

DOI: 10.12737/article_5940f019aa52b7.22230196

Вендин С.В., д-р техн. наук, проф.,
Мамонтов А.Ю., аспирант

Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫ
ДЛЯ ПОДОГРЕВА БИОМАССЫ В БИОГАЗОВОМ РЕАКТОРЕ

elapk@mail.ru

Рассмотрены вопросы расчета мощности дополнительных источников теплоты для подогрева биомассы в биогазовом реакторе. На основе уравнения теплопроводности Фурье получено решение для осесимметричной цилиндрической задачи при граничных условиях первого рода и проведен расчет мощности дополнительных источников теплоты в цилиндрическом биогазовом реакторе.

Ключевые слова: биомасса, биогаз, реактор, уравнение теплопроводности Фурье, источники теплоты, температурное поле, граничные условия первого рода.

Эффективная переработка органических отходов в биогаз является актуальной научно-технической задачей [1–4]. Традиционная конструкция биогазового реактора представляет собой цельную емкость, в которой процесс сбраживания происходит в едином перемешивающем режиме при соблюдении определенных температурно-влажностных режимов в зависимости от типа брожения. Оптимизации процесса переработки органических отходов для получения биогаза выделяют три температурных режима: 1) психрофильный – до 20–25 °С; 2) мезофильный – 25–40 °С; 3) термофильный – выше 40 °С.

Психрофильный режим не требует дополнительного подогрева и проходит без дополнительного контроля за температурой, используется в соответствующих климатических зонах, с показателями среднегодовой температуры, составляющими не менее 18–20 °С. Мезофильный и термофильный процессы требуют наличия внешнего источника тепла и строгого контроля за температурой. При этом чем выше температура, тем быстрее и с большей производительностью идет образование биогаза. Поэтому на практике в основном востребован мезофильный режим бактериологического производства биогаза, так как при обеспечении максимально возможной доли метана, в результате на выходе имеется еще и удобрение с высоким содержанием общего азота. Требования к допустимым пределам колебания температуры для оптимального газообразования тем жестче, чем выше температура процесса сбраживания: при психрофильном температурном режиме – ±2 °С в час; мезофильном – ±1 °С в час; термофильном – ±0,5 °С в час [2].

Поэтому для обеспечения температурного режима и управляемости процессом сбраживания биомассы весьма важно выбрать мощность дополнительных источников теплоты.

Расчет мощности дополнительных источников теплоты может быть проведен на основе решения уравнения теплопроводности Фурье [5–10].

В первом приближении физическая расчетная модель биогазового реактора может быть представлена цилиндром радиуса R и высотой H , а для расчета температуры можно предположить осесимметричное распределение температурного поля, когда температура внутри реактора зависит только от координаты R , т.е. рассматривать одномерную задачу.

Распределение температурного поля определяется общим уравнением теплопроводности Фурье

$$\frac{\partial T(\tau, r)}{\partial \tau} = a \nabla T(\tau, r) + \frac{q(r)}{\rho c}, \quad (1)$$

где a, ρ, c – соответственно температуропроводность, плотность, теплоемкость материала; $q(r)$ – мощность внутренних источников теплоты; $\nabla T(\tau, r)$ – оператор Лапласа, в случае осесимметричного распределения температурного поля

$$\nabla T(r) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T(r)}{\partial r} \right). \quad (2)$$

Для установившегося режима (стационарного случая) уравнение (1) приобретает вид

$$\nabla T(r) = -\frac{q(r)}{\lambda}, \quad (3)$$

где λ – теплопроводность материала.

Будем полагать также, что объект является изотропным, т.е. теплофизические параметры постоянны и однородны по всему занимаемому им объему.

Граничные условия на внутренней поверхности $r = R$ определим как граничные условия первого рода

$$|T(r)|_{r=R} = T_0. \quad (4)$$

Решением уравнения (3) является функция [8]

$$T(r) = g(r) + AP(r) + B, \quad (5)$$

где A, B – постоянные коэффициенты определяемые граничными условиями,

$$P(r) = \ln r, \quad (6)$$

$$g(r) = -\int \frac{\partial r}{r} \int r \frac{q(r)}{\lambda} dr. \quad (7)$$

Для независимых от пространственной координаты r источников теплоты (равномерно распределенных по объему) $q(r) = q$, а функция определяемая интегралом (7) имеет вид

$$g(r) = -\frac{q}{4\lambda} r^2. \quad (8)$$

С учетом ограниченности решения при $r = 0$ следует полагать $A = 0$. Тогда для температурного поля (5) с учетом (8) получим

$$T(r) = -\frac{q}{4\lambda} r^2 + B. \quad (9)$$

Значение коэффициента B определяется из условия (4)

$$B = \frac{q}{4\lambda} R^2 + T_0. \quad (10)$$

Из выражений (9) и (10) получаем распределение температурного поля в объекте

$$T(r) = \frac{q}{4\lambda} (R^2 - r^2) + T_0. \quad (11)$$

В рекомендациях по температурным режимам сбраживания биомассы обычно указывают рекомендуемую температуру или диапазон температур, например для мезофильного температурного режима - 34 - 37°C. В этом случае диапазон температур в первом приближении можно принимать в качестве значений температурного поля у стенок реактора $T(R)$ и в центре реактора $T(0)$.

Тогда для поддержания диапазона температур $\Delta T = T(0) - T(R)$ из выражения (11) получим

$$\Delta T = T(0) - T(R) = T(0) - T_0 = \frac{q}{4\lambda} R^2. \quad (12)$$

Мощность дополнительных (внутренних) источников теплоты определяется выражением

$$q = 4\lambda\Delta T/R^2. \quad (13)$$

С учетом предположений, что мощность источников P распределена по всему объему реактора V , то для q получим

$$q = P/V = 4\lambda\Delta T/R^2 \quad (14)$$

Объема цилиндрического реактора равен

$$V = \pi R^2 H, \quad (15)$$

где H – высота реактора.

Окончательно с учетом (14) и (15) получаем выражение для расчета тепловой мощности источников P

$$P = 4\pi\lambda H\Delta T. \quad (16)$$

Из выражения (16) следует, что мощность равномерно распределенных дополнительных источников теплоты, необходимая для поддержания разницы температур ΔT между стенкой и центром реактора зависит от высоты реактора H и теплопроводности биомассы λ и не зависит от его радиуса R .

На рис. 1 представлены расчетные значения мощности источника теплоты в зависимости от высоты реактора H при различных значениях ΔT для биомассы с теплопроводностью $\lambda = 0,6$ Вт/(мК).

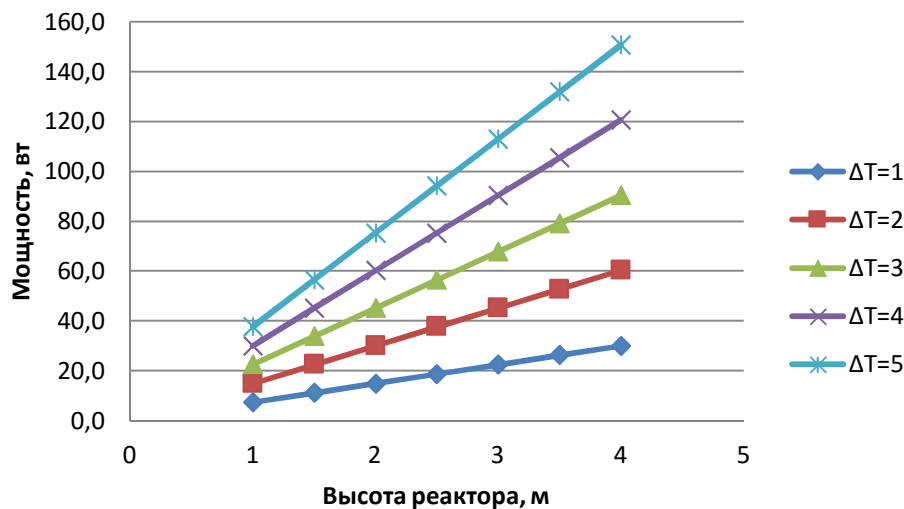


Рис. 1. Расчетные значения мощности источника теплоты в зависимости от высоты реактора

В заключение отметим, что полученное выражение (16) позволяет оценить тепловую мощность равномерно распределенных по объему дополнительных источников теплоты для подогрева биомассы в биогазовом реакторе цилиндрической формы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трахунова И.А., Халитова Г.Р., Караева Ю.В. Эффективность процесса анаэробного сбраживания при различных режимах гидравлического перемешивания // Альтернативная энергетика и экология. 2011. № 10. С. 90–94.
2. Садчиков А.В., Кокарев Н.Ф. Оптимизация теплового режима в биогазовых установках // Фундаментальные исследования. 2016. № 2-1. С. 90–93.
3. Вендин С.В., Мамонтов А.Ю. Обоснование параметров терморегуляции и перемешивания при анаэробном сбраживании // Сельский механизатор. 2016. №7. С. 20–22.
4. Вендин С.В., Мамонтов А.Ю. Автоматизация механических и тепловых процессов в многокамерном биогазовом реакторе непрерывной загрузки сырья // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. 2016. №4 (74). С. 55–60.
5. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел: Учеб. Пособие. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2001. 550 с
6. Вендин С.В. К расчету нестационарной теплопроводности в многослойных объектах при граничных условиях третьего рода // ИФЖ. 1993. Т.65. №1. С. 98–100.
7. Вендин С.В., Щербинин И.А. К решению задач нестационарной теплопроводности в слоистых средах // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №3. С. 96–99.
8. Вендин С.В. Теория и математические методы анализа тепловых процессов при СВЧ обработке семян. Москва; Белгород: ОАО «Центральный коллектор библиотек «БИБКОМ», 2016. 143 с.
9. Vendin S.V. Calculation of nonstationary heat conduction in multilayer objects with boundary conditions of the third kind/ Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 1993. Т. 65. № 2. С. 823.
10. Vendin S.V. On the Solution of Problems of Transient Heat Conduction in Layered Media // INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL & SCIENCE EDUCATION. 2016. Vol. 11, № 18. 12253–12258.

Vendin S.V., Mamontov A.Y.

CALCULATION OF CAPACITY OF ADDITIONAL SOURCES OF HEAT FOR HEAT BIOMASS IN BIOGAS REACTOR

The issues of calculating the capacity of additional heat sources for heating biomass in a biogas reactor are considered. Based on the Fourier heat equation, a solution is obtained for an axisymmetric cylindrical problem with boundary conditions of the first kind and a calculation is made of the power of additional heat sources in a cylindrical biogas reactor.

Key words: *biomass, biogas, reactor, Fourier heat equation, heat sources, temperature field, boundary conditions of the first kind.*

Вендин Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор.

Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина, кафедра электрооборудования и электротехнологий в АПК.

Адрес: Россия, 308503, пос. Майский Белгородского района Белгородской области, ул. Вавилова, д.1.

E-mail: elapk@mail.ru

Мамонтов Артем Юрьевич, аспирант.

Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина, кафедра электрооборудования и электротехнологий в АПК.

Адрес: Россия, 308503, пос. Майский Белгородского района Белгородской области, ул. Вавилова, д.1.

E-mail: ligaman999@mail.ru