

УДК 631.872

UDC 631.872

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ
ВЕНТИЛЯЦИИ СУБСТРАТА ПРИ
КОМПОСТИРОВАНИИ**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE
VENTILATION MODELS OF THE SUBSTRATE
WHEN COMPOSTING**

Пиотровский Дмитрий Леонидович
Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой
автоматизации производственных процессов
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
технологический университет», Краснодар, Россия

Piotrovskiy Dmitriy Leonidovich
Dr.Sci.Tech., professor, head of the Department of
automation of production processes
Kuban State Technological University, Krasnodar,
Russia

Посмитная Лариса Александровна
Старший преподаватель кафедры автоматизации
производственных процессов
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
технологический университет», Краснодар, Россия

Posmitnaya Larisa Aleksandrovna
Senior lecturer, Department of automation of production
processes
Kuban State Technological University, Krasnodar,
Russia

Дружинина Ульяна Васильевна
Аспирант
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
технологический университет», Краснодар, Россия

Druzhinina Ulyana Vasilievna
graduate student
Kuban State Technological University, Krasnodar,
Russia

Дружинина Ксения Васильевна
Аспирант
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
технологический университет», Краснодар, Россия

Druzhinina Ksenija Vasilievna
graduate student
Kuban State Technological University, Krasnodar,
Russia

В статье проведен сравнительный анализ традиционной системы подачи воздуха в биореактор при процессе компостирования и разработанной системы с боковой подачей воздуха. Доказано снижение вариации температуры субстрата в результате использования разработанной системы вентиляции на 35%. За время моделирования, равное 1.0 часа, система вентиляции с боковой подачей воздуха обеспечивает уменьшение накопленной степени неоднородности параметров состояния субстрата на 58%. Использование системы вентиляции с боковой подачей воздуха сокращает длительность технологического цикла компостирования на 7%. Статья подготовлена в рамках выполнения научного проекта 16-48-230441 а(р) «Математическое моделирование процессов, протекающих в автоматизированной установке для круглогодичного производства органических удобрений в условиях Краснодарского края», финансируемого РФФИ и администрацией Краснодарского края

In the article we have performed a comparative analysis of a traditional system of air supply to the bioreactor during the composting process and the developed system with lateral air supply. We have proven to reduce temperature variation of the substrate as a result of the use of the ventilation system by 35%. During the simulation, equal to 1.0 hour, a ventilation system with side air flow provides a reduction of the accumulated degree of heterogeneity of status parameters of the substrate by 58%. Use of the ventilation system with side air flow reduces the duration of technological cycle of composting 7%. This article was prepared in the framework of the scientific project 16-48-230441 a(R) "Mathematical modeling of the processes occurring in the automated installation for year-round production of organic fertilizers in the conditions of the Krasnodar region", financed by RFBR and administration of the Krasnodar region

Ключевые слова: КОМПОСТИРОВАНИЕ,
СИСТЕМА ВЕНТИЛЯЦИИ, НАКОПЛЕННАЯ
СТЕПЕНЬ НЕОДНОРОДНОСТИ ПАРАМЕТРОВ
СОСТОЯНИЯ СУБСТРАТА, ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ
Doi: 10.21515/1990-4665-122-071

Keywords: COMPOSTING, VENTILATION SYSTEM,
ACCUMULATED DEGREE OF HETEROGENEITY
OF STATUS PARAMETERS OF THE SUBSTRATE,
TARGET FUNCTION

Полученная ранее модель вентиляции субстрата при

компостировании представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных [1].

Основной задачей системы вентиляции с боковым потоком воздуха является уменьшение нагрева и увлажнения воздуха системы вентиляции при его прохождении вдоль оси биореактора. Для оценки уменьшения неоднородности параметров процесса вдоль оси биореактора при использовании разработанной системы вентиляции необходимо разработать некоторый критерий, который позволит считать сравниваемые системы вентиляции эквивалентными.

Поскольку основной функцией системы вентиляции является охлаждение субстрата, необходимо сравнивать два биореактора с системами вентиляции, эквивалентными по мощности охлаждения субстрата. В этом случае уменьшение неоднородности параметров будет вызвано конструкцией системы вентиляции, что позволит оценить эффект от применения разработанной системы вентиляции.

В качестве такого критерия эквивалентности может быть использован критерий, построенный на основе мощности охлаждения $G_{сум}$ системы вентиляции [3,4].

Для определения мощности охлаждения $G_{сум}$ системы вентиляции, заданной некоторой функцией $G(x)$, рассмотрим модель системы вентиляции с сосредоточенными параметрами. В этой модели примем, что в каждый момент времени t температура субстрата и поток воздуха системы вентиляции одинаковы вдоль оси биореактора, т.е. $T_s(x,t) = const$, $G(x) = const$ для $x \in [0; H]$. Тогда согласно (2.9) для двух систем, поток воздуха в которых задан соответственно функциями $G_1(x)$ и $G_2(x)$, среднеинтегральные значения температуры субстрата в момент времени t будут равны $T_s^{срeд1}(t) = T_s^{срeд2}(t)$ при выполнении условия $G_1(x) = G_2(x) = G_{сум}$.

Поскольку основным отличием системы вентиляции с боковой

подачей воздуха является $G(x) \neq const$, величину $G_{сум}$ для заданной функции $G(x)$ можно определить из выражения:

$$G_{сум} = \frac{1}{H} \int_0^H G(x) dx, \quad (1)$$

среднеинтегральная температура субстрата:

$$T_s^{сред}(t) = \frac{1}{H} \int_0^H T_s(x) dx. \quad (2)$$

Моделирование традиционной системы вентиляции проводилось с использованием полученной модели системы вентиляции биореактора [1].

В качестве начальных условий краевой задачи принимается, что температура и влажность субстрата одинаковы по всему объему. Также принимается, что субстрат и газ находятся в состоянии термодинамического равновесия по всей длине биореактора. Поэтому начальные условия имеют вид:

$$\begin{cases} T_g^0 = 70^\circ C \\ T_s^0 = 70^\circ C \end{cases}, \quad (3)$$

Воздух в основании биореактора имеет неизменные параметры, что задается в виде граничных условий 1 рода:

$$T_g^{gr} = 35^\circ C. \quad (4)$$

Численное моделирование системы, приведенной в [1]. с начальными условиями (3) и граничными условиями (4) проводилось в течение $T_m = 1.0$ часа. Расход воздуха системы вентиляции выбран равным $G(0) = 0.030$ кг сухого воздуха/(м²*с). В результате численного эксперимента получено распределение температур субстрата вдоль оси биореактора в момент времени T_m (рисунок 1).

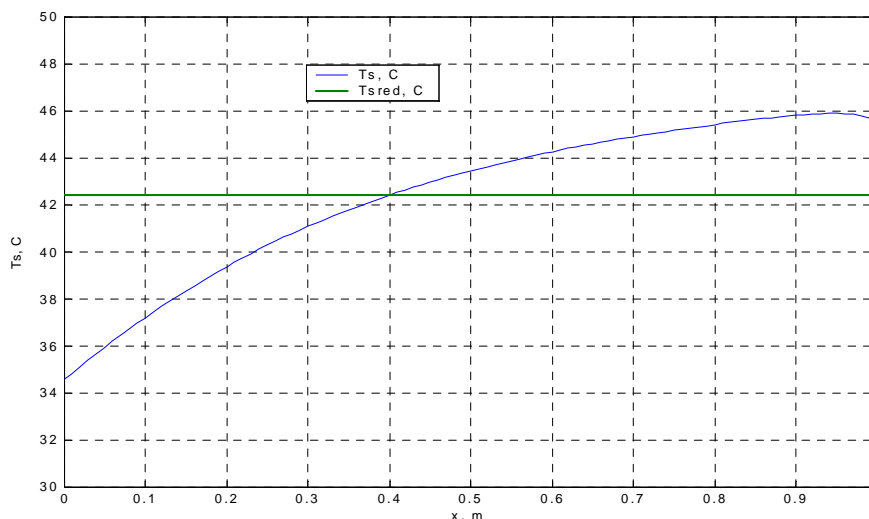


Рисунок 1 – Распределение температур вдоль вертикальной оси биореактора (традиционная система вентиляции, $T_m = 1.0$ ч)

При моделировании системы вентиляции с боковой подачей воздуха использовались те же параметры математической модели. Плотность потока воздуха системы вентиляции была задана постоянной в виде следующего выражения:

$$g(x) = \frac{G_1 - G_2}{H}, \quad G(0) = G_1 \quad (5)$$

где G_1 и G_2 – параметры задания функции $G(x)$.

Учитывая приведенный ранее критерий эквивалентности систем вентиляции (1), для обеспечения $G_{сум} = 0.030$ необходимо принять $G_1 = 0.001$, $G_2 = 0.059$ кг сухого воздуха/($m^2 \cdot c$).

Начальные и граничные условия моделирования принимаются равными соответственно (2), (3).

В результате численного эксперимента получено распределение температур субстрата вдоль оси биореактора в момент времени T_m (рисунок 2).

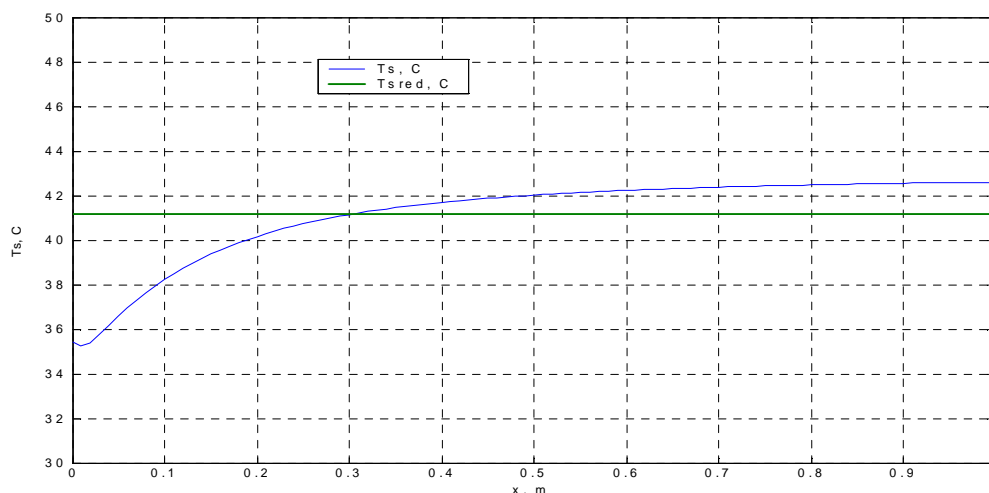


Рисунок 2 – Распределение температур вдоль вертикальной оси биореактора (система вентиляции с боковой подачей воздуха, $T_m = 1.0$ ч)

При использовании системы вентиляции с боковой подачей воздуха большая часть субстрата находится в более однородных условиях (рисунок 2), чем при использовании традиционной системы вентиляции (рисунок 1).

На основе данных численных экспериментов можно также отметить снижение вариации температуры субстрата в результате использования разработанной системы вентиляции на 3.97 °C (35%) .

Целью задачи оптимизации функции расхода воздуха системы вентиляции вдоль оси биореактора является обеспечение одинаковой скорости компостирования по всему объему субстрата. Для сравнения систем вентиляции с различным видом функции $G(x)$ необходимо использовать такой вид критерия, который позволяет оценить накопленную неоднородность скорости реакции вдоль оси биореактора с момента начала процесса:

$$J^*(t) = \int_0^t J(t) dt \xrightarrow{G(x)} \min, \quad (6)$$

где $J(t)$ – степень неоднородности скорости компостирования вдоль оси

биореактора в момент времени t ; в идеальном случае $J(t)=0$; в общем случае $J(t)$ определяется выражением:

$$J(t) = \frac{1}{H} \int_0^H (f(T_s(x), t) - f_{\text{сред}}(t))^2 dx, \quad (7)$$

где $f(T_s(x), t)$ – скорость компостирования в точке x ;

$f_{\text{сред}}$ – среднеинтегральная скорость компостирования вдоль оси

биореактора, $f_{\text{сред}}(t) = \frac{1}{H} \int_0^H f(T_s(x), t) dx$.

Скорость компостирования может быть определена как активность микробиологического метаболизма на основе выражения для температурной зависимости скорости метаболизма, предложенного в [2]:

$$f_T(T_s) = \frac{(T_s - T_{\text{макс}})(T_s - T_{\text{мин}})^2}{(T_{\text{опт}} - T_{\text{мин}}) \cdot [(T_{\text{опт}} - T_{\text{мин}})(T_s - T_{\text{опт}}) - (T_{\text{опт}} - T_{\text{макс}})(T_{\text{опт}} + T_{\text{мин}} - 2T_s)]}, \quad (8)$$

где $T_{\text{мин}} = 25$ °С, $T_{\text{опт}} = 55$ °С, $T_{\text{макс}} = 70$ °С – соответственно минимальная, оптимальная и максимальная температуры для компостирования.

Таким образом, для обеспечения минимальной неоднородности скорости процесса компостирования вдоль оси биореактора за интервал времени необходимо поставить и решить задачу условной оптимизации расхода воздуха системы вентиляции $G(x)$ с целевой функцией (6).

Ограничения условной оптимизации можно представить в виде ограничений на поток воздуха в каждой точке оси x [3,4]. При компостировании с принудительной вентиляцией максимальным физически реализуемым расходом воздуха является $G_{\text{макс}} = 0.060$ кг сухого воздуха/(с*м²). С другой стороны, конструкция системы вентиляции предполагает однонаправленное движение потока воздуха. Поэтому в каждой точке оси биореактора будут справедливы следующие ограничения для функции $G(x)$:

$$\begin{cases} G(x) \geq 0 \\ G(x) \leq G_{\text{макс}} \\ g(x) \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

Для сравнения результатов, полученных при исследовании различных способов задания функции $G(x)$, использовался критерий эквивалентности, построенный на основе мощности охлаждения $G_{\text{сум}}$ системы вентиляции (1). Поэтому вторым условием, накладываемым на поток $G(x)$, является выполнение ограничения в виде равенства:

$$G_{\text{сум}} - \frac{1}{H} \int_0^H G(x) dx = 0. \quad (10)$$

Значение $G_{\text{сум}}$ целесообразно задать меньше максимально допустимого $G_{\text{макс}}$ согласно (9), что обеспечивает возможность поиска оптимальной функции $G(x)$, отличной от $G(x) = G_{\text{макс}}$. Принимаем $G_{\text{сум}}$, равное середине допустимого согласно условий (9) диапазона для потока, $G_{\text{сум}} = \frac{G_{\text{макс}}}{2}$

Исходя из конструктивной реализации системы вентиляции, примем $G(x)$ в виде гладкой функции, т.е. первая производная не имеет разрывов в области определения. Функцию $G(x)$ зададим параметрически в виде полинома второго порядка:

$$G(x) = \frac{A}{H^2} x^2 + \frac{B}{H} x + C, \quad (11)$$

где A, B, C – параметры функции.

Тогда

$$G_{\text{сум}} = \frac{1}{H} \int_0^H G(x) dx = \frac{1}{H} \int_0^H \left(\frac{A}{H^2} x^2 + \frac{B}{H} x + C \right) dx = \frac{A}{3} + \frac{B}{2} + C, \quad (12)$$

$$g(x) = 2 \frac{A}{H^2} x + \frac{B}{H}. \quad (13)$$

Выразим ограничение (10) через параметры B и C , принимая их независимыми переменными:

$$A = 3 \cdot \left(G_{\text{сум}} - \frac{B}{2} - C \right). \quad (14)$$

Определим область допустимых значений независимых переменных В и С. Поскольку $G(0) = C$, а также учитывая (9), для $0 \leq x \leq H$ получаем:

$$\begin{cases} 0 \leq C \leq G_{\text{макс}} \\ \min_{0 \leq x \leq H} (G(x)) \geq 0 \\ \max_{0 \leq x \leq H} (G(x)) \leq G_{\text{макс}} \\ \min_{0 \leq x \leq H} (g(x)) \geq 0 \end{cases}. \quad (15)$$

Рассмотрим значения параметров, обеспечивающих выполнение $\min_{0 \leq x \leq H} (g(x)) \geq 0$:

$$\frac{dG}{dx} = 2 \frac{A}{H^2} x + \frac{B}{H} = \frac{6}{H^2} \left(G_{\text{сум}} - \frac{B}{2} - C \right) x + \frac{B}{H}, \quad (16)$$

Выражение (16) монотонно изменяется вдоль оси x, возрастая или убывая в зависимости от знака выражения $\left(G_{\text{сум}} - \frac{B}{2} - C \right)$. Поэтому для любых заданных значений параметров В, С:

$$\min_{0 \leq x \leq H} (g(x)) = \begin{cases} g(0), \left(G_{\text{сум}} - \frac{B}{2} - C \right) \geq 0 \\ g(H), \left(G_{\text{сум}} - \frac{B}{2} - C \right) \leq 0 \end{cases}, \quad (17)$$

$$\begin{cases} \left[\begin{array}{l} B \leq 2(G_{\text{сум}} - C) \\ 0 \leq C \leq G_{\text{сум}} \\ B \geq 0 \end{array} \right] \\ \left[\begin{array}{l} B \geq 2(G_{\text{сум}} - C) \\ 0 \leq C \leq G_{\text{сум}} \\ B \leq 3(G_{\text{сум}} - C) \end{array} \right] \end{cases}, \quad (18)$$

откуда $\min_{0 \leq x \leq H} (g(x)) \geq 0$ выполняется для любых значений $0 \leq x \leq H$ при параметрах В, С, удовлетворяющих ограничениям:

$$\begin{cases} B \geq 0 \\ B \leq 3(G_{\text{сум}} - C) \\ C \geq 0 \\ C \leq G_{\text{сум}} \end{cases} \quad (19)$$

При значениях параметров В, С, соответствующих ограничениям (19), обеспечивается $g(x) \geq 0$ и функция $G(x)$ монотонно возрастает. Отсюда $\min_{0 \leq x \leq H} (G(x)) = G(0)$, $\max_{0 \leq x \leq H} (G(x)) = G(H)$.

При значениях параметра С, соответствующих ограничениям (15), условие $\min_{0 \leq x \leq H} (G(x)) \geq 0$ выполняется автоматически, поскольку $0 \leq C \leq G_{\text{сум}}$.

Рассмотрим выполнение условия $\max_{0 \leq x \leq H} (G(x)) \leq G_{\text{макс}}$:

$$\begin{aligned} \max_{0 \leq x \leq H} (G(x)) = G(H) = A + B + C \leq G_{\text{макс}}, \\ B \geq 2(3G_{\text{сум}} - G_{\text{макс}} - 2C). \end{aligned} \quad (20)$$

Из выражений (19), (20) получаем область определения параметров В, С:

$$\begin{cases} B \geq 0 \\ B \leq 3(G_{\text{сум}} - C) \\ B \geq 2(3G_{\text{сум}} - G_{\text{макс}} - 2C) \\ C \geq 0 \\ C \leq G_{\text{сум}} \end{cases} \quad (21)$$

Графически область, соответствующая ограничениям (21), представлена на рисунке 3.

Таким образом, получаем задачу условной оптимизации функции $G(x)$, заданной в виде (11) с начальными условиями (3), граничными условиями (4), целевой функцией (6) над двумерной плоскостью параметров В и С с ограничениями вида равенства (10) и неравенств (9), (21).

Численные эксперименты проводились со следующими значениями параметров:

– критерий эквивалентности, $G_{\text{сум}} = 0.030$ кг воздуха/(м²*с);

- начальная температура субстрата соответствует температуре санитаризации для процесса компостирования (70 °С);
- время моделирования, $T_m = 1.0$ ч.

Для предварительного исследования вида поверхности, образуемой целевой функцией над пространством параметров В, С, целевая функция была табулирована. Для этого интервал $0 \leq C \leq G_{\text{сум}}$ был разбит на 10 равных отрезков. Для каждого значения С были определены границы изменения параметра В в соответствии с ограничениями (11). Полученный отрезок также разбит на 10 равных частей. Для каждой полученной пары параметров В, С был проведен численный эксперимент и рассчитано значение целевой функции $J^*(t)$ (рисунок 4). Из рисунка видно, что поверхность имеет четко выраженный минимум, расположенный на линии $B = 2(3G_{\text{сум}} - G_{\text{макс}} - 2C)$ в допустимой области значений параметров В, С.

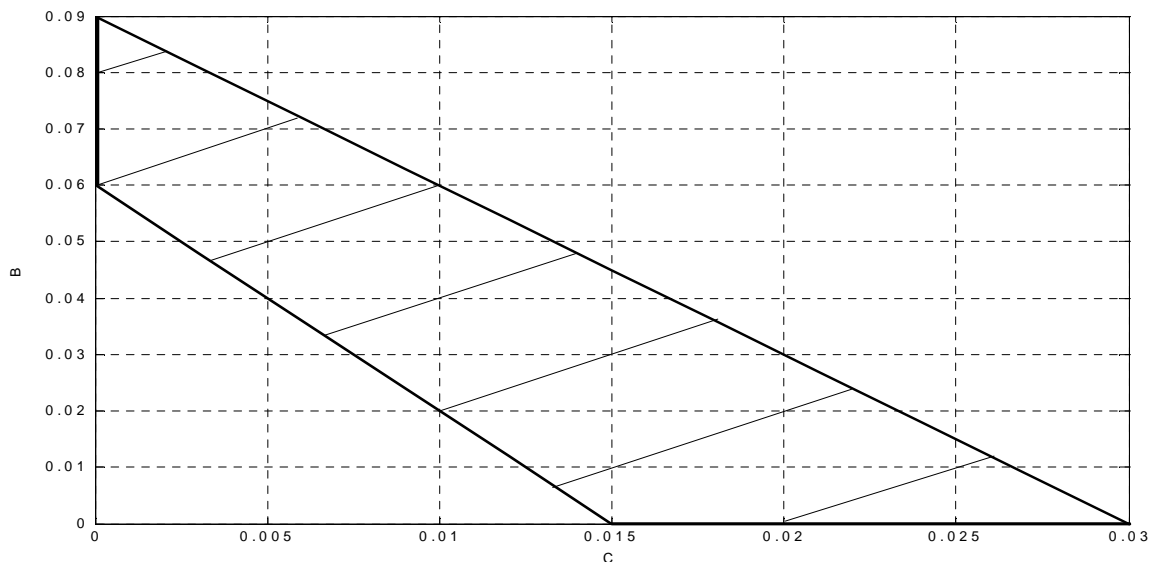


Рисунок 3 – Графическое представление области определения параметров В, С

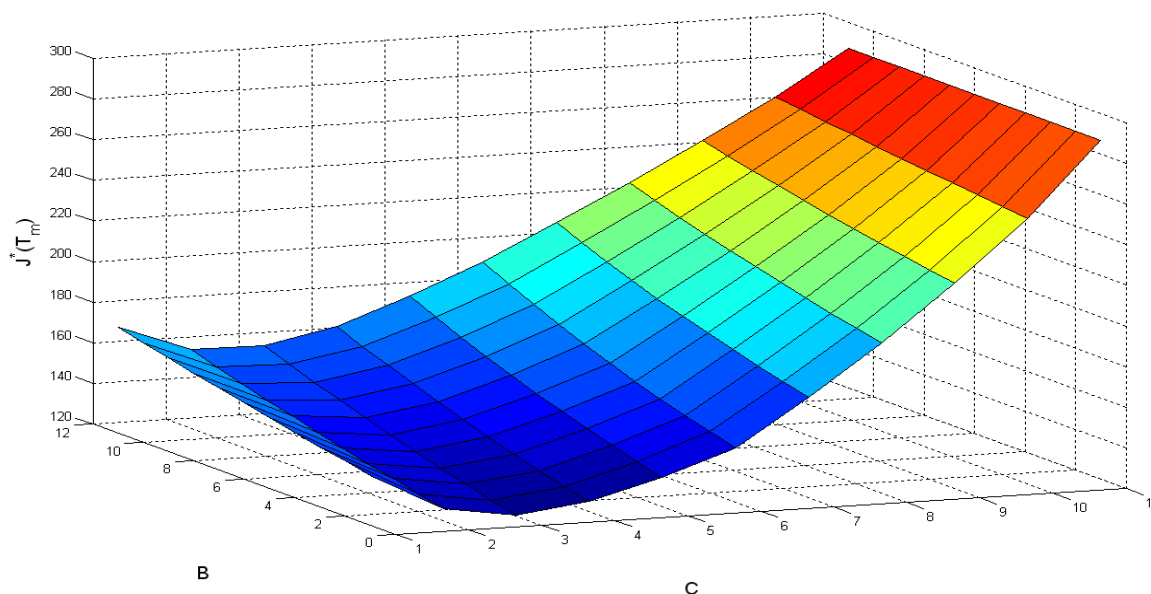


Рисунок 4 – Целевая функция $J^*(t)$ над областью определения параметров В и С

Это позволило свести задачу оптимизации к одномерной и решить методом золотого сечения. Получены следующие значения параметров А, В, С, обеспечивающие минимум целевой функции: $A = 0.017598$, $B = 0.036538$, $C = 0.0058656$, $G(x) = 0.017598x^2 + 0.036538x + 0.0058656$, $g(x) = 0.003911x + 0.012179$

Полученная функция оптимального расхода воздуха близка к прямой, поэтому нет смысла исследовать полиномиальное задание функции со степенью более второй. Анализ изменения температуры субстрата и скорости компостирования во времени показывает практически полное совпадение для сравниваемых систем. Это подтверждает применимость использованного критерия эквивалентности по охлаждающей способности систем вентиляции.

Исследование изменения $J^*(t)$ для сравниваемых систем показывает, что за время моделирования, равное 1.0 часа, система вентиляции с боковой подачей воздуха обеспечивает уменьшение

накопленной степени неоднородности параметров состояния субстрата на 58%

Дополнительно проведенное моделирование показало, что оптимальная система вентиляции обеспечивает значительное уменьшение целевой функции и в период времени, сопоставимый с длительностью процесса компостирования. Проведенные в рамках выполнения научного проекта 16-48-230441 а(р) «Математическое моделирование процессов, протекающих в автоматизированной установке для круглогодичного производства органических удобрений в условиях Краснодарского края», финансируемого РФФИ и администрацией Краснодарского края испытания показали, что использование системы вентиляции с боковой подачей воздуха сокращает длительность технологического цикла компостирования на 7 %.

Литература

1. Пиотровский Д.Л. Математическая модель системы вентиляции с переменным расходом воздуха вдоль вертикальной оси реактора в процессе компостирования / Д.Л. Пиотровский, Л.А. Посмитная, К.В.Дружинина, Дружинина У.В.// Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – №121(07).
2. Пиотровский Д.Л. Теоретические основы построения автоматических систем управления процессами производства органических компостов: диссертация ... доктора технических наук: 05.13.06 . - Краснодар, 2007
3. Пиотровский Д.Л. Выбор оптимальной стратегии управления процессом компостирования /Д.Л.Пиотровский, Ал Асми Ахмад, А.О. Ложкин, Н.О. Ложкин// Научная мысль Кавказа, 2005 - № 13. С. 141.
4. Пиотровский Д.Л. Поддержание объема свободного газового пространства при интенсивном компостировании в биореакторе/ Д.Л.Пиотровский, А.Л.Московец //депонированная рукопись № 1927-В2004. - 06.12.2004

References

1. Piotrovskij D.L. Matematicheskaja model' sistemy ventiljacii s peremennym rashodom vozduha vdol' vertikal'noj osi reaktora v processe kompostirovanija / D.L. Piotrovskij, L.A. Posmitnaja, K.V.Druzhinina, Druzhinina U.V.// Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2016. – №121(07).

2. Piotrovskij D.L. Teoreticheskie osnovy postroenija avtomaticheskikh sistem upravlenija processami proizvodstva organicheskikh kompostov: dissertacija ... doktora tehniceskikh nauk: 05.13.06 . - Krasnodar, 2007

3. Piotrovskij D.L. Vybor optimal'noj strategii upravlenija processom kompostirovanija /D.L.Piotrovskij, Al Asmi Ahmad, A.O. Lozhkin, N.O. Lozhkin// Nauchnaja mysl' Kavkaza, 2005 - № 13. S. 141.

4. Piotrovskij D.L. Podderzhanie ob#ema svobodnogo gazovogo prostranstva pri intensivnom kompostirovanii v bioreaktore/ D.L.Piotrovskij, A.L.Moskovec //deponirovannaja rukopis' № 1927-B2004. - 06.12.2004