

УДК 631.338.92:631.861

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОМПОСТИРУЕМОГО МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССЕ
БИОФЕРМЕНТАЦИИ**

Михаил Сергеевич Колдин

кандидат технических наук, доцент

koldinms@yandex.ru

Иван Павлович Криволапов

кандидат технических наук, доцент

ivan0068@bk.ru

Мичуринский государственный аграрный университет

г. Мичуринск, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты теоретических исследований процессов компостирования отходов животноводства с определением теплопроводности компостируемого материала при поточном способе производства и с учётом конструктивных особенностей установок модульного типа. Исследования позволяют определить значения параметров удельного тепловыделения смеси и коэффициента теплообмена термоизоляционного слоя. Проведен анализ факторов влияющих на процесс саморазогрева компостируемой смеси. По результатам исследований будут проверены и уточнены оптимальные конструктивные параметры элементов установок ускоренного компостирования.

Ключевые слова: органические удобрения, соломопавозная смесь, стадии компостирования, биоферментация, установка, удельное тепловыделение, теплоизоляционный слой.

На сегодняшний день на территории Российской Федерации разной степени очистки и переработки необходимо подвергнуть более 440 млн. тонн навоза и стоков в год. Применение только минеральных удобрений для повышения плодородия позволяет лишь в ограниченной степени компенсировать вынос азота, фосфора, калия и других макро- и микроэлементов из почвы, особенно на стадии роста растений, вместе с тем, переработка термофильными бактериями только трети указанного объема отходов позволит дополнительно дать сельскому хозяйству страны свыше 5 млн. тонн азота, фосфора и калия, которых так не хватает пахотным землям. Недостаток органических компонентов приводит к замедлению процессов формирования благоприятных физических свойств среды, ее водного, воздушного и теплового режимов; активизации микробиологической деятельности. Поэтому для улучшения обменных процессов активных веществ и устранения дефицита гумуса в почве существует необходимость применения органических удобрений в виде компостов [1].

Компосты могут быть получены в результате разложения различных органических веществ под влиянием деятельности микроорганизмов с соблюдением технологических, режимных параметров и условий переработки [2], которые включают в себя следующие стадии (рисунок 1):

- смешивание исходного сырья (навоз) и компонентов (влагопоглощающий материал) в необходимых пропорциях;
- предварительное выдерживание смеси в буртах на открытых площадках;
- выдерживание смеси в установках модульного типа [3] с обеспечением процесса биоферментации (активная аэрация) перерабатываемого материала в теплоизолированных условиях;
- созревание компоста в буртах под навесом или открытых площадках с однократным рыхлением.

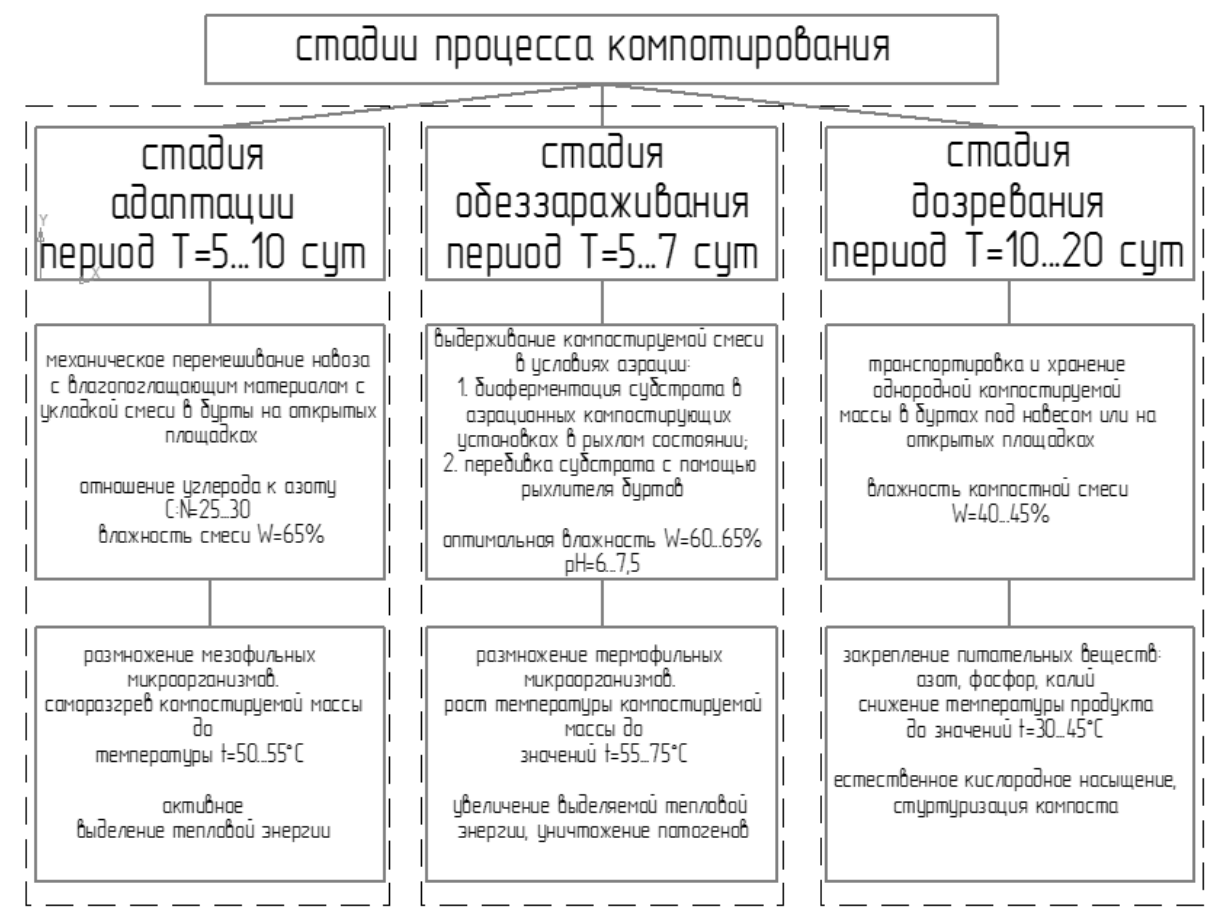


Рисунок 1 – Стадии протекания процесса компостирования поточным способом

При компостировании в органической массе повышается содержание доступных растениям элементов питания, обезвреживается патогенная микрофлора, уменьшается количество пектиновых веществ, удобрение становится сыпучим, что облегчает его внесение в почву. Для достижения экономического и экологического соответствия применяемых технических средств и технологий необходимо учитывать характерные особенности процессов компостирования, которые могут рассматриваться как процессы биологического окисления органического вещества с повышенными значениями температуры и влажности; так и физико-механические процессы с изменением значений плотности и пористости перерабатываемого материала.

Наиболее перспективным способом приготовления компостов с заданными свойствами является высокотемпературная аэробная биоферментация отходов животноводства в вертикальных компостирующих установках (ВКУ) [3, 4].

Процесс биоферментации компостируемой смеси влажностью 60...65% в данных установках осуществляется путем ее аэрации в теплоизолированных условиях (температура разогрева массы составляет 55...70°). Данные установки позволяют значительно сократить сроки переработки до 7-10 суток, получить готовый продукт высокого агрохимического качества, обеспечить поточность и непрерывность производства.

Наряду с этим, теплофизические свойства компостируемых смесей являются определяющими факторами в выборе технологических приемов и технических средств при производстве органических удобрений. Даже простое перечисление всех видов процессов тепло- и массопереноса при компостировании соломопашной смеси делает очевидным тот факт, что эффективная теплопроводность такой системы является сложнейшей функцией многих параметров: температуры, давления газа, химического состава материала и газа, пористости, размеров частиц и пор, степени черноты и температуры граничных поверхностей, коэффициента аккомодации поверхности частиц по отношению к газу наполнителю и других факторов [5].

Одним из основных допущений, общепринятых при рассмотрении процессов переноса теплоты и массы в дисперсионных средах при определенных условиях, является предположение о совокупности различных механизмов переноса теплоты в таких средах и в связи с этим о возможности пренебрежения тем или иным видом переноса теплоты в определенных условиях. В общем случае анализ многочисленных экспериментальных данных и теоретических исследований позволяет выявить следующие качественные закономерности переноса теплоты в капиллярно-пористых телах и дисперсных средах [6-8]:

1. Теплопроводность материала частиц капиллярно-пористых тел не оказывает решающего влияния на эффективную теплопроводность.

2. Эффективная теплопроводность капиллярно-пористых тел зависит от влажности смеси.

3. Значительное влияние на эффективную теплопроводность материала оказывает теплопроводность газового микрозазора между частицами

дисперсионного материала.

Согласно проведенным исследованиям [5], задав краевые условия и текущие значения координат смеси x ; y ; z , параметров времени τ , влажности W при решении ряда уравнений, изменение теплопроводности определяется функцией:

$$t = f(x; y; z; W; \tau; P_V; v_B),$$

где P_V – пористость смеси; v_B - средняя скорость воздуха, проходящего через смесь.

Определить данную функцию в явной форме аналитическим путем не представляется возможным. Поэтому, приняв во внимание, что в процессе компостирования соломонавозных смесей критической фазой является период разогрева до температуры обеззараживания (55°C), необходимо рассмотреть данный процесс на основе уравнения теплового баланса.

Выделившаяся в процессе компостирования теплота $Q_{об}$ за период τ будет расходоваться непосредственно на нагрев соломонавозной смеси Q_a от температуры $T_{см1}$ до температуры $T_{см2}$, теплообмен с окружающей средой $Q_{мен}$, на нагрев проходящего через смесь воздуха $Q_{воз}$, а также на испарение влаги $Q_{исп}$. Баланс разогрева будет положительным (процесс саморазогрева) в том случае, если выделение теплоты при разложении органического вещества будет превышать ее потери во внешнюю среду. Математически это запишется в виде следующего выражения, которое будет являться уравнением теплового баланса компостируемой соломонавозной смеси:

$$Q_{об} = Q_a + Q_{теп} + Q_{воз} + Q_{исп}, \quad (1)$$

где $Q_{об}$ – общее тепловыделение соломонавозной смеси, Дж/с; Q_a – активное тепловыделение в соломонавозной смеси, Дж/с; $Q_{мен}$ – потери теплоты на теплообмен с окружающей средой, Дж/с; $Q_{воз}$ – потери теплоты на нагрев воздуха, нагнетаемого в компостируемую смесь, Дж/с; $Q_{исп}$ – потери теплоты на парообразование, Дж/с.

Активное тепловыделение в соломонавозной смеси определяется по выражению:

$$Q_a = m_{см} \cdot c_{см} \cdot (T_{см2} - T_{см1}), \quad (2)$$

где $m_{см}$ – масса компостируемой соломоавозной смеси, кг; $c_{см}$ – удельная теплоемкость соломоавозной смеси, Дж/(кг·°C); $T_{см2}$ – конечная температура соломоавозной смеси, °C; $T_{см1}$ – начальная температура соломоавозной смеси, °C.

Общее количество теплоты, выделенное в процессе компостирования соломоавозной смеси, определяется из выражения:

$$Q_{об} = m_{см} \cdot q_{см} \cdot \tau, \quad (3)$$

где $q_{см}$ – удельное тепловыделение соломоавозной смеси, Дж/(кг·с); τ – период компостирования, с.

Потери теплоты на теплообмен с окружающей средой составят:

$$Q_{теп} = l \cdot (T_{вн} - T_{н}), \quad (4)$$

где l – коэффициент теплообмена термоизоляционного слоя, Вт/(м²·ч); $T_{вн}$ и $T_{н}$ – температура внутренней и наружной поверхности термоизоляционного слоя соответственно, °C.

Количество теплоты, которое израсходовано на нагрев поступающего в компостируемую соломоавозную смесь воздуха, определится по выражению:

$$Q_{воз} = c_{воз} \cdot m_{воз} \cdot (T_{воз2} - T_{воз1}), \quad (5)$$

где $c_{воз}$ – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°C); $m_{воз}$ – количество воздуха, прошедшего через соломоавозную смесь за время компостирования, кг; $T_{воз2}$ – конечная температура воздуха, °C; $T_{воз1}$ – начальная температура воздуха, °C.

Количество теплоты, поглощенное при испарении воды, определится из выражения:

$$Q_{исп} = m_{см} \cdot k_w \cdot r_u, \quad (6)$$

где k_w – отношение количества испарившейся воды к массе смеси, кг/кг; r_u – удельная теплота парообразования, Дж/кг.

Подставив в уравнение теплового баланса (1) выражения (2), (3), (4), (5) и (6), получим:

$$m_{см} \cdot q_{см} \cdot \tau = m_{см} \cdot c_{см} \cdot (T_{см2} - T_{см1}) + l \cdot (T_{вн} - T_{н}) + c_{воз} \cdot m_{воз} \cdot (T_{воз2} - T_{воз1}) + m_{см} \cdot k_w \cdot r_u \quad (7)$$

Если принять следующие допущения $T_{см2}=T_{гн}=T_{воз2}$ и $T_{см1}=T_{гн}=T_{воз1}$, то выражение (7) запишется как:

$$m_{см} \cdot q_{см} \cdot \tau = m_{см} \cdot c_{см} \cdot (T_{см2} - T_{см1}) + l \cdot (T_{см2} - T_{см1}) + c_{воз} \cdot m_{воз} \cdot (T_{см2} - T_{см1}) + m_{см} \cdot k_w \cdot r_u \quad (8)$$

После математических преобразований уравнение теплового баланса примет вид:

$$T_{см2} = T_{см1} + \frac{m_{см} \cdot q_{см} \cdot \tau - m_{см} \cdot k_w \cdot r_u}{m_{см} \cdot c_{см} + l + m_{воз} \cdot c_{воз}} \quad (9)$$

Из выражения (8) можно также найти значения параметров удельного тепловыделения $q_{см}$ и коэффициента теплообмена термоизоляционного слоя l , при которых будет происходить процесс саморазогрева соломоавозной смеси:

$$q_{см} > \frac{(T_{см2} - T_{см1}) \cdot (m_{см} \cdot c_{см} + l + m_{воз} \cdot c_{воз}) + m_{см} \cdot k_w \cdot r_u}{m_{см} \cdot \tau} \quad (10)$$

$$l \ll \frac{m_{см} \cdot q_{см} \cdot \tau - m_{воз} \cdot k_w \cdot r_u}{T_{см2} - T_{см1}} - m_{см} \cdot c_{см} - m_{воз} \cdot c_{воз} \quad (11)$$

В выражения (9), (10) и (11) входят теплофизические характеристики соломоавозных смесей (удельная теплоемкость и удельное тепловыделение), которые необходимо определить опытным путем.

Список литературы:

1. Колдин М.С., Алёхин А.В. Исследование параметров процесса биоферментации соломоавозных смесей в компостирующих установках // Сборник научных трудов: Инновационные подходы к разработке технологий производства, хранения и переработки продукции растениеводческого кластера. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Мичуринск, 2020. С. 164-169.
2. Завражнов А.И., Колдин М.С., Миронов В.В. Обоснование поточной технологии ускоренного компостирования отходов на фермах КРС //

Вестник МичГАУ. №1. Мичуринск: Изд-во Мичуринского госагроуниверситета, 2006., с. 162-170.

3. Биореактор для переработки подстилочного навоза, помета в органическое удобрение и биогаз / В.Д. Хмыров, Д.В. Гурьянов, В.С. Калинин, А.И. Иосифов // Стратегии и тренды развития науки в современных условиях. 2020. № 1 (6). С. 77-79.

4. Установка для компостирования / *Завражнов А.И., Капустин В.П., Миронов В.В., Колдин М.С., Никитин П.С.* // Патент на полезную модель РФ № 71116. Приоритет от 06.07.2007.

5. Хмыров В.Д., Гурьянов Д.В., Куденко В.Б. Уборка и переработка помета в органическое удобрение // Наука и Образование. 2021. Т. 4. № 3.

6. Колдин М.С. Пути совершенствования технологий компостирования органических отходов ферм КРС. / Научные труды ГНУ ВНИИМЖ Россельхозакадемии. 2011. Т. 22. № 3 (3). С. 239-245.

7. Колдин М.С. Исследование теплофизических свойств соломонавозных смесей при компостировании / Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2012. № 4 (8). С. 48-52.

8. Хмыров В.Д., Гурьянов Д.В., Куденко В.Б. Технология переработки помета в органическое удобрение // Аграрный научный журнал. 2021. № 12. С. 127-129.

UDC 631.338.92:631.861

**DETERMINATION OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS
OF COMPOSTED MATERIAL IN THE PROCESS OF BIOFERMENTATION**

Mikhail S. Koldin

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
koldinms@yandex.ru

Ivan P. Krivolapov

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
ivan0068@bk.ru

Michurinsk State Agrarian University
Michurinsk, Russia

Annotation. The article presents the results of theoretical studies of the processes of composting animal waste with the determination of the thermal conductivity of the composted material in a flow production method and taking into account the design features of modular installations. The studies allow to determine the values of the parameters of the specific heat release of the mixture and the heat transfer coefficient of the thermal insulation layer. The analysis of the factors influencing the process of self-heating of the composted mixture was carried out. According to the results of the research, the optimal design parameters of the elements of accelerated composting plants will be checked and refined.

Key words: organic fertilizers, straw manure mixture, composting stages, biofermentation, installation, specific heat release, heat-insulating layer.

Статья поступила в редакцию 15.02.2022; одобрена после рецензирования 10.03.2022; принята к публикации 25.03.2022.

The article was submitted 15.02.2021; approved after reviewing 10.03.2022; accepted for publication 25.03.2022.