

УДК 532.529.5

С. И. Ткаченко, д. т. н., проф.; О. Ю. Бочкова; Н. Д. Степанова к. т. н., доц.**БИОГАЗОВАЯ УСТАНОВКА С СИСТЕМОЙ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ КОНТУРОВ**

Проанализированы проблемы термостабилизации и перемешивания в биогазовой установке (БГУ) с учетом особенностей жизнедеятельности метанобразующих бактерий. Предложен и проанализирован эрлифтный метод организации циркуляции в системе, обеспечивающей равномерный подвод теплоты и перемешивания с учетом микробиологических особенностей анаэробного процесса.

Ключевые слова: биореактор, сложная смесь, двухфазные потоки, высоковязкие жидкости, эрлифтный метод, биогазовая установка, термостабилизация, энергоэффективность.

Введение

На удельный выход биогаза влияют вид технологической схемы БГУ, качество термостабилизации, способ и интенсивность перемешивания, соотношение углерода и азота, водородный показатель субстрата перед реактором и в реакторе, наличие ингибиторов процесса, скорость обращения вещества и т. д. [1].

Проблема стабилизации температурных режимов в реакторе биогазовой установки затруднена необходимостью учета микробиологических особенностей анаэробных процессов. Перепады температуры негативно влияют на ход процесса биоконверсии, поэтому необходимо сочетать подвод теплоты для компенсации тепловых потерь биореактора с перемешиванием рабочей сырью [2]. Для подвода тепловой энергии к субстрату используют внутренние и выносные рекуперативные теплообменные устройства, контактные теплообменники [3]. На этапе проектирования системы биоконверсии теплообменные устройства в отдельных случаях целесообразно выносить за пределы реактора, а поэтому возникает потребность в установке насоса для субстрата. При этом следует учесть чувствительность бактериальной среды к скорости движения. Перемещение субстрата со скоростью более 0,6 м/с снижает жизнеспособность метанобразующих бактерий, что может привести к уменьшению выхода биогаза [4]. В насосе образуются участки, где линейные скорости жидкости могут превышать 0,6 м/с. Контроль за скоростями в условиях работы насоса на этих участках в системе циркуляции затруднен.

Для решения проблемы перемешивания и термостабилизации в биогазовых реакторах с учетом ограничений скоростей субстрата ($W_c \leq 0,6$ м/с) возникает потребность в организации циркуляции без использования насоса. Организовать циркуляцию можно с помощью эрлифтного метода, который предполагает подведение части биогаза нагнетательным устройством с реактора на участок расположенный после теплообменника. В этом случае можно управлять подачей биогаза в надставку и таким образом устанавливать заданную линейную скорость субстрата.

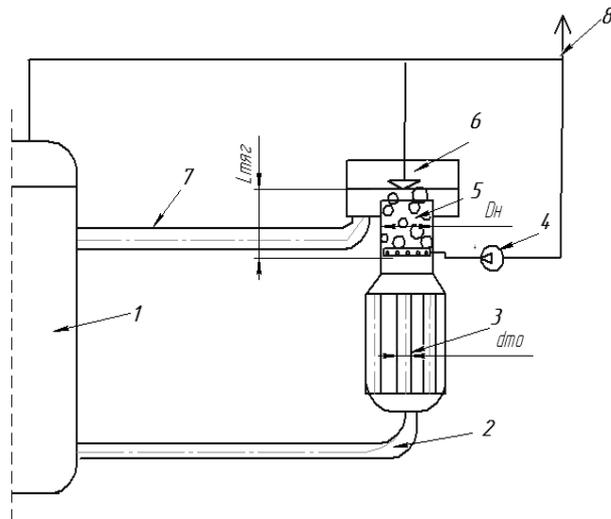
Целью исследования является разработка метода создания энергоэффективной БГУ при объединении рациональных процессов термостабилизации и перемешивании путем внедрения контуров с теплообменником и эрлифтной системой организации циркуляции.

Основная часть

Предложенная нами система с эрлифтным методом организации циркуляции работает следующим образом (рис. 1 а) [5]. Субстрат по прямому трубопроводу 2 поступает в кожухотрубный теплообменник 3, где его подогревают водой температурой t_6 до необходимой температуры t_c . Биогаз подают из реактора 1 с помощью нагнетателя 4 в

надставку теплообменника 5, куда одновременно поступает подогретый субстрат. В надставке создается двухфазный газожидкостный поток, плотность которого меньше плотности субстрата. Вследствие разного веса столба в биореакторе и в системе термостабилизации биогазовой установки при одинаковой высоте столбов можно обеспечить скорость субстрата $W_c \leq 0,6$ м/с. В надставке создается тяговый участок с двухфазной средой длиной $L_{тяг}$ – и в системе возникает движущий напор $P_{ов}$. Двухфазную газожидкостную смесь направляют в сепаратор 6, после чего субстрат по обратному трубопроводу 7 возвращается в биореактор 1, а биогаз отводится в газгольдер 8.

а)



б)

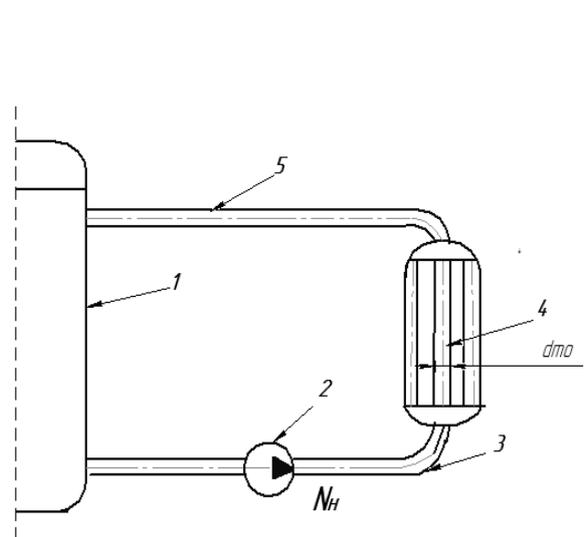


Рис. 1. а) схема циркуляционного контура с теплообменником и тяговым участком:

1 – реактор, 2 – прямой трубопровод, 3 – теплообменник, 4 – нагнетатель биогаза, 5 – надставка с тяговым участком, 6 – сепаратор, 7 – обратный трубопровод, 8 – в газгольдер;

б) схема циркуляционного контура с теплообменником и насосом с электрическим двигателем:

1 – реактор, 2 – насос, 3 – прямой трубопровод, 4 – кожухотрубный теплообменник, 5 – обратный трубопровод

При помощи такой системы циркуляционных контуров (рис. 1 а), на наш взгляд, можно решить проблему перемешивания субстрата и подвода теплоты для компенсации теплотерь в реакторе [5]. Для анализа энергоэффективности такой системы было проведено ее сравнение с системой с насосом.

Итак, для численного исследования энергозатратности предложены следующие варианты системы термостабилизации БГУ:

1) система с теплообменником и надставкой (тяговым участком) с нагнетателем биогаза (рис. 1а);

2) система с теплообменником и электродвигателем для насоса (рис. 1 б).

Для анализа энергопотребления данных систем применены математические модели для:

1) определения выхода биогаза из биореактора определенного объема в сутки;

2) определения теплотерь биореактора в окружающую среду;

3) теплового расчета циркуляционного контура с теплообменником и эрлифтным тяговым участком и в случае использования системы с насосом;

4) гидравлического расчета циркуляционного контура с теплообменником и эрлифтным тяговым участком и в случае использования системы с центробежным насосом;

5) определения доли биогаза на выработку электрической энергии на привод нагнетателя биогаза и насоса.

Для определения выхода биогаза из биореактора в сутки была проанализирована работа

промышленных биогазовых установок таких фирм: "Колорадо-Биогаз" (США), "ЕНБОМ" (Финляндия), "Биосистем" (Швеция), "Пекенжени-ринг" (Франция), "Ничимен корпорейшн" (Япония), "Клаухен" (Дания) [6]. В числовых исследованиях принимали, что с единицы рабочего объема реактора удельный выход биогаза составляет $w=1-2,5 \text{ м}^3$ в сутки, тогда выход биогаза из реактора объемом V_p в сутки:

$$W = w \cdot V_p. \quad (1)$$

В данном случае выход биогаза зависит от соблюдения условий, способствующих повышению жизнеспособности метанобразующих бактерий. При регулировании подачи биогаза в тяговый участок теплообменника и за счет конструктивных характеристик эрлифтной системы появляется возможность установить скорость субстрата во всех элементах системы термостабилизации (в прямом и обратном трубопроводах, в трубах теплообменника, в надставке с двухфазным участком) не более 0,6 м/с.

Преимущественно для всех значений объема биореактора $V_p=10...1000 \text{ м}^3$, принятых нами для исследования, система термостабилизации с эрлифтным методом включала в себя n циркуляционных контуров с теплообменником. Теплообменник, согласно [7], состоит из n аппаратов-модулей. Установка системы таких циркуляционных контуров позволяет достичь равномерного распределения температуры вдоль биореактора с учетом микробиологических особенностей процесса анаэробного брожения.

Математические модели для определения теплотерь биореактора и для теплового расчета аппарата-модуля в контуре с эрлифтной надставкой и для контура с насосом были построены с применением известных уравнений теплового баланса и теплопередачи [8]. Проблема, возникшая при математическом моделировании в связи с трудностью определения интенсивности теплообмена в сложных смесях, была решена с помощью экспериментально-расчетного метода (ЭРМ) [9].

Для создания математической модели гидравлического расчета контура с теплообменником и эрлифтным тяговым участком использовали методику [10], адаптированную к условиям работы данного циркуляционного контура. Уравнения баланса движущих сил и гидравлических сопротивлений и уравнения материальных балансов, на которых базируется эта методика, были уточнены нами в связи с особенностями контура с теплообменником и эрлифтным устройством (тяговым участком).

В данном контуре с эрлифтным теплообменником и надставкой, где есть несколько однофазных участков и один двухфазный участок, уравнение баланса движущих сил и гидравлических сопротивлений имеет вид, Па

$$P_{пол} = \sum \Delta P_n, \quad (2)$$

где $P_{пол}$ – полезный напор; $\sum \Delta P_n$ – сумма потерь давления на однофазных участках.

На однофазных участках контура (в прямом и обратном трубопроводе, в трубах теплообменника) уравнение материального баланса имеет вид, кг/с:

$$G' = \rho' \cdot W_{0i}' \cdot \omega_i = const. \quad (3)$$

На двухфазной области контура (тяговый участок после теплообменника), кг / с:

$$G_c' = \rho' \cdot W_0' \cdot \omega_{\text{дф}} + \rho'' \cdot W_0'' \cdot \omega_{\text{дф}} = const, \quad (4)$$

где G' , G_c' – массовые расходы субстрата и газожидкостной смеси (субстрат + биогаз); ρ' , ρ'' – плотность субстрата и плотность биогаза; W_0' , W_0'' – соответственно приведенная скорость движения субстрата и биогаза; ω_i – площадь i -х живых сечений однофазных участков; $\omega_{\text{дф}}$ – площадь живого сечения двухфазной области (цилиндрической надставки).

Полезный напор $P_{пол}$, Па, определяют из уравнения:

$$P_{пол} = P_{об} - \Delta P_{об}^{\partial\phi}, \quad (5)$$

где $P_{об}$ – движущий напор; $\Delta P_{об}^{\partial\phi}$ – общие потери давления на двухфазной области в надставке теплообменника, Па:

$$\Delta P_{об}^{\partial\phi} = \Delta P_{тр}^{\partial\phi} + \Delta P_{ус}^{\partial\phi} + \Delta P_{г}^{\partial\phi}, \quad (6)$$

где $\Delta P_{тр}^{\partial\phi}$, $\Delta P_{ус}^{\partial\phi}$, $\Delta P_{г}^{\partial\phi}$ – потери давления на трение, на ускорение и весовые потери давления.

При расчете гидродинамических процессов в контуре возникли проблемы неопределенности теплофизических свойств (ТФС) субстрата и расчета составляющих потерь давления в двухфазном вертикальном потоке, где жидкость высоковязкая.

Для замыкания математической модели ТФС субстрата были оценены с применением ЭРМ.

В основу определения составляющих перепада давления двухфазного высоковязкого потока положено уравнение сохранения энергии. Потери давления на трение на двухфазной области определяли из уравнения для высоковязких жидкостей в условиях низкого давления [11]:

$$\Delta P_{тр}^{\partial\phi} = \Delta P_{тр1} \cdot \left[1 + \Psi \cdot \left(\frac{W_0''}{W_0'} \right) \right], \quad (7)$$

где $\Delta P_{тр1}$ – потери давления в однофазном потоке, Па; Ψ – поправка на двухфазность, которую определяют по критериальному уравнению для высоковязких двухфазных течений и которая является функцией безразмерных определяющих параметров двухфазного течения.

Поправку Ψ рассчитывают согласно [11]:

$$\Psi = 91,6 \cdot Fr_0^{-0,26} \cdot Fr_{см}^{-0,43} \cdot \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{0,15} \cdot \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \right)^{-0,12} \cdot Re_1^{-0,08}, \quad (8)$$

где μ_1 , μ_2 – динамическая вязкость жидкостной и газовой фаз; ρ_1 , ρ_2 – плотность жидкостной и газовой фаз; критерий Фруда смеси $Fr_{см} = W_{см}/(g \cdot D)$; критерий Фруда $Fr_0 = W_0/(g \cdot D)$; критерий Рейнольдса для жидкости $Re_1 = (W_0' \cdot D)/\nu_1$; $W_{см}$, W_0 , W_0' – соответственно скорость двухфазной смеси, скорость циркуляции и приведенная скорость жидкости, D – диаметр трубы с двухфазным участком, g – ускорение свободного падения, ν_1 – кинематическая вязкость жидкости.

Математическая модель гидравлического расчета циркуляционного контура с насосом, когда в системе имеются лишь однофазные участки трубопровода, была построена на основе известных зависимостей для расчета суммарных потерь давления и расхода субстрата в контуре. Для решения проблемы неопределенности ТФС субстрата были применены ЭРМ [9].

Математическая модель для определения доли биогаза на выработку электрической энергии на привод нагнетателя биогаза и насоса включала в себя зависимости для расходов электрической мощности на привод нагнетателя биогаза и насоса и другие известные уравнения по [13, 14], что представлено ниже в табл. 1.

Результаты исследования

Для реализации математических моделей, использованных нами, рассмотрен конкретный пример с такими исходными данными: объем реактора $V_p = 10 \dots 1000 \text{ м}^3$; температура субстрата в реакторе $t_p = 35 \text{ }^\circ\text{C}$; температура окружающей среды $t_{ок.с} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$; температура греющей воды $t_g = 47 \text{ }^\circ\text{C}$; жидкость-субстрат с влажностью 92 %; для определения

коэффициента теплоотдачи к субстрату α_1 применены ЭРМ; коэффициент теплоотдачи к воздуху $\alpha_2=23$ Вт/(м²·К); коэффициент теплоотдачи к греющей воде определяли по известным методикам [8]; теплопроводность стали $\lambda_{ст}=45$ Вт/(м·К); теплопроводность изоляции $\lambda_{из}=0,035$ Вт/(м·К); толщина стенки реактора $\delta_{ст}=35$ мм; толщина изоляции $\delta_{из}=500$ мм.

Основные зависимости для оценки и сравнения энергоэффективности системы с нагнетателем биогаза с системой с насосом для субстрата приведены в таблице 1.

Таблица 1

Определение доли биогаза на выработку электрической энергии на организацию циркуляции в системе контуров БГУ

Показатели организации циркуляции № n/n	Нагнетатель биогаза в циркуляционной системе с теплообменником и эрлифтом	Насос для перекачки субстрата в циркуляционной системе с теплообменником
1.	$N_{нз} = \frac{Q'' \cdot P}{1000 \cdot \eta_{нз} \cdot \eta_{мех}}$	$N_{нс} = \frac{Q' \cdot P}{1000 \cdot \eta_{нс} \cdot \eta_{мех}}$
2.	$Q_{эл}^{нз} = N_{нз} \cdot 24$	$Q_{эл}^{нс} = N_{нс} \cdot 24$
3.	$Q_{те}^{нз} = (Q_{эл}^{нз} \cdot 3600) / \eta_{кэс}$	$Q_{те}^{нс} = (Q_{эл}^{нс} \cdot 3600) / \eta_{кэс}$
4.	$V_{бз}^{нз} = Q_{те}^{нз} / Q_n^p$	$V_{бз}^{нс} = Q_{те}^{нс} / Q_n^p$
5.	$\chi_{нз} = V_{бз}^{нз} / W$	$\chi_{нс} = V_{бз}^{нс} / W$
Пояснения к уравнениям	Q'' – объемный расход биогаза, м ³ /с; P – давление биогаза в надставке, Па; $\eta_{нз}$ – КПД нагнетателя ($\eta_{нз}=0,6\dots0,75$) [12], в расчетах принимали $\eta_{нз}=0,69$; $\eta_{мех}$ – механический КПД ($\eta_n=0,96$) [13]; $\eta_{кэс}=0,38$ – КПД конденсационной электрической станции $\eta_{кэс}$ [15]	Q' – объемный расход субстрата, м ³ /с; P – потери давления в контуре, Па; $\eta_{нс}$ – КПД насоса для субстрата ($\eta_{нс}=0,49\dots0,6$), в расчетах принимали $\eta_{нс}=0,55$) [14]; Q_n^p – низшая теплота сгорания биогаза, $Q_n^p=22000$ кДж/нм ³

Показатели организации циркуляции, приведенные в табл. 1 (п. 1 – 5), для системы с нагнетателем биогаза, теплообменником и эрлифтом и для системы с насосом для перекачки субстрата такие:

- 1) мощность на валу нагнетателя, кВт;
- 2) расход электроэнергии на электродвигатель в сутки, кВт·ч;
- 3) необходимое количество тепловой энергии на суточную выработку электрической энергии согласно п. 2 на конденсационной станции, кДж;
- 4) расход биогаза в сутки на получение теплоты $Q_{те}^{нз}$ и $Q_{те}^{нс}$, нм³;
- 5) доля биогаза от количества производимого биогаза на БГУ, которая расходуется на электрическую мощность соответственно для нагнетателя биогаза и на насос для перекачки субстрата.

В результате применения вышеописанных в основной части математических моделей были определены:

- тепловые потери с биореактора в окружающую среду в зависимости от его объема $Q_n = 384\dots10624$ Вт;
- необходимое количество циркуляционных контуров в зависимости от объема реактора с аппаратами-модулями $n_k=1\dots14$;
- основные конструктивные параметры теплообменного аппарата-модуля: диаметр

труб в теплообменнике $d_{mo}=50$ мм; длина труб $L_{mp}=1700$ мм; диаметр надставки $D_n=120$ мм; диаметр подающей линии $d_1=106$ мм; диаметр обратного трубопровода $d_2=106$ мм; длина прямого трубопровода $l_2=1700$ мм; длина обратного трубопровода $l_2=2000$ мм; высота надставки $L_n=350$ мм;

- электрическую мощность нагнетателя биогаза $N_{nc}=4,69...65,7$ Вт; электрическую мощность электродвигателя центробежного насоса $N_{nc}=6,9 ... 96$ Вт;
- доля производимого биогаза, которая идёт на выработку электроэнергии для электродвигателя нагнетателя биогаза при $w = 1$ м³ в сутки $\chi=0,6 ... 0,09\%$; доля биогаза, затраченная на выработку электроэнергии для электродвигателя нагнетателя биогаза при $w=2,5$ м³ в сутки $\chi=0,24...0,03\%$; доля биогаза, затраченная на выработку электроэнергии для электродвигателя насоса при $w=1$ м³ в сутки $\chi=0,9...0,12\%$; доля биогаза, затраченная на выработку электроэнергии для электродвигателя насоса при $w=2,5$ м³ в сутки $\chi = 0,36 ... 0,05\%$.

Зависимость доли биогаза на выработку электрической энергии χ от объема биореактора V_p графически представлена в виде (рис. 2):

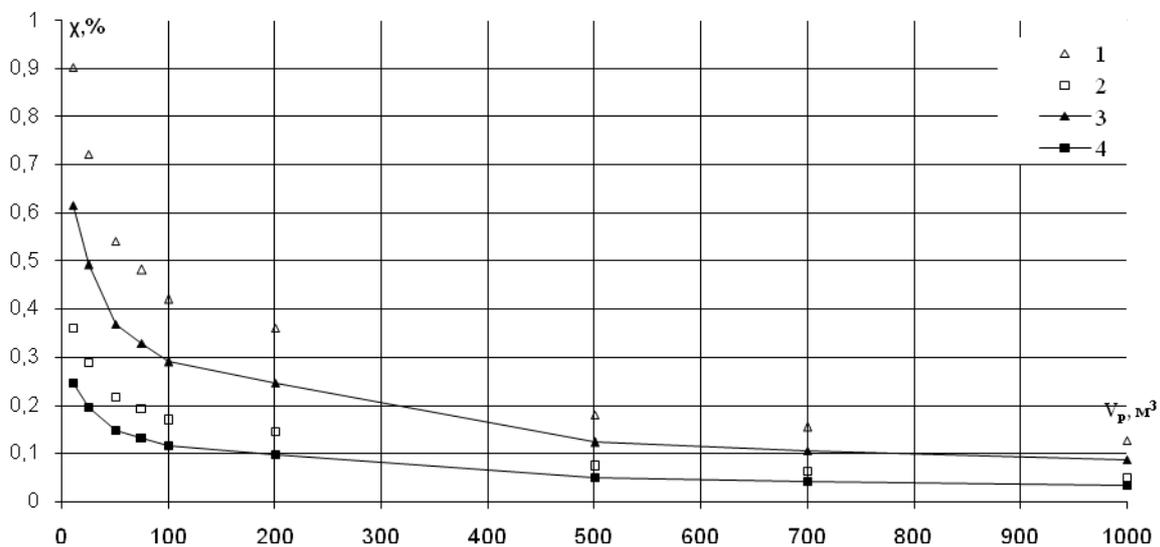


Рис. 2. 1 – нагнетатель биогаза при $w=1$ м³ в сутки; 2 – нагнетатель биогаза при $w=2,5$ м³ в сутки; 3 – насос при $w=1$ м³ в сутки; 4 – насос при $w=2,5$ м³ в сутки

В результате анализа рис. 2 при сравнении эрлифтной системы и системы с насосом установлено, что доля биогаза в случае применения нагнетателя биогаза будет меньше, чем при использовании контура с насосом в 1,5 ... 1,4 раза. В плане энергопотребления эрлифтная система более экономична, кроме того, она учитывает микробиологические особенности анаэробного процесса, а именно: ограничения по скорости движения субстрата ($W_c \leq 0,6$ м/с), что способствует увеличению выхода биогаза.

Нагнетатель биогаза можно устанавливать один на все циркуляционные контуры БГУ. А в случае применения системы с насосом для субстрата его необходимо устанавливать в каждом циркуляционном контуре. Небольшие нагнетатели для таких абразивных смесей, как субстрат имеют низкий КПД, а нагнетатели биогаза имеют более высокий КПД [13, 14].

Также преимуществом системы контуров с эрлифтной надставкой и нагнетателем биогаза является отсутствие контакта подвижных элементов оборудования с субстратом, в отличие от насоса. Перекачивание субстрата в случае применения системы с насосом приводит к быстрому износу его элементов.

Выводы

Предложена система с эрлифтным методом организации циркуляции, которая объединяет процессы термостабилизации и перемешивания в реакторе БГУ и позволяет учесть микробиологические особенности процесса. Данная система сопоставлена с системой с теплообменником и насосом.

Для анализа энергопотребления двух систем применены математические модели, с помощью которых определяют: теплотери в биореакторе; интенсивность теплообмена в сложных смесях с неопределенными реологическими и теплофизическими свойствами; характеристики двухфазных течений сложная смесь + биогаз; количество теплообменных аппаратов-модулей; электрическую мощность электродвигателей нагнетателя биогаза и насосов для перекачки субстрата; долю биогаза на выработку электрической энергии для нагнетателя биогаза и для насосов в циркуляционном контуре.

В результате исследования установлено, что расходы электрической энергии для системы с нагнетателем биогаза на 40 – 50% меньше, чем для системы с насосами. Кроме того, установлены следующие преимущества эрлифтной системы организации циркуляции:

- 1) возможность учета ограничений скоростей субстрата на всех участках контура ($W_c \leq 0,6$ м/с) путём регулирования подачи биогаза в надставку;
- 2) отсутствие прямого контакта подвижных элементов нагнетателя биогаза с субстратом;
- 3) возможность установки одного нагнетателя биогаза на все циркуляционные контуры биореактора.

Результаты исследований рекомендованы к дальнейшему технико-экономическому анализу с целью внедрения вертикальных циркуляционных контуров с эрлифтным методом организации циркуляции в практику создания энергоэффективных природосохраняющих БГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткаченко С. Й. Наземні біогазові установки / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна, Т. Ю. Румянцева // Науково-технічний збірник "Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві". – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2010. – № 2. – С. 147 – 152.
2. Баадер Б. Биогаз: Теория и практика / Б. Баадер, Е. Доне, М. Брендерфер. – М. : Колос, 1989. – 450 с.
3. Семенов И. В. Проектирование биогазовых установок / И. В. Семенов. – К. : Техника, 1992. – 346 с.
4. Никитин Г. А. Метановое брожение в биотехнологии. Учебное пособие / Г. А. Никитин. – К. : Вища школа, 1990. – 207 с.
5. Ткаченко С. Й. Самозакипаючі потоки в дренажних каналах теплотехнологічних систем. Монографія / С. Й. Ткаченко, Н. Д. Степанова. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 160 с.
6. Ткаченко С. Й. Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки. Монографія / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов. – В. : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 132 с. ISBN 996-641-107-5.
7. Канивец Г. Е. Обобщенные методы расчета теплообменников / Г. Е. Канивец. – К. : Наукова думка, 1970. – 352 с.
8. Бакластов А. М. Промышленные тепломасообменные процессы и установки / А. М. Бакластов, В. А. Горбенко, О. Л. Данилов. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 328 с.
9. Ткаченко С. Й. Застосування поняття «модельна рідина» в експериментально-розрахунковому методі / С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 3. – С. 103 – 110. – ISSN 1997-9266.
10. Балдина О. М. Гидравлический расчёт котельных агрегатов (нормативный метод) / О. М. Балдина, А. В. Локшин, Д. Ф. Петерсон. – М. : "Энергия", 1978. – 256 с.
11. Ткаченко С. Й. Обобщённые методы расчёта теплогидродинамических процессов и применение их для оптимизации выпарных установок : автореф. дис. докт. техн. наук.: 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика». / С. Й. Ткаченко. – Москва, 1988. – 39 с.
12. Ткаченко С. Й. Застосування рівняння енергії для визначення втрат на тертя у вертикальному високов'язкому двофазному потоці / С. Й. Ткаченко, Н. Д. Степанова О. Ю. Бочкова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХП». – 2016. – № 10 (1182). – С. 50 – 55. – ISSN 2078-774X.

13. Калинушкин М. П. Насосы и вентиляторы: Учеб. пособие для вузов / М. П. Калинушкин. – [6-е изд.]. – М. : Высшая школа, 1987. – 176 с.
14. Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры: Учебник для теплоэнергетических специальностей для вузов / В. М. Черкасский. – [2-е изд.]. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 412 с.
15. Безродний М. К. Енергетична ефективність теплонасосних схем постачання. Монографія / М. К. Безродний, Н. О. Притула. – К. : НТУУ КПІ, 2012. – 208 с.

Ткаченко Станислав Йосифович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетики, e-mail: Stahit@mail.ru.

Степанова Наталия Дмитриевна – к. т. н., доцент, доцент кафедры теплоэнергетики, e-mail: Stepanovand@mail.ru.

Бочкова Ольга Юрьевна – аспирант кафедры теплоэнергетики, e-mail: Olichkab888@gmail.com.
Винницкий национальный технический университет.