



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОМАСООБМЕНА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ БИОГАЗА В МЕТАНТЕНКЕ

Н. В. Колосова¹, С. И. Монах²

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.

E-mail: ¹ n.v.kolosova@donnasa.ru, ² ms0660101047@mail.ru

Получена 27 марта 2019; принята 24 мая 2019.

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы тепломассообмена в метантенке при получении биогаза путем сбраживания биомассы. Тепловая мощность для нагрева сбраживаемой биомассы зависит от различных факторов, одним из которых является наличие отложений твердой фракции субстрата на нагревательном элементе метантенка. Также на механизм передачи теплоты от змеевика к сбраживаемой массе оказывает влияние барботаж выделяющегося газа из самой массы. В статье рассмотрены процессы передачи теплоты от нагревательного элемента к сбраживаемой массе при отсутствии барботажа и с его учетом. Разработанная математическая модель тепломассообмена дает возможность определить влияние толщины отложений на нагревательном элементе на интенсивность теплопередачи и оценить интенсивность теплоотдачи от греющего змеевика к сбраживаемой массе при отсутствии барботажа и с его учетом.

Ключевые слова: метантенк, температурный режим, тепломассообмен, интенсивность теплопередачи, теплоотдача, барботаж.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ПРИ ОТРИМАННІ БІОГАЗУ У МЕТАНТЕНКУ

Н. В. Колосова¹, С. І. Монах²

ДОН ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,
2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 286123.

E-mail: ¹ n.v.kolosova@donnasa.ru, ² ms0660101047@mail.ru

Отримана 27 березня 2019; прийнята 24 травень 2019.

Анотація. У статті розглянуті питання тепломасообміну у метантенку при отриманні біогазу шляхом зброджування біомаси. Теплова потужність для нагріву маси, що зброджується, залежить від різних чинників, одним з яких є наявність відкладення твердої фракції субстрату на нагрівальному елементі метантенка. Також на механізм передачі теплоти від змійовика до біомаси впливає барботаж газу, що виділяється з самої маси. У статті розглянуті процеси передачі теплоти від нагрівального елемента до маси, що зброджується за відсутності барботажа і з його урахуванням. Розроблена математична модель тепломасообміну дає можливість визначити вплив товщини відкладення на нагрівальному елементі на інтенсивність теплопередачі і оцінити інтенсивність тепловіддачі від нагрівального елемента до біомаси при відсутності барботажа і з його урахуванням.

Ключові слова: метантенк, температурний режим, тепломасообмін, інтенсивність теплопередачі, тепловіддача, барботаж.

A MATHEMATICAL MODEL OF HEAT AND MASS EXCHANGE IN BIOGAS PRODUCING IN A DIGESTER

Nelly Kolosova¹, Svetlana Monakh²

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture
2, Derzhavina Str., Makeyevka, DPR, 286123.*

E-mail: ¹ n.v.kolosova@donnasa.ru, ² ms0660101047@mail.ru

Received 27 March 2019; accepted 25 May 2019.

Abstract. The article discusses issues of heat and mass transfer in the digester in the production of biogas by fermenting biomass. Thermal power for heating the fermented biomass depends on various factors, one of which is the presence of deposits of the solid fraction of the substrate on the heating element of the digester. Also, the mechanism of heat transfer from the coil to the fermentation mass is affected by the bubbling of the released gas from the mass itself. The article describes the processes of heat transfer from the heating element to the fermented mass in the absence of bubbling and taking it into account. The developed mathematical model of heat and mass exchange makes it possible to determine effect of the thickness of the deposits on the coil on intensity of heat emission from the heating coil to the fermented mass with and without bubbling.

Keywords: a digester, temperature regime, heat and mass exchange, heat transfer intensity, heat-emission, bubble.

Формулировка проблемы

Увеличение количества фермерских хозяйств и поголовья на них приводит к увеличению накопления отходов животных (биомассы). Это заставляет фермеров находить способы утилизации биомассы, так как системы ее уборки и хранения являются источником выбросов метана и закиси азота [1]. Это приводит к загрязнению окружающей среды и усилению парникового эффекта. Наиболее распространёнными способами утилизации очистки хозяйственно-бытовых сточных вод населенных мест, которые применяются в жилищно-коммунальном хозяйстве, является аэробная и анаэробная обработка [2]. Данные методы можно применять и для обеззараживания отходов фермерских хозяйств. Обработка отходов в анаэробных условиях позволяет получить биогаз. После его очищения от примесей получается биометан и им можно заменить природный газ, расходуемый на нужды данного фермерского хозяйства.

Производство биогаза путем сбраживания отходов животноводческих ферм (биомассы) происходит в специальных емкостях – метантенках (МТ) при постоянной температуре. Количество выделяемого биогаза в цикле сбраживания

зависит от температурного режима в МТ. Поэтому интенсивность теплообмена между нагреваемым элементом и СМ играет решающую роль в производительности МТ по биогазу.

Анализ последних исследований и публикаций

Анаэробное сбраживание в МТ возможно в трех температурных режимах: психрофильный (10...20 °С), мезофильный (30...45 °С), термофильный (50...65 °С) [3, 4]. Сбраживание биомассы при психрофильном режиме работы, в климате с низкими температурами не применяется. Это связано с тем, что увеличивается длительность сбраживания и наблюдается небольшая производительность биогаза.

На практике применяются мезофильный и термофильный режимы сбраживания. Каждый из этих режимов имеет свои достоинства и недостатки. Преимуществами термофильного режима сбраживания является высокая скорость разложения биомассы, высокий выход биогаза. К недостаткам термофильного режима относится большое количество энергии, требуемое на поддержание высокой температуры в МТ, а также возрастает чувствительность бактерий к минимальным изменениям температуры, что приводит

к уменьшению выхода биогаза. Поэтому работа при высоких температурах требует установки специальных систем автоматизации и точного управления работой биогазовой установки. К недостаткам термофильного режима сбраживания можно отнести тот факт, что при высоких температурах растворенная в биомассе двуокись углерода интенсивнее переходит в газообразную фазу (в биогаз), при этом содержание метана сокращается. В связи с тем, что в МТ поддерживается высокая температура и происходит быстрый процесс переработки и обеззараживания биомассы, термофильный режим в основном применяют с целью обеспечения санитарной обработки биомассы [5].

Большинство установок работают в мезофильном режиме. При этом наиболее активно развиваются метаногенные бактерии с максимальным образованием биогаза.

В работе [5, 6, 7, 8] рассмотрены вопросы нагрева сбраживаемой массы различными способами. Также авторами [9, 10] указывается, что на наружной поверхности нагревательного элемента образуются отложения, которые оказывают влияние на интенсивность нагрева сбраживаемой массы.

При отсутствии механического перемешивания СМ пузырьки образующегося биогаза оказывают влияние на механизм передачи теплоты от нагревательного элемента к биомассе [11]. Поэтому необходимо рассматривать нагрев СМ с учетом барботажа.

Цели

Целью данной работы является разработка математической модели теплообмена в МТ с учетом образования отложений на греющем змеевике и с учетом барботажа сбраживаемой массы.

Основной материал

Для поддержания постоянной температуры предусмотрены нагревательные элементы, смонтированные внутри МТ. Различают различные способы нагрева субстрата – такие как: нагрев горячей водой через змеевик (ЗМ), электронагрев, нагрев паром. В данной работе рассматривается нагрев сбраживаемой массы (СМ) через ЗМ, в котором циркулирует греющий теплоноситель (вода).

Технологический процесс работы МТ предусматривает несколько раз в сутки частичную выгрузку сброженной биомассы из МТ и добавление такого же количества свежей биомассы в МТ. Также после загрузки свежей порции происходит перемешивание всей массы для усреднения температуры и для равномерного распределения жидкой и твердой фракции субстрата во всем объеме МТ. Нагрев свежей биомассы в МТ до температуры сбраживания при перемешивании субстрата механической мешалкой рассмотрен в работе [12]. Все остальное время работы в МТ механическая мешалка выключена. Количество теплоты подводимое в этот период через ЗМ в МТ $Q_{нагр}$ будет расходоваться только на компенсацию теплотопотерь.

$$Q_{нагр} = Q_{ном}.$$

Расчет потерь теплоты в окружающую среду $Q_{ном}$ рассмотрен в работе [13].

Для рассматриваемого фермерского хозяйства, в котором имеется 100 голов КРС и 200 голов свиней, сбраживание происходит в монолитном МТ, $Q_{ном}$ составят 12 390 Вт.

Нагревательный элемент – ЗМ, смонтирован внутри корпуса МТ. В процессе работы МТ на ЗМ наблюдается образование отложений твердой фракции биомассы, что влияет на интенсивность теплообмена [14]. В данных исследованиях учтено влияние толщины отложений $\delta_{отл}$ на интенсивность теплообмена в МТ. Также следует отметить, что после перемешивания величина $\delta_{отл}$ уменьшается.

Процесс теплопередачи от греющего теплоносителя к сбраживаемой массе можно условно разделить на четыре этапа при соблюдении закона сохранения энергии.

Первый этап – теплоотдача от греющего теплоносителя к стенке змеевика; второй этап – процесс передачи теплоты теплопроводностью в стенке самого змеевика; третий – процесс передачи теплоты теплопроводностью в налипших на наружную стенку змеевика отложениях и четвертый этап – теплоотдача от наружной стенки змеевика к сбраживаемой массе.

В условиях, когда нет отложений на наружной стенке змеевика, третий этап не учитывается. Тепловой поток для каждого из указанных этапов запишется:

$$Q_{нагр} = \alpha_1 \cdot F \cdot (\overline{t_{cp}} - t_{cm1}), \text{ Вт}; \quad (1)$$

$$Q_{нагр} = \frac{\pi \cdot l}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_{зм}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}} \cdot (t_{см1} - t_{см2}), \text{ Вт}; \quad (2)$$

$$Q_{нагр} = \frac{\pi \cdot l}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_{отл}} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2}} \cdot (t_{см2} - t_{отл}), \text{ Вт}; \quad (3)$$

$$Q_{нагр} = \alpha_2 \cdot F \cdot (t_{отл} - t_{см}), \text{ Вт}; \quad (4)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от греющего теплоносителя к внутренней стенке ЗМ, Вт/(м²·град);

F – площадь поверхности ЗМ, м²;

$t_{ср}$ – средняя температура греющего теплоносителя, °С;

$t_{см1}$ и $t_{см2}$ – температуры соответственно на внутренней и наружной стенке ЗМ, °С;

$t_{отл}$ – температура на поверхности отложений, °С;

$t_{см}$ – температура сбрасываемой массы, °С;

l – длина змеевика, м;

$\lambda_{зм}$ и $\lambda_{отл}$ – коэффициенты теплопроводности соответственно материала ЗМ и отложений, Вт/(м·град);

d_1 , d_2 , d_3 – соответственно внутренний диаметр ЗМ, наружный диаметр ЗМ, диаметр ЗМ с учетом толщины отложений, м. Для изготовления ЗМ в рассматриваемом МТ принята стальная труба с наружным диаметром $d_2 = 35$ мм и внутренним $d_1 = 28$ мм, $d_3 = d_2 + 2 \cdot \delta_{отл}$;

α_2 – коэффициент теплоотдачи от наружной стенки ЗМ к СМ, Вт/(м²·град);

Уравнение (1) определяет тепловой поток от греющего теплоносителя к внутренней стенке ЗМ путем конвективного теплообмена. Уравнения (2) и (3) определяют тепловой поток теплопроводностью через стенку ЗМ и толщину отложений на ЗМ соответственно. Уравнение (4) определяет тепловой поток с наружной поверхности отложений к СМ.

Для определения α_1 необходимо определить режим движения теплоносителя. Для этого определяется скорость движения воды в ЗМ:

$$W_g = \frac{4 \cdot m'_g}{\rho_g|_{t_g} \cdot \pi \cdot d_1^2}, \text{ м/с}, \quad (5)$$

где $\rho_g|_{t_g}$ – плотность воды при ее средней температуре в ЗМ, кг/м³.

m'_g – расход греющей воды через ЗМ для компенсации потерь тепловой мощности может быть найден из уравнения теплового баланса:

$$m'_g = \frac{Q_{пот}}{C_g|_{t_g} \cdot (t_{вх} - t_{вых})}, \text{ кг/с}, \quad (6)$$

где $C_g|_{t_g}$ – массовая теплоемкость воды при ее средней температуре в ЗМ, кДж/(кг·град).

$t_{вх}$, $t_{вых}$ – температура теплоносителя на входе и на выходе из ЗМ, °С.

Критериальное уравнение конвективного теплообмена между греющей водой и внутренней стенкой ЗМ при турбулентном течении теплоносителя в змеевике имеет вид [15]:

$$Nu_g = 0,021 \cdot Re_g^{0,8} \cdot (Pr|_{t_g})^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr|_{t_g}}{Pr|_{t_{см}}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_R, \quad (7)$$

где $Nu_g = \frac{\alpha_1 \cdot \lambda_g|_{t_g}}{d_1}$ – число Нуссельта;

$Re_g = \frac{w_g \cdot d_1}{\nu_g|_{t_g}}$ – число Рейнольдса;

$\varepsilon_R = 1 + 1,77 \cdot \frac{d_1}{R_{зм}}$ – поправочный коэффициент для изогнутых труб;

$\lambda_g|_{t_g}$ и $\nu_g|_{t_g}$ – коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости воды при ее средней температуре в ЗМ, Вт/(м·град) и м²/с;

$R_{зм}$ – радиус ЗМ, м, $R_{зм} = 1,9$ м;

$Pr|_{t_g}$ и $Pr|_{t_{см}}$ – числа Прандтля для воды при ее средней температуре в ЗМ и температуре внутренней стенки ЗМ.

Температура внутренней стенки $t_{ст.ин}$ практически равна средней температуре воды. Поэтому $Pr|_{t_g} \cong Pr|_{t_{см}}$.

Теплофизические характеристики воды приняты по данным [16] для ее средней температуры в змеевике $t_g = 50$ °С.

На основе приведенной математической модели был проведен численный эксперимент по определению интенсивности теплопередачи от греющего теплоносителя к сбрасываемой массе в зависимости от толщины отложений на наружной поверхности змеевика и наличия барботаж при выходе биогаза.

По результатам расчетов основные характеристики процесса теплообмена в ЗМ составили $w_g = 1,5$ м/с, $\alpha_1 = 6\,818$ Вт/(м²·град).

В уравнении (4) коэффициент теплоотдачи определялся двумя способами, в зависимости от характера движения сбрасываемой массы: при свободной конвекции от греющей стенки к биомассе (при отсутствии барботажа, α'_2) и при

вынужденной конвекции со скоростью движения пузырьков биогаза (при барботаже, $CM \alpha_{3M}^{//}$).

В первом случае критериальное уравнение конвективного теплообмена имеет вид

$$Nu = 0,5 \cdot (Gr_{d_{cu}} \cdot Pr_{CM})^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_{CM}}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (8)$$

где $Nu = \frac{\alpha_2' \cdot d_3}{\lambda_{CM}}$ – число Нуссельта;

Pr_{CM} и Pr_{cm} – числа Прандтля при температуре CM и температуре стенки $ЗМ$;

$Gr_{d_{cu}}$ – число Грасгофа.

$$Gr_{d_{cu}} = \frac{\beta \cdot d_3 \cdot g \cdot \Delta t}{\nu^2}, \quad (9)$$

где β – температурный коэффициент объёмного расширения CM ;

g – ускорение свободного падения, $м/с^2$;

Δt – разность температур поверхности $ЗМ$ и CM , $^{\circ}C$;

ν – коэффициент кинематической вязкости CM , $м^2/с$.

По результатам расчетов коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции $\alpha_2' = 231 \text{ Вт}/(м^2 \cdot \text{град})$.

Определение коэффициента теплоотдачи в условиях барботажа CM пузырьками образующегося биогаза возможно после определения их скорости всплытия. В работе [10] приведена методика определения скорости всплытия пузырьков биогаза, которая основана на формулах, применяющихся в сталеплавильном производстве.

При омывании $ЗМ$ CM , движущейся со скоростью всплытия пузырьков биогаза $w_{всп} = 6,003 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$, режим движения определяется по величине числа Рейнольдса:

$$Re_{3M} = \frac{w_{всп} \cdot d_3}{\nu_{40}}. \quad (10)$$

В условиях турбулентного режима ($Re_{3M} = 2725$) при омывании одиночной трубы критериальное уравнение имеет вид [7]:

$$Nu_{3M}^{//} = 0,28 \cdot Re_{3M}^{0,6} \cdot Pr_{40}^{0,6} \cdot \left(\frac{Pr_{40}}{Pr_{50}} \right)^{0,25}. \quad (11)$$

Коэффициент теплоотдачи, полученный с использованием уравнения (11), составил $\alpha_{3M}^{//} = 650 \text{ Вт}/(м^2 \cdot \text{град})$.

Так как $ЗМ$ выполнен из тонкостенных труб, отношение d_n/d_s меньше 1,4, коэффициент теплопередачи «К» может быть рассчитан по уравнению, применяемому для плоской стенки:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{3M}}{\lambda_{3M}} + \frac{\delta_{отл}}{\lambda_{отл}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (17)$$

где $\delta_{3M} = (d_2 - d_1)/2$ – толщина стенки трубы $ЗМ$, $м$;

λ_{3M} – коэффициент теплопроводности материала (стали) стенки трубы $ЗМ$, $Вт/(м \cdot \text{град})$;

С учетом полученных значений α_2' и $\alpha_{3M}^{//}$ коэффициент теплопередачи в условиях отсутствия барботажа равен $K' = 220 \text{ Вт}/(м^2 \cdot \text{град})$, а с учетом барботажа $K'' = 570 \text{ Вт}/(м^2 \cdot \text{град})$. Данные расчеты проводились при отсутствии отложений на наружной стенке $ЗМ$ и температуре окружающей среды $-22^{\circ}C$. Представляет интерес анализ влияния толщины отложений на наружной стенке $ЗМ$ на интенсивность теплопередачи (рисунок).

В результате анализа полученной зависимости можно сделать вывод, что увеличение толщины отложений приводит к значительному уменьшению коэффициента теплопередачи и, как следствие, ухудшению прогрева CM и снижению интенсивности выхода биогаза.

Выводы

Влияние барботажа биомассы пузырьками биогаза позволяет учитывать потери теплоты на этапе предварительного проектирования $МТ$ с целью обеспечения поддержания в процессе эксплуатации стабильного теплового режима сбраживания биомассы в $МТ$.

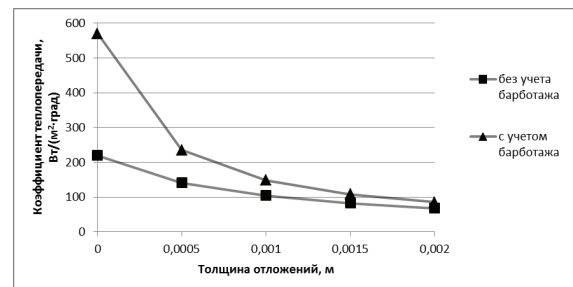


Рисунок. Зависимость коэффициента теплопередачи от толщины отложений на наружной стенке $ЗМ$.

Разработанная математическая модель позволяет определять тепловой поток от греющего теплоносителя к СМ с учетом толщины отложений на наружной стенке ЗМ и температуры

окружающей среды. Дальнейшие исследования будут направлены на обоснование предложений по интенсификации процессов теплообмена в МТ.

Литература

1. Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов в Украине за 1990–2007 гг. [Электронный ресурс] / М. В. Березницкая, О. В. Бутрим, Г. Г. Панченко [и др.]. – К.: Министерство охраны окружающей природной среды Украины, 2008. – 319 с. – Режим доступа: http://climategroup.org.ua/upl/Nac_zvit_p_parn_gazy_90-07.pdf.
2. Нездойминов, В. И. Математическое описание основных факторов, влияющих на формирование взвешенного слоя осадка в илоотделителе [Текст] / В. И. Нездойминов, В. И. Зятин, В. С. Рожков [и др.] // Современное промышленное и гражданское строительство. 2016. Т. 12, № 2. С. 51–58.
3. Дубровский, В. С. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов [Текст] / В. С. Дубровский, У. Э. Виестур. – Рига: Зинатне, 1988. – 204 с.
4. Барбара, Э. Биогазовые установки. Практическое пособие [Текст] / Э. Барбара, Ш. Хайнц; пер. с нем. выполнен компанией Zorg Biogas, под науч. ред. И. А. Реддих. – [Б. м.]: Zorg Biogas, 2011. – 268 с.
5. Садчиков, А. В. Оптимизация теплового режима в биогазовых установках [Текст] / А. В. Садчиков, Н. Ф. Кокарев // Фундаментальные исследования. 2016. № 2, Часть 1. С. 90–93.
6. Вохмин, В. С. Исследование конвективно-индукционного нагрева при анаэробном сбраживании отходов животноводческих ферм [Электронный ресурс] / В. С. Вохмин // Политематический сетевой электронный журнал научный журнал Кубанского аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). 2011. № 06(70). С. 35–47. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2011/06/pdf/04.pdf>.
7. Ратушняк, Г. С. Энергобережения в системах биоконверсии [Текст]: навчальний посібник / Г. С. Ратушняк, В. В. Дзеджула. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 83 с.
8. Teleszewski, T. J. Analysis of Heat Loss of a Biogas Anaerobic Digester in Weather Conditions in Poland [Text] / T. J. Teleszewski, M. Zukowski // Journal of Ecological Engineering. 2018. Vol. 19, № 4, P. 242–250.
9. Биогаз. Теория и практика [Текст] / В. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер; [Пер. с нем. и пред. М. И. Серебряного]. – М.: Колос, 1982. – 148 с.

References

1. National inventory of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases in Ukraine for 1990–2007 [Electronic resource] / auth. project M. V. Bereznitskaya, O. V. Butrim, G. G. Panchenko [and others]. – K.: Ministry of Environmental Protection of Ukraine, 2008. – 319 p. – Access mode: http://climategroup.org.ua/upl/Nac_zvit_p_parn_gazy_90-07.pdf. (in Russian)
2. Mathematical description of the main factors influencing the formation of a suspended sediment layer in a desilter [Text] / V. I. Nezdoyminov, V. I. Zyatina, V. S. Rozhkov [et al.] // In: *Modern Industrial and Civil Construction*. 2016. Vol. 12, № 2. P. 51–58. (in Russian)
3. Dubrovsky, V. S. Methanovoe fermentation of agricultural waste [Text] / V. S. Dubrovsky, U. E. Viestur. – Riga: Zinatne, 1988. – 204 p.
4. Barbara, E. Biogas plants. Practical guide [Text] / E. Barbara, S. Heinz; per. with him. performed by Zorg Biogas, under the scientific. ed. I. A. Reddich. – [S. c.]: Zorg Biogas, 2011. – 268 p. (in Russian)
5. Sadchikov, A. V. Optimization of the thermal regime in biogas plants [Text] / A. V. Sadchikov, N. F. Kokarev // In: *Fundamental research*. 2016. № 2, Part 1. P. 90–93. (in Russian)
6. Vokhmin, V. S. Investigation of convective – induction heating during anaerobic digestion of waste from livestock farms [Electronic resource] / V. S. Vokhmin // In: *Polythematic network electronic journal scientific journal of the Kuban Agrarian University (Scientific journal KubGAU)*. 2011. № 06(70). P. 35–47. – Access mode: <http://ej.kubagro.ru/2011/06/pdf/04.pdf>. (in Russian)
7. Ratushniak, G. S. Energy saving in systems of bioconversion [Text]: textbook / G. S. Ratushniak, V. V. Dzhezdzula. – Vinnitsa: VNTU, 2006. – 83 p. (in Ukrainian)
8. Teleszewski, T. J. Analysis of Heat Loss of a Biogas Anaerobic Digester in Weather Conditions in Poland [Text] / T. J. Teleszewski, M. Zukowski // In: *Journal of Ecological Engineering*. 2018. Vol. 19, № 4, P. 242–250.
9. Baader, V. Biogas. Theory and practice [Text] / V. Baader, E. Donet, M. Brennderfer; [Trans. with him. and foreword by M. I. Silver]. – M.: Kolos, 1982. – 148 p. (in Russian)
10. Kovalev, A. A. Increasing the energy efficiency of biogas plants [Text]: dis. ... Ph.D. (Eng.): 05.20.01 /

10. Ковалев, А. А. Повышение энергетической эффективности биогазовых установок [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Ковалев Андрей Александрович. – Москва, 2014. – 114 с.
11. Чеботарева, О. В. Особенности теплообмена в метантенке при сбраживании неперемешиваемой биомассы [Текст] / О. В. Чеботарева, В. А. Сербин, Н. В. Колосова // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2012. Вип. 2012–2(94) Інженерні системи та техногенна безпека. С. 42–48.
12. Чеботарева, О. В. Температурный режим сбраживаемой массы при загрузке в метантенк свежей порции отходов [Текст] / О. В. Чеботарева, В. А. Сербин, Н. В. Колосова // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2013. Вип. 2013–5(103) Інженерні системи та техногенна безпека. С. 26–29.
13. Чеботарева, О. В. Теплообмен с окружающей средой метантенка для сбраживания биомассы [Текст] / О. В. Чеботарева, В. А. Сербин, Н. В. Колосова // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2010. Вип. 2010–6(86) Інженерні системи та техногенна безпека. С. 31–36.
14. Колосова, Н. В. Влияние толщины отложений на змеевике метантенка на интенсивность теплоотдачи к сбраживаемой биомассе [Текст] / Н. В. Колосова, С. И. Монах // Энергетические системы : сб. тр. II Междунар. науч.-техн. конф. БГТУ им. В. Г. Шухова (г. Белгород, 23–24 ноября 2017 г.). – Белгород : БГТУ, 2017. – С. 50–53.
15. Михеев, М. А. Основы теплопередачи [Текст] / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.
16. Ривкин, С. Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара [Текст] / С. Л. Ривкин, А. А. Александров. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 80 с.
- Kovalev Andrey. – Moscow, 2014. – 114 p. (in Russian)
11. Chebotareva, O. V. Features of heat transfer in the digester during the fermentation of non-stirred biomass [Text] / O. V. Chebotareva, V. A. Serbin, N. V. Kolosova // In: *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2012. Issue 2012-2(94) Engineering systems and technogenic safety. P. 42–48. (in Russian)
12. Chebotareva, O. V. Temperature regime of the fermented mass when loading a fresh portion of waste into the digesters [Text] / O. V. Chebotareva, V. A. Serbin, N. V. Kolosova // In: *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2013. Issue 2013-5(103) Engineering systems and technogenic safety. P. 26–29.
13. Chebotareva, O. V. Heat exchange with the environment of the digester for the fermentation of biomass [Text] / O. V. Chebotareva, V. A. Serbin, N. V. Kolosova // In: *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2010. Issue 2010-6(86) Engineering systems and technogenic safety. P. 31–36. (in Russian)
14. Kolosova, N. V. Influence of the thickness of deposits on the coil of the digester on the intensity of heat transfer to the fermented biomass [Text] / N. V. Kolosova, S. I. Monk // *Energy Systems : coll. proceedings II Intern. scientific and technical conf. BSTU them. V. G. Shukhov* (Belgorod, November 23–24, 2017). – Belgorod : BSTU, 2017. – P. 50–53. (in Russian)
15. Mikheev, M. A. Fundamentals of heat transfer [Text] / M. A. Mikheev, I. M. Mikheeva. – M. : Energy, 1977. – 344 p. (in Russian)
16. Rivkin, S. L. Thermophysical properties of water and water vapor [Text] / S. L. Rivkin, A. A. Alexandrov. – M. : Energoatomizdat, 1984. – 80 p. (in Russian)

Колосова Нелли Вадимовна – ассистент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергоресурсосбережение.

Монах Светлана Игоревна – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: инновационные технологии энергосбережения.

Колосова Неллі Вадимівна – асистент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоресурсозбереження.

Монах Світлана Ігорівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: інноваційні технології енергозбереження.

Kolosova Nelly – Assistant, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: saving of energy resources.

Monah Svetlana – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply, and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: innovative energy-saving technology.