного потока воздуха с заданными параметрами для снижения неоднородности процесса компостирования по объему биореактора.

Практическая ценность и реализация результатов. Результаты работы позволили добиться снижения неоднородности скорости процесса компостирования по объему субстрата за счет управления дополнительным потоком воздуха. Имитационное моделирование процесса компостирования на модели биореактора HERHOF™ показало значительное снижение нагрузки на регулирующий орган при сохранении качества получаемого продукта.

Реализация результатов работы осуществлена на производственной базе федерального государственного учреждения “Краснодарский экспериментальный центр биологической защиты растений”. Экспериментальная установка, реализующая предложенную конструкцию биореактора, и система автоматического управления, функционирующая согласно разработанным алгоритмам, прошли испытания и рекомендованы к использованию для производства компоста.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на Всероссийской научно-практической конференции “Перспективы развития пищевой промышленности России” в Оренбурге, 2005 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ. Из них: 1 патент, 10 статей (из них 7 в реферируемых журналах), 1 тезисы доклада.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 150 страницах. Работа содержит 53 рисунка, 12 таблиц, библиографию из 91 наименования на 9 страницах и 3 приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и основные задачи исследования, показана научная новизна и практическая ценность, дана общая характеристика диссертационной работы.

Работа логически разделена на две основные части. В первой части получено оптимальное управление системой вентиляции биореактора в смысле максимизации качества получаемого продукта либо улучшения режима работы системы автоматике при неизменной производительности биореактора. Во второй части работы построена математическая модель тепло-массообмена субстрата компостирования с воздухом системы вентиляции, на

основе которой снижена неоднородность параметров процесса за счет управления подачей воздуха с заданными параметрами вдоль оси биореактора.

В первой главе проведен анализ текущего состояния переработки органических отходов сельского хозяйства, поставлены задачи научного исследования. Основной технической проблемой для поддержания температурного режима является низкая теплопроводность субстрата. Это приводит к невозможности использования теплообменников в биореакторах промышленного масштаба. Поэтому удаление излишков теплоты при компостировании производится с помощью испарительного охлаждения. Для этого через биореактор пропускается воздух из окружающей среды, что гарантирует эффективное охлаждение субстрата и поддержание аэробных условий, однако ведет к возникновению существенной неоднородности параметров процесса и получению некачественного продукта.

Критический анализ отечественных и зарубежных устройств компостирования показал, что существующие конструкции биореакторов имеют общий недостаток: однонаправленный поток воздуха приводит к значительной неоднородности параметров процесса. Возникновение этого явления объясняется тем, что поток воздуха при движении по объему субстрата изменяет свои параметры (нагревается и увлажняется). Это приводит к изменению скорости испарительного охлаждения и в конечном итоге значительному разбросу параметров процесса по объему биореактора.

Уменьшить неоднородность параметров процесса при однонаправленной вентиляции можно за счет дополнительной подачи воздуха с заданными параметрами при его движении вдоль оси биореактора. Управление количеством подаваемого воздуха позволит добиться минимальной неоднородности параметров процесса. При построении модели тепломассообмена субстрата компостирования с воздухом системы вентиляции содержимое биореактора может быть представлено в виде двухфазной среды. Такой подход в сочетании с представлением субстрата как сплошной среды (O.F. von Meien, D.A.

Mitchell, 2002) успешно используется для моделирования испарительного охлаждения при твердофазной ферментации зерна кукурузы в микробиологическом производстве.

В настоящее время вопрос оптимального управления периодическим процессом компостирования в биореакторе не исследован. Существующие системы управления не используют математическую модель процесса компостирования при выработке управляющего воздействия и имеют недостатки, приводящие либо к усложнению системы, либо к дополнительным затратам по управлению процессом и снижению качества получаемого продукта.

Во второй главе разработано оптимальное управление системой вентиляции при периодическом процессе компостирования в биореакторе на основе модели процесса.

Основной целью процесса компостирования является биологическая стабилизация (разложение) органических веществ, содержащихся в отходах. Исходный субстрат можно условно разделить на разложимые микроорганизмами (органическая фракция) и неразложимые вещества (зольная фракция). При соблюдении прочих необходимых требований технологии компостирования (санитаризация компоста, поддержание аэробных условий, температурный режим), необходимо добиваться максимально возможного разложения органической фракции исходного субстрата. При компостировании скорость разложения органического вещества обычно описывается уравнением кинетики первого порядка:

$$\frac{dM_{VS}}{dt} = -k_T \cdot M_{VS} \quad (1)$$

$$k_T = k_{20} \cdot (1.066^{(T-7)} - 1.21^{(T-37)}) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{4}\right)\right) \quad (2)$$

В настоящей работе задача оптимального управления ставится в

смысле максимизации качества получаемого продукта либо улучшения режима работы системы автоматики при неизменной производительности биореактора. Для идеальных условий процесса (k_T постоянно и максимально) можно рассчитать максимальную степень разложения органического вещества. Согласно уравнению кинетики процесса (1), в этом случае масса разложенного органического вещества изменяется по экспоненте и является функцией только времени процесса. В условиях фиксированного времени процесса оценкой качества рассматриваемого управления может служить отношение разложенной массы органической фракции к максимально возможному разложению:

$$J(k_T(t)) = \frac{M_{VS}(0) - M_{VS}(t)}{M_{VS}(0) - M_{VS}^{\max}(t)} \xrightarrow{k_T(t)} \max \quad (3)$$

$$k_T(t) \in [0; k_T^{\max}], \quad M_{VS}(t) \in [0; M_{VS}(0)] \quad (4)$$

Задача оптимального управления поставлена в виде (1) – (4). Показано, что оптимальное управление процессом компостирования заключается в поддержании максимальной скорости в течение всего времени процесса.

Учитывая температурную зависимость скорости компостирования (2) и необходимость обеспечения аэробных условий, оптимальное управление процессом компостирования в биореакторе может быть сведено к задаче управления системой вентиляции в целях поддержания температуры субстрата и обеспечения аэробных условий процесса.

Показано, что использование режима частичной рециркуляции отвечает полученному решению задачи оптимального управления процессом компостирования. Для случая полной рециркуляции возможно только квази-оптимальное управление, обеспечивающее минимизацию отклонения от полученного оптимального управления.

В качестве управления, близкого к оптимальному, предложено ис-

пользовать последовательную работу системы вентиляции в режимах вентиляции и рециркуляции, длительность которой изменяется в зависимости от состояния субстрата с учетом модели процесса. Предложен алгоритм, осуществляющий такое управление.

Апробация полученного управления произведена на модели биореактора HERNOF™ Reactor System, Германия. Применение предложенного алгоритма позволило значительно снизить нагрузку на регулирующий орган системы вентиляции при сохранении качественных показателей получаемого продукта.

В третьей главе разработана одномерная модель тепломассообмена субстрата компостирования с воздухом, позволяющая описать распределение температуры и влажности субстрата и воздуха системы вентиляции вдоль оси биореактора во времени и пространстве.

Уравнения состояния модели получены из рассмотрения дифференциального баланса теплоты и массы для двухфазной среды, при этом субстрат компостирования рассматривается как сплошная среда. В результате предельного перехода получены уравнения состояния модели тепломассообмена:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon \rho_g \frac{\partial \varphi_g}{\partial t} + G \cdot \frac{\partial \varphi_g}{\partial x} = Ka \cdot (\varphi_s - \varphi_s^*) - g \cdot (\varphi_g - \varphi_{ex}) \\ \frac{\partial \varphi_s}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_s} [Ka \cdot (\varphi_s - \varphi_s^*)] + G_w k_T M_{vs} \\ G \cdot (c_{pg} + \varphi_g c_{pv}) \frac{\partial T_g}{\partial x} + \varepsilon \rho_g (c_{pg} + \varphi_g c_{pv}) \frac{\partial T_g}{\partial t} = -ha \cdot (T_g - T_s) - g \cdot (c_{pg} + \varphi_g c_{pv})(T_g - T_{ex}) \\ (c_{ps} + \varphi_s c_{pw}) \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = ha \cdot (T_g - T_s) - \lambda \cdot Ka \cdot (\varphi_s - \varphi_s^*) + h_c k_T M_{vs} \end{array} \right. \quad (5)$$

Моделирование тепломассообмена при компостировании требует идентификации эмпирических соотношений Ka , ha , φ_s^* ; измерения плотности, порозности и удельной теплоемкости субстрата компостирования, что составляет задачу экспериментального исследования.

В четвертой главе проведена идентификация и проверка адекватности модели тепломассообмена воздуха системы вентиляции с субстратом компостирования. Задачей проведения эксперимента стало: в условиях, идентичных компостированию в биореакторе, организовать тепломассообмен в двухфазной среде и зарегистрировать параметры процесса для последующей идентификации регрессионной модели замыкающих соотношений.

Биологические процессы при компостировании могут быть представлены как точечные источники тепловыделения и влагообразования. Задачей эксперимента является исследование физических свойств исходного субстрата компостирования. Поэтому биологические процессы были исключены за счет использования биологически инертного субстрата.

В качестве биологически инертного субстрата, идентичного субстрату компостирования, использовалась смесь соломы пшеницы и земли, увлажненная водой. Земля использовалась как биологически инертный имитатор, близкий по своим физическим свойствам к органическому веществу субстрата компостирования.

Основным результатом измерений в эксперименте является распределенность параметров субстрата. Для этого толщина слоя субстрата была выбрана равной 1.2 м с расположением датчиков температуры на высоте 0.1, 0.6 и 1.1 м от уровня загрузки субстрата.

Тепломассообмен происходил в теплоизолированном экспериментальном биореакторе при принудительной вентиляции субстрата нагретым воздухом. Эксперимент проводился с использованием традиционной системы вентиляции при постоянном расходе воздуха. Расход воздуха изменялся в пределах от 0.020 до 0.060 кг сухого воздуха/(с·м²).

Регистрировались следующие параметры процесса: расход воздуха системы вентиляции; температура воздуха на входе и выходе биореактора; влажность воздуха на входе и выходе биореактора; температура субстрата в 3 точках; влажность субстрата до начала эксперимента; влажность верхнего

слоя субстрата после эксперимента; влажность нижнего слоя субстрата после эксперимента.

Были проведены 3 эксперимента, отличающиеся тепловым режимом и расходом воздуха. Первый эксперимент был проведен для определения эмпирических соотношений при постоянном расходе воздуха системы вентиляции, равном $20 \text{ м}^3/\text{ч}$. Второй эксперимент отличался тепловым режимом и расходом воздуха ($11 \text{ м}^3/\text{ч}$). Его проведение позволило определить влияние расхода воздуха на исследуемые эмпирические соотношения. Третий эксперимент отличался тепловым режимом и расходом воздуха ($15 \text{ м}^3/\text{ч}$) и был проведен для проверки адекватности идентифицированных эмпирических соотношений. По полученным экспериментальным данным была поставлена задача идентификации замыкающих эмпирических соотношений модели $ha(T_g, G)$, $Ka(T_g, \varphi_s)$, $\varphi_s^*(T_g, a_{wg})$.

Регрессионные модели замыкающих эмпирических соотношений были заданы в виде суммы экспонент параметров состояния объекта со взаимовлиянием параметров. Для расчета процесса с исследуемым набором параметров регрессионной модели использовалась явная схема интегрирования метода конечных разностей (МКР). Выбор МКР объясняется простотой реализации алгоритма. Явная схема дает возможность отказаться от решения систем нелинейных уравнений при расчете каждого шага модели. Для реализации такой схемы уравнения состояния модели (3) представлены в виде уравнений в конечных разностях, на основе которых разработана программа на языке Pascal. Входными данными программы является исследуемый набор параметров регрессионной модели, выходными – графики рассчитанной модели и оценка качества моделирования. Расчет следующего временного слоя параметров модели осуществлялся на основе параметров предыдущего временного слоя. Это позволило хранить в программе параметры процесса только по двум временным слоям и снизить требования к необходимому объему оперативной памяти.

Поиск параметров модели осуществлялся из начального приближения методом градиента. Для учета локальных особенностей рельефа построенной целевой функции использовался адаптивный алгоритм подбора величины шага в направлении вектора антиградиента. Это позволило автоматически увеличивать скорость спуска при благоприятном рельефе и отслеживать резкие перепады направления вектора антиградиента за счет уменьшения шага.

Однако вследствие наличия вычислительных погрешностей поверхность целевой функции не является гладкой и имеет изолированные области с локальными экстремумами. Используемый алгоритм выбора длины шага жестко настроен на улучшение процесса на каждом шагу поиска и имеет для этого только одну возможность: дробление величины шага. Поэтому при попадании поиска в такую изолированную область размер шага бесконечно дробится и поиск фактически прекращается. Поэтому было принято решение сочетать поиск градиентным методом с покоординатным спуском и выполнять переход в точку, которая обеспечивает наилучший для двух методов результат.

Для некоторых параметров модели пробный шаг приводил к резкому ухудшению качества моделирования процесса. Это негативно влияло на использование обоих поисковых методов. Поэтому использовался алгоритм корректировки величины пробного шага поиска, который автоматически уменьшает величину пробного шага по какому-либо параметру, если этот шаг вызывает резкое увеличение целевой функции.

Поскольку размерность параметров регрессионной модели отличается на несколько порядков, для каждого параметра осуществлялся подбор начальной величины пробного шага.

Осмотр поверхности целевой функции обладает высокой степенью распараллеливания вычислений: пробные шаги по двум различным параметрам модели никак не связаны. Поэтому реализация расчета модели процесса в виде отдельной программы на языке Pascal дала возможность распараллелить

расчеты и с помощью локальной сети задействовать вычислительные ресурсы нескольких компьютеров. Разработанное программное обеспечение позволило организовать вычислительный кластер на основе обычной лабораторной локальной вычислительной сети и на порядок уменьшить время расчетов (по сравнению с использованием одного персонального компьютера).

Регрессионные модели замыкающих эмпирических соотношений, идентифицированные для первого эксперимента при расходе воздуха 20 м³/ч, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} Kal(T_g, \varphi_s) = & 7.44 \cdot 10^{-9} \cdot \exp(-7.87 \cdot 10^{-4} \cdot T_g) + 3.00 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(-2 \cdot \varphi_s) + \\ & 2.00 \cdot 10^{-6} \cdot T_g \cdot \exp(-\varphi_s^2) \cdot \exp(-1.10 \cdot 10^{-2} \cdot \varphi_s) + \\ & 9.64 \cdot 10^{-7} \cdot \varphi_s \cdot \exp(3.82 \cdot 10^{-4} \cdot T_g^2) \cdot \exp(0.21 \cdot T_g) + 5.00 \cdot 10^{-9} \end{aligned} \quad (6)$$

$$hal(T_g) = 862 \cdot \exp(6.30 \cdot 10^{-2} \cdot T_g) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \varphi_s^*(T_g, a_{wg}) = & 1.40 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-4.80 \cdot 10^{-2} \cdot T_g) + 2.20 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-2.26 \cdot 10^{-4} \cdot a_{wg}) + \\ & 3.10 \cdot 10^{-3} \cdot T_g \cdot \exp(1.50 \cdot a_{wg}^2) \cdot \exp(-3.48 \cdot 10^{-2} \cdot a_{wg}) + \\ & 28.23 \cdot a_{wg} \cdot \exp(-6.18 \cdot 10^{-4} \cdot T_g^2) \cdot \exp(-7.84 \cdot 10^{-2} \cdot T_g) \end{aligned} \quad (8)$$

Сравнение экспериментальных данных и результатов расчета для первого эксперимента приведено на рисунке 1.

Поскольку за время проведения первого эксперимента расход воздуха не изменялся, установить форму влияния расхода на замыкающие эмпирические соотношения модели по данным одного эксперимента не представляется возможным. Поэтому влияние массового расхода воздуха G на замыкающие эмпирические соотношения модели идентифицировано по данным второго эксперимента при расходе воздуха 11 м³/ч в виде:

$$Ka(T_g, \varphi_s, G) = \exp(5.493 \cdot G - 0.210) \cdot Kal(T_g, \varphi_s) \quad (9)$$

$$ha(T_g, G) = \exp(6.137 \cdot G - 0.234) \cdot hal(T_g) \quad (10)$$

$$\varphi_s^*(T_g, a_{wg}) = \exp(11.559 \cdot G - 0.441) \cdot \varphi_s^*(T_g, a_{wg}) \quad (11)$$

Проверка адекватности осуществлена по результатам третьего эксперимента при расходе воздуха $15 \text{ м}^3/\text{ч}$. На основании проведенного моделирования для третьего эксперимента и рассчитанных отклонений экспериментальных и модельных данных можно сделать вывод, что при проверке адекватности усредненные отклонения модели не вышли за диапазон отклонений, полученных при идентификации параметров регрессионной модели. Это позволяет сделать вывод, что модель адекватно описывает процесс теплообмена при вентиляции субстрата компостирования воздухом.

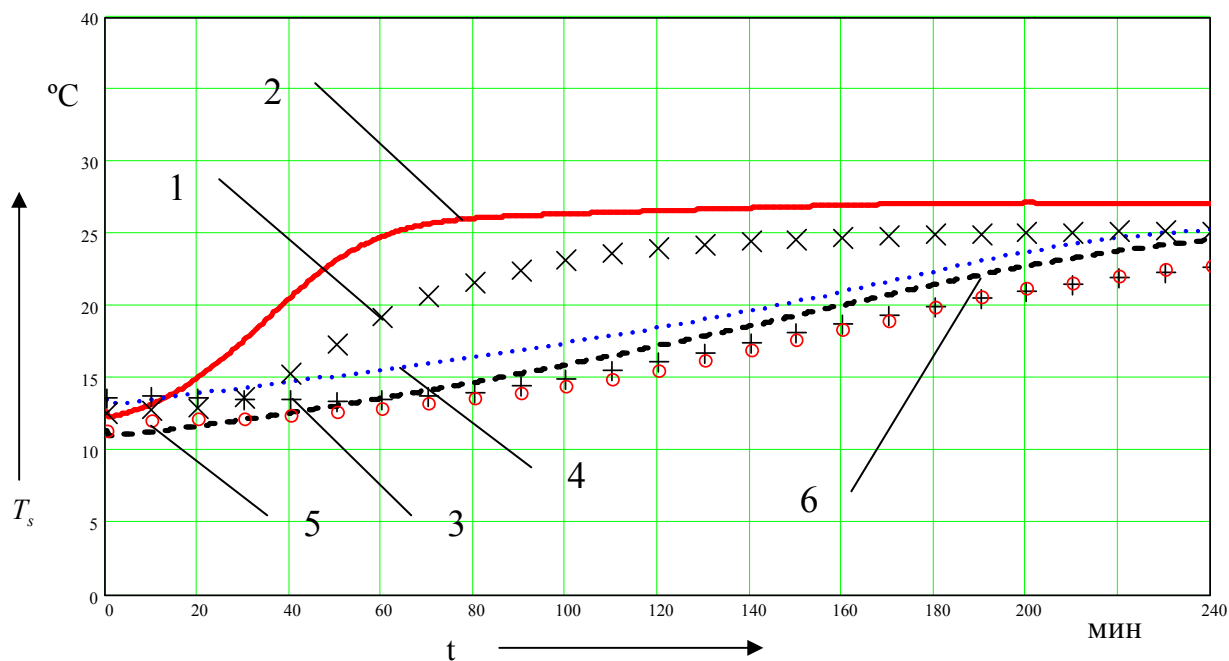


Рисунок 1 – Температура субстрата на уровне 0.1, 0.6 и 1.1 м, экспериментальные данные и результаты расчета первого эксперимента

- 1 – температура субстрата на уровне 0.1 м, экспериментальные данные;
- 2 – температура субстрата на уровне 0.1 м, расчетные данные;
- 3 – температура субстрата на уровне 0.6 м, экспериментальные данные;
- 4 – температура субстрата на уровне 0.6 м, расчетные данные;
- 5 – температура субстрата на уровне 1.1 м, экспериментальные данные;
- 6 – температура субстрата на уровне 1.1 м, расчетные данные.

Анализируя проведенное моделирование экспериментов, можно отметить хорошее качественное (градиентное) и удовлетворительное количественное совпадение расчетных и экспериментальных данных. Из графиков видно, что среднее отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает 15%, хотя наряду с этим наблюдаются более высокие эпизодические кратковременные отклонения расчетных данных от экспериментально измеренных значений. Такие отклонения можно объяснить нарушением применимости аксиоматики сплошной среды для субстрата компостирования и погрешностями измерений. Тем не менее, модель основана на общих законах сохранения массы и теплоты и применима для оценки влияния управления на объект.

В пятой главе поставлена и решена задача условной оптимизации профиля дополнительной подачи воздуха, обеспечивающего наименьшую неоднородность скорости реакции вдоль оси биореактора, с использованием разработанной математической модели тепломассообмена.

Для сравнения исследуемых профилей подачи воздуха предложен критерий эквивалентности мощности охлаждения систем вентиляции $G_{сум}$ в виде среднеинтегрального расхода воздуха системы вентиляции.

Для сравнения систем вентиляции с различными профилями подачи воздуха предложен критерий, позволяющий оценить накопленную неоднородность скорости реакции с момента начала процесса:

$$J^*(T) = \int_0^T J(t) dt \xrightarrow{G(x)} \min \quad (12)$$

$$J(t) = \frac{1}{H} \int_0^H (f(T_s(x), t) - f_{сред}(t))^2 dx \quad (13)$$

$$f_{сред}(t) = \frac{1}{H} \int_0^H f(T_s(x), t) dH \quad (14)$$

Ограничения условной оптимизации включают в себя: условие непрерывности потока воздуха; ограничение на максимальный расход воздуха для субстрата компостирования; ограничение на минимальный расход воздуха из требований обеспечения аэробных условий процесса; эквивалентность мощности охлаждения сравниваемых систем вентиляции $G_{\text{сум}}$.

Исходя из конструктивной реализации предложенной системы вентиляции, профиль расхода задан в виде полинома 2 степени:

$$G(x) = \frac{A}{H^2} x^2 + \frac{B}{H} x + C \quad (15)$$

Параметры В, С приняты независимыми переменными; параметр А выражен из условия равенства эквивалентной мощности охлаждения. С учетом наложенных ограничений область определена область возможных значений параметров В, С.

Наибольшая температурная неоднородность вносится в процесс в режиме вентиляции биореактора свежим воздухом. Поэтому оптимизация бокового потока проводилась при моделировании режима вентиляции.

Результатом поиска стали следующие значения параметров А, В, С, обеспечивающие минимальное значение целевой функции: $A = 0$, $B = 0.059572$, $C = 0.000214$. Отсюда с учетом (15) искомый профиль расхода воздуха: $G(x) = 0.059572 \cdot x + 0.000214$, $g(x) = 0.059572$. Графики изменения расхода воздуха вдоль оси биореактора для найденного субоптимального профиля подачи и традиционной системы вентиляции представлены на рисунке 2. Из графика видно, что минимальную неоднородность параметров процесса обеспечивает такой профиль подачи, при котором на единицу высоты биореактора обеспечивается дополнительная подача одинакового количества воздуха с заданными параметрами при выполнении требований аэробности процесса на границе биореактора.

Отношение накопленной степени неоднородности $J^*(t)$ для оптимального профиля подачи воздуха к профилю традиционной системы вентиляции приведено на рисунке 3. На рисунке видно, что неоднородность скорости процесса снижена на порядок для рассматриваемого примера. Поскольку полученная функция оптимального расхода воздуха представляет собой прямую, нет смысла исследовать полиномиальное задание функции со степенью более второй.

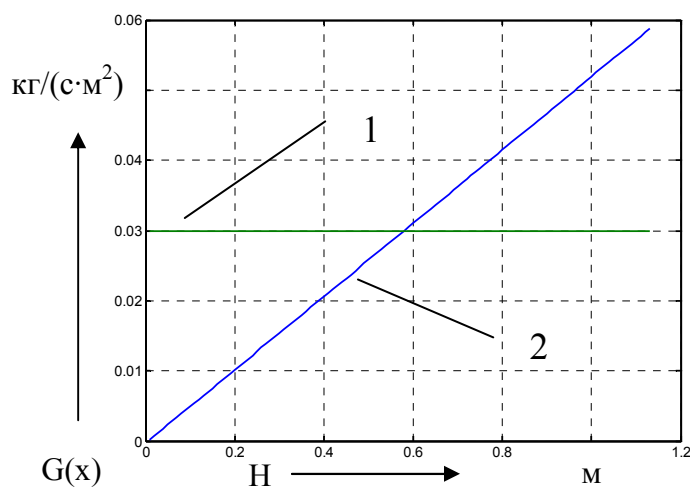


Рисунок 2 – Расход воздуха $G(x)$ для традиционной и предложенной системы вентиляции с оптимальным профилем подачи воздуха

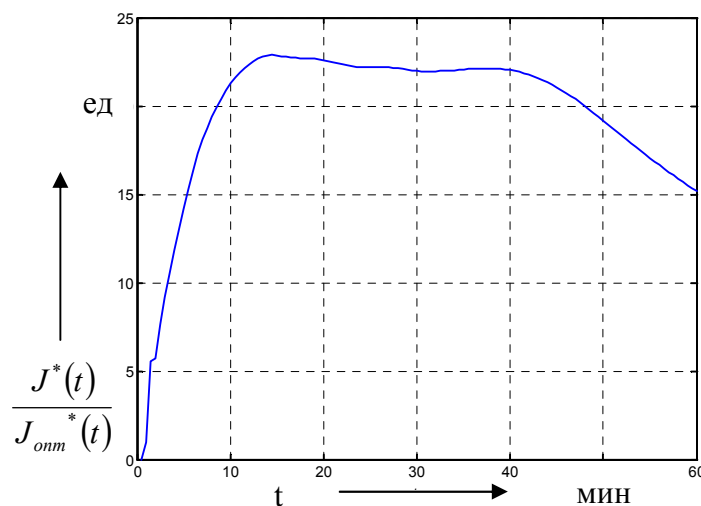


Рисунок 3 – Накопленная степень неоднородности $J^*(t)$ для сравниваемых систем вентиляции в отношении к оптимальному профилю подачи воздуха

Показано, что конструкция системы вентиляции, реализующая такую подачу воздуха, обеспечивает наилучшую однородность скорости процесса компостирования вдоль оси биореактора при любых значениях мощности системы вентиляции и исходной концентрации разложимых органических веществ.

Моделирование систем вентиляции с различной мощностью охлаждения и исходной концентрацией разложимых органических веществ показало, что для обеспечения однородной скорости процесса компостирования вдоль оси биореактора необходимо и достаточно выполнения двух условий: однородности расположения точечных источников тепловыделения и влагообразования (что достигается тщательным перемешиванием субстрата) и использованием профиля бокового потока с параметрами $A = 0$, $B = 2 \cdot (G_{\text{сум}} - C)$, $C = C_{\text{мин}}$. Это дает возможность использовать одну и ту же конструкцию системы вентиляции для различной мощности охлаждения.

Для реализации на практике полученного оптимального профиля подачи воздуха предложена конструкция биореактора для проведения интенсивного процесса компостирования (рисунок 4).

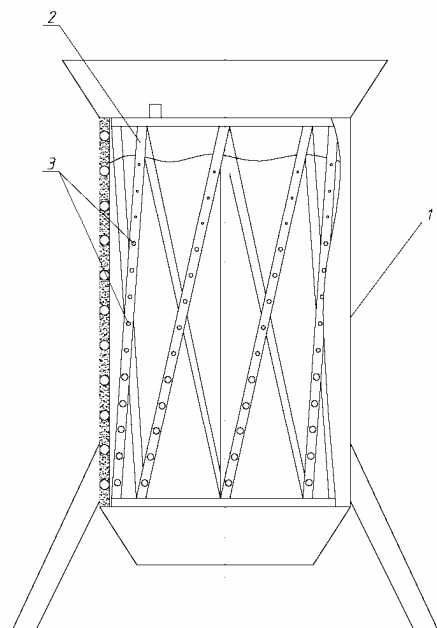


Рисунок 4 – Общий вид предложенной конструкции биореактора

На рисунке обозначены: 1 – корпус биореактора; 2 – перемешивающий, аэрирующий барабан; 3 – отверстия для аэрации

Предлагаемая конструкция позволяет обеспечить управление основными параметрами процесса компостирования и уменьшить неоднородность параметров процесса за счет реализации оптимального профиля подачи воздуха. Техническая новизна предложенной конструкции подтверждена патентом РФ №42821.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Для периодического процесса компостирования в биореакторе оптимальным в смысле максимизации качества получаемого продукта либо улучшения режима работы системы автоматике при неизменной производительности биореактора является управление, при котором в каждый момент времени поддерживается максимальная скорость процесса.

2. Управление системой вентиляции в режиме частичной рециркуляции является оптимальным в смысле качества получаемого продукта. Для режима полной рециркуляции возможно лишь квазиоптимальное управление системой вентиляции, обеспечивающее за один период управления максимальное разложение органического вещества и наиболее полное удаление продуктов метаболизма.

Для получения квазиоптимального управления системой вентиляции в режиме полной рециркуляции может быть использован разработанный алгоритм, основанный на применении математической модели процесса компостирования. Использование разработанного алгоритма позволило снизить максимальную частоту переключения рабочего органа при сохранении качественных показателей получаемого продукта.

3. Разработана математическая модель тепломассообмена субстрата компостирования с воздухом системы вентиляции при дополнительной пода-

че воздуха с заданными параметрами.

Проведено экспериментальное исследование тепломассообмена субстрата компостирования с воздухом при вентиляции. По данным эксперимента идентифицированы параметры и замыкающие эмпирические соотношения разработанной модели тепломассообмена субстрата компостирования с воздухом при вентиляции, а также проведена проверка ее адекватности.

4. Решена задача условной оптимизации профиля расхода воздуха вдоль оси биореактора. Использование предлагаемой системы вентиляции с найденным субоптимальным профилем расхода воздуха позволяет снизить неоднородность скорости процесса компостирования по объему биореактора более чем на порядок. Это позволяет устранить недостатки существующих конструкций.

5. Показано, что конструкция системы вентиляции, реализующая такую подачу воздуха, обеспечивает наибольшую однородность скорости процесса компостирования вдоль оси биореактора при любых значениях мощности системы вентиляции и исходной концентрации разложимых органических веществ субстрата.

6. Предложена конструкция биореактора для интенсивного компостирования органических отходов, отличающаяся конструкцией системы вентиляции и перемешивания субстрата. Предлагаемая конструкция позволяет обеспечить управление основными параметрами процесса компостирования и уменьшить неоднородность параметров процесса за счет реализации оптимального профиля подачи воздуха. Техническая новизна предложенной конструкции подтверждена патентом РФ №42821.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

k_T – температурно зависимая скорость процесса компостирования, кг разложенных органических веществ/(кг оставшихся органических веществ·с); k_{20} –

скорость процесса при $T=20$ °С; k_T^{\max} – максимально возможная скорость процесса; $M_{VS}(0)$ – масса органической фракции в начале процесса, кг; $M_{VS}(t)$ – масса органической фракции в момент времени t для оцениваемого процесса, кг; $M_{VS}^{\max}(t)$ – масса органической фракции в момент времени t для идеального процесса, кг; φ_g – влагосодержание газовой фазы, кг воды/кг воздуха; φ_s – влагосодержание субстрата, кг воды/кг субстрата; T_g – температура газовой фазы, °С; T_s – температура субстрата, °С; ρ_g – плотность сухого газа, кг/м³; c_{pg} – удельная теплоемкость сухого газа, Дж/(кг·К); c_{pv} – удельная теплоемкость водяного пара, Дж/(кг·К); c_{pw} – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К); λ – удельная теплота испарения воды, Дж/кг; ρ_s – плотность субстрата, кг субстрата/м³; ε – порозность субстрата, м³ пор/м³ субстрата; c_{ps} – удельная теплоемкость субстрата, Дж/(кг·К); φ_{ex} – влагосодержание подаваемого воздуха системы вентиляции, кг воды/кг воздуха; T_{ex} – температура подаваемого воздуха системы вентиляции, °С; $G(x)$ – профиль подачи воздуха в системе вентиляции как функция расхода воздуха в точке на высоте x от уровня загрузки субстрата, м³/ч; $g(x)$ – производная профиля подачи воздуха, $g(x) = \frac{dG}{dx}(x)$, м³/ч; t – время процесса, с; x – расстояние от нижнего уровня загрузки субстрата, м; Ka – скорость массопереноса между субстратом и газовой фазой, кг сухого вещества/(с·м³); ha – скорость теплообмена между субстратом и газовой фазой, Дж/(с·м³·К); φ_s^* – равновесное влагосодержание субстрата при известных температуре и влагосодержании газовой фазы, кг воды/кг субстрата; G_w – коэффициент влагообразования, кг воды/кг разложенного органического вещества; h_c – теплота окисления разложимых органических веществ, Дж/кг; M_{vs} – концентрация разложимых органических веществ, кг разложимых органических веществ/кг субстрата; $J(t)$ – степень неоднородности скорости компостирования вдоль оси биореактора в момент

времени t ; $f(T_s(x), t)$ – скорость процесса на высоте x от уровня загрузки субстрата в момент времени t ; $f_{\text{сред}}(t)$ – среднеинтегральная скорость компостирования вдоль оси биореактора в момент времени t ; A , B , C – параметры задания профиля расхода воздуха.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Московец А.Л., Усатиков С.В., Пиотровский Д.Л. Постановка задачи и анализ оптимального управления процессом компостирования. – Краснодар, 2004. – 45 с. – Деп. в ВИНТИ 06.12.04, № 1926-B2004.

2. Московец А.Л., Усатиков С.В. Оптимальное управление системой вентиляции биореактора при компостировании. – Краснодар, 2006. – 19 с. – Деп. в ВИНТИ 25.09.06, № 1171-B2006.

3. Московец А.Л., Усатиков С.В., Пиотровский Д.Л. Уравнения состояния для модели тепломассообмена субстрата компостирования при дополнительной подаче воздуха с заданными параметрами. – Краснодар, 2006. – 18 с. – Деп. в ВИНТИ 25.09.06, № 1170-B2006.

4. Московец А.Л., Усатиков С.В. Идентификация и проверка адекватности модели тепломассообмена субстрата компостирования при неоднородной подаче воздуха системой вентиляции. – Краснодар, 2006. – 44 с. – Деп. в ВИНТИ 25.09.06, № 1169-B2006.

5. Московец А.Л., Усатиков С.В. Оптимизация дополнительной подачи воздуха с целью снижения неоднородности скорости процесса компостирования в биореакторе. – Краснодар, 2006. – 22 с. – Деп. в ВИНТИ 04.10.06, № 1200-B2006.

6. Патент РФ №42821, МПК⁷ С 05 F 17/02. Установка для приготовления компоста / Д.Л. Пиотровский, А.Л. Московец, Д.С. Щеголев. – 4 с.: ил.

7. Пиотровский Д.Л., Московец А.Л. Оптимальное управление процессом компостирования в биореакторе // Тезисы докладов Всероссийской

научно-практической конференции “Перспективы развития пищевой промышленности России”. Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2005. с. 296 - 299.

8. Пиотровский Д.Л., Усатиков С.В., Московец А.Л. Экспериментальное исследование тепломассопереноса в биореакторе компостирования // Промышленная автоматика. – 2006. – № 1. – С. 26 – 28.

9. Пиотровский Д.Л., Щеголев Д.С., Московец А.Л. Выбор и обоснование метода управления аппаратами по производству органических компостов // Научная мысль Кавказа. Приложение. - 2004. - № 12. - С. 134 – 136.

10. Пиотровский Д.Л., Московец А.Л. Поддержание объема свободного газового пространства при интенсивном компостировании в биореакторе. – Краснодар, 2004. – 6 с. – Деп. в ВИНТИ 06.12.04, № 1927-В2004.

11. Пиотровский Д.Л., Асмаев М.П., Московец А.Л. Технологии, установки и системы управления для производства органических удобрений // Известия вузов. Пищевая технология. – 2004. - № 5 – 6, С. 97 – 100.

12. Пиотровский Д.Л., Щеголев Д.С., Московец А.Л. Характеристика биогумуса как органического удобрения // Научная мысль Кавказа. Приложение. – 2004. – № 8. – С. 119 – 122.