

УДК 536.7

**ПРИМЕНЕНИЕ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
ФУРЬЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ МОЩНОСТИ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫ ПРИ
ПОДОГРЕВЕ СЫРЬЯ В БИОГАЗОВЫХ РЕАКТОРАХ**

Сергей Владимирович Вендин

доктор технических наук, профессор

elaprk@mail.ru

Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина

п. Майский, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты теоретического анализа по оценке величины мощности дополнительных источников теплоты для подогрева сырья в биогазовом реакторе. В основу расчетных соотношений положены решения уравнения теплопроводности Фурье в слоистых средах. Представлены окончательные расчетные соотношения для вычисления мощности дополнительных источников теплоты применительно к реакторам цилиндрической формы. Расчетные соотношения учитывают толщину стенки реактора, а также граничные условия 3-го рода на внешней поверхности реактора и граничные условия 4-го рода на границе между внутренним объемом и внутренней поверхностью стенки реактора.

Ключевые слова: биогаз, биореактор, источники теплоты, мощность.

При возрастающем энергопотреблении вопросы разработки и эффективного использования альтернативных и возобновляемых источников энергии являются своевременными и актуальными. При этом рассматриваются варианты использования энергии ветра, солнца, производство биогаза из органических отходов и др. [1-3]. Применение эффективных технологий сбраживания органических отходов с получением биогаза и органических удобрений весьма важно не только с экономических позиций, но и с позиций экологии и охраны окружающей среды. На переработку органического сырья в биогаз влияет множество факторов, среди которых можно выделить следующие: состав сырья; технологические режимы перемешивания сырья; температурные режимы при сбраживании. Согласно существующим требованиям диапазон температур внутри реактора желательно обеспечивать в следующих пределах: ± 2 °С/ч (при психрофильном режиме); $\pm 0,5$ °С/ч (при термофильном режиме) [2, 3].

Для поддержания оптимальных температур внутри реактора теплоты выделяющейся во время химической реакции брожения недостаточно. Поэтому необходимо использовать дополнительный теплоподвод, или дополнительные источники теплоты [4]. Этот вопрос изучен недостаточно, так как нет достаточно удобных методик и рабочих формул для оценки величины мощности дополнительных источников теплоты с учетом размеров биореактора, свойств сырья и условий окружающей среды.

Ниже представлены результаты теоретических исследований по возможности оценки величины мощности дополнительных источников теплоты на основе решения уравнения теплопроводности Фурье в слоистых средах [5]. Такой подход для цилиндрической модели без учета толщины стенки реактора был рассмотрен ранее и представлен в работе [6].

Более общий случай для реактора цилиндрической формы можно представить в виде физической модели, когда биореактор представляется в виде сплошного цилиндра с внутренним радиусом R_1 (рабочий объем реактора) и высотой H , окруженного цилиндрической оболочкой радиусом R_2 и со

стенкой толщиной Δ . Для основных размеров выполняется условие: $R_2 = R_1 + \Delta$.

В том случае, когда технологический диапазон изменения температуры при сбраживании определяется, как разница значений температурного поля между центром биореактора $T_1(0)$ и у внутренней стенкой биореактора $T_1(R)$:

$$\Delta T_1 = T_1(0) - T_1(R), \quad (1)$$

тепловую мощность, равномерно распределенных по объему реактора, дополнительных источников теплоты P (Вт) можно рассчитать по выражению [6]:

$$P = 4\pi\lambda_1 H \Delta T_1, \quad (2)$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности среды во внутреннем объеме (Вт/м·К°); H – высота реактора, м.

Заметим, что условие (1) и выражение (2) формально не учитывают стенку реактора и условия теплообмена. Поэтому необходимо исходить из обеспечения рекомендуемой и нормируемой (критической) внутри реактора температуры на оси реактора $T_{кр} = T_1(0)$, что приводит к требованию по выполнению условия вида:

$$\Delta \bar{T} = T_1(0) - T_c, \quad (3)$$

где T_c – температура окружающей среды снаружи реактора, С°.

В этом случае мощность для реактора цилиндрической формы можно оценить по формуле:

$$P = 4\pi\lambda_1 H \Delta \bar{T} F_{ц}(R_1, \Delta, \lambda_1, \lambda_2, \alpha), \quad (4)$$

где $F_{ц}(R_1, \Delta, \lambda_1, \lambda_2, \alpha)$ - безразмерная функция учитывающая свойства стенки и условий теплообмена; α - коэффициент теплоотдачи на внешней поверхности; λ_1 - коэффициент теплопроводности биогазовой среды; λ_2 - коэффициент теплопроводности стенки реактора.

При этом функция $F_{ц}(R_1, \Delta, \lambda_1, \lambda_2, \alpha)$ однозначно определяется следующим выражением:

$$F_{ц}(R_1, \Delta, \lambda_1, \lambda_2, \alpha) = 1/[1 + 2(\lambda_1/(\lambda_2))(\ln(R_2/R_1) + 2(\lambda_1/\alpha)(1/R_2)], \quad (5)$$

Ниже, для примера, на рисунках 1 и 2 приведена расчетная поверхность мощности дополнительных источников теплоты при изменении толщины кирпичной стенки Δ и наружной температуры воздуха T_c проведенные с учетом выражений (4) - (5) для различной теплопроводности стенки λ_2 .

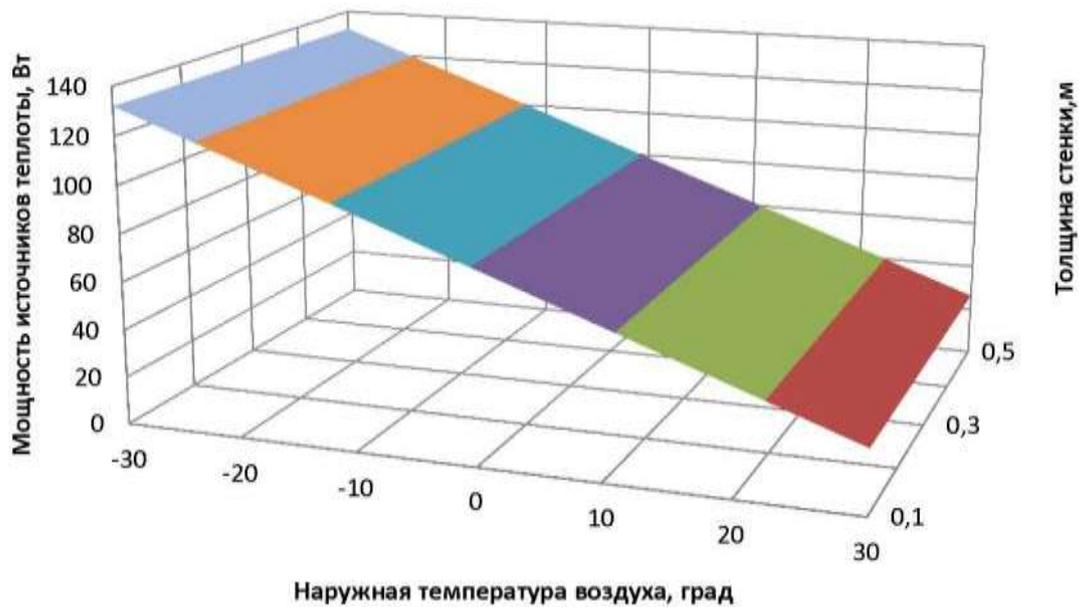


Рисунок 1 - Мощность дополнительных (сторонних) источников теплоты при изменении толщины цилиндрической стенки Δ и наружной температуры воздуха T_c ($\lambda_2 = 0,4$ Вт/м·К°)

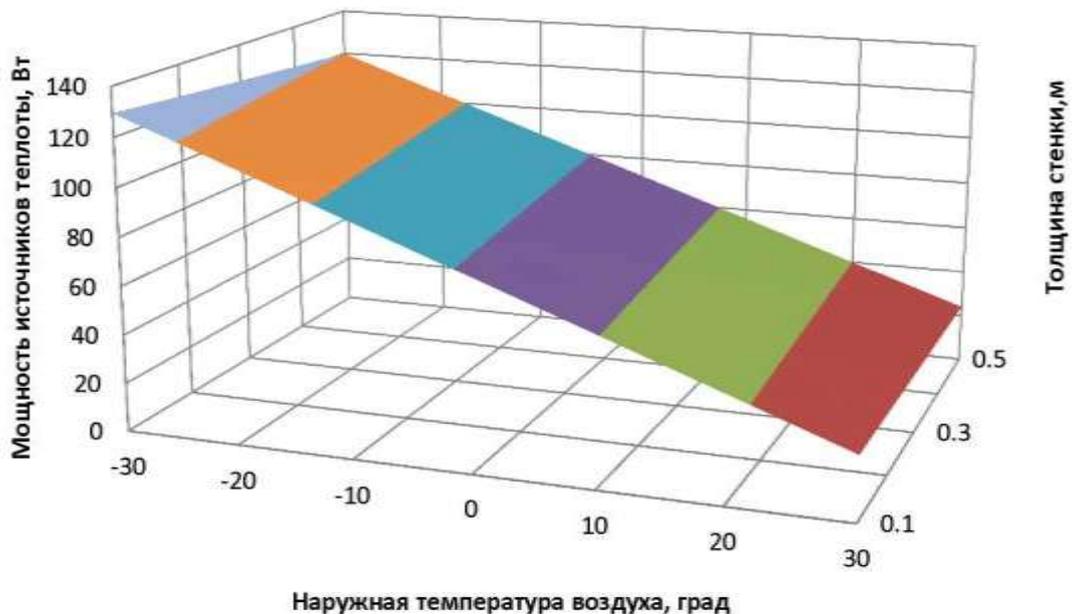


Рисунок 2 - Мощность дополнительных (сторонних) источников теплоты при изменении толщины цилиндрической стенки Δ и наружной температуры воздуха T_c ($\lambda_2 = 0,02$ Вт/м·К°)

Список литературы:

1. Зазуля А.Н., Хребтов Н.А. Основные направления использования биогаза в мире // «Наука в центральной России» Научно-производственный периодический журнал 2008. №2. С. 31-35.
2. Трахунова И.А., Халилова Г.Р., Караева Ю.В. Эффективность процесса анаэробного сбраживания при различных режимах гидравлического перемешивания // Альтернативная энергетика и экология. № 10. 2011. С. 90-94.
3. Ковалёва М.Ю. Белгородская область: альтернативная энергия – спутник Агропрома // Альтернативная энергетика и экология. №3. 2012. С. 112-115.
4. Садчиков А.В., Кокарев Н.Ф. Оптимизация теплового режима в биогазовых установках // Фундаментальные исследования. № 2-1. 2016. С. 90-93.
5. 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. 823-825.
6. Вендин С.В., Мамонтов А.Ю., Ульяновцев Ю.Н. К выбору теплоизоляции для корпуса биогазового реактора с учетом дополнительного подогрева сырья // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. №2 (26). 2020. С. 16-26.

UDC 536.7

APPLICATION OF SOLUTIONS OF THE FOURIER HEAT CONDUCTIVITY EQUATION FOR ESTIMATION OF THE POWER OF HEAT SOURCES WHEN HEATING RAW MATERIALS IN BIOGAS REACTORS

Sergey V. Vendin

doctor of technical sciences, professor

elapk@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a theoretical analysis to assess the power of additional heat sources for heating raw materials in a biogas reactor. The calculated relations are based on the solutions of the Fourier heat equation in layered media. The final calculation ratios for calculating the power of additional heat sources as applied to cylindrical reactors are presented. The calculated ratios take into account the thickness of the reactor wall, as well as the boundary conditions of the 3rd kind on the outer surface of the reactor and the boundary conditions of the 4th kind at the boundary between the internal volume and the inner surface of the reactor wall.

Key words: biogas, bioreactor, heat sources, power.

Статья поступила в редакцию 27.04.2023; одобрена после рецензирования 05.06.2022; принята к публикации 30.06.2023.

The article was submitted 27.04.2023; approved after reviewing 05.06.2022; accepted for publication 30.06.2023.