

УДК 662.763.3.2

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
ЩОДО ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСІВ АНАЕРОБНОГО ЗБРОДЖУННЯ
В РЕАКТОРАХ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК**

С. А. Шворов, доктор технічних наук, професор

Є. О. Антипов, кандидат технічних наук, старший викладач

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: ievgeniy_antypov@ukr.net

Анотація. *Енергія біомаси один з найбільш динамічно розвиваючих напрямків відновлюваної енергетики. Особливо актуально її використання в децентралізованих системах енергопостачання, де в достатній кількості є відходи сільськогосподарського виробництва. В даній роботі розглянуто проблему термічної та біотехнологічної стабілізації в реакторах біогазової установки. Запропоновано методику оптимізації параметрів системи термостабілізації метантенка біогазових установок. Проведено аналіз умов, що впливають на інтенсифікацію процесу метанового зброджування. Визначено ступінь впливу на ефективність виробництва біогазу та його теплової цінності температурного режиму метантенка. Розглянуто основні поняття та означення стосовно цієї проблематики.*

Ключові слова: *біогаз, субстрат, метантенк, температурний режим, енергозберігаюча технологія.*

Актуальність. У будь-якому біотехнологічному процесі основну роль грає біологічний агент - мікроорганізми, його природа і фізіолого-технологічні властивості. При цьому, дуже важливим фактором ефективного протікання процесу ферментації є температура маси, що зброджується. Метанова ферментація починається при температурі 6 °С. При більш низькій температурі виділення метану припиняється. Одночасно із ростом температури швидко збільшується виділення газу. Так, при температурі 30 °С виділення біогазу відбувається в 12 разів швидше, ніж при температурі 10 °С. Розрізняють чотири основних рівня характерних температур, при яких може виникати метанове бродіння в реакторах біогазової установки (БГУ): психрофільний режим

12...20 °С; мезофільний - 32...35 °С; термотолерантний - 39...42 °С; термофільний - 52...54 °С. У випадку переходу з одного рівня температур до іншого, відбувається зміна класу бактерій. В цей період спостерігається зменшення продуктивності установки по біогазу оскільки, температура впливає на кількість газу, що можна отримати за визначений проміжок часу, на технологічний час ферментації, а також на склад і якість біогазу та отримуваних добрив. Не дивлячись на те, що процес розкладання целюлози в термофільних умовах проходить в 14 разів інтенсивніше, ніж у мезофільних, а кількість біогазу, що отримується, на 25-30 % вище в термофільних умовах, термофільні процеси мають меншу стабільність, ніж мезофільні, а допустимі коливання температури значно знижуються. Для стабільного розвитку і життєдіяльності бактерій, відхилення температури в реакторі БГУ від номінальної повинно не перевищувати 2,8 °С. Термостабілізація реактора БГУ забезпечується різними теплообмінними пристроями та відповідною теплоізоляцією, а самі метантенки повинні мати мінімальну площу поверхні або підземне чи напівпідземне розташування [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження виходу біогазу при зброджуванні соломи з додаванням гною ВРХ проводились проф. Шворовим С.А. і доц. Поліщуком В.М. в межах ініціативної науково-дослідної роботи «Обґрунтувати параметри субстрату для підвищення ефективності біогазових технологій» (ДР №0116U008083) та науково-дослідної роботи «Розроблення інноваційних вискоефективних технологій збирання та переробки енергетичних культур для біогазових установок» (ДР № 0117U001254) на замовлення керівництва біогазового заводу (група компаній «Сільгосппродукт») у с. Рокитне Київської області, яке планує реалізувати технологію приготування та застосування органічних добрив з БГУ запланованої потужності 2,38 МВт.

Мета дослідження – підвищення ефективності процесів анаеробного зброджування шляхом переходу з термотолерантного температура-турного режиму

роботи реактора на термофільний за рахунок використання надлишкової теплової енергії когенераційної установки в літній період.

Матеріали і методи дослідження. Ефективність виробництва біогазу визначалась залежно від типу сировини, наявності ко-субстратів, температурного режиму біогазової установки, наявності або відсутності перемішування субстрату. Експериментальні дослідження проводились паралельно на двох біогазових установках в навчально-науковій лабораторії біоконверсій в АПК Національного університету біоресурсів і природокористування України. До складу біогазової установки входить метантенк об'ємом 30 л, який містить мішалку і нагрівальний пристрій, і газгольдер [1].

Вплив температурного режиму. Ступінь впливу температурного режиму метантенка на ефективність виробництва біогазу досліджувалася на прикладі метанового зброджування гною ВРХ вологістю 93,4 % при температурах 55, 50, 45 і 40 °С. Результати дослідження представлені на рис. 1, з якого видно, що при збільшенні температури метантенка вихід біогазу збільшується. Так, середній вихід біогазу при температурі 55 °С становить 7103 см³/добу, при 50 °С - 5226 см³/добу, при 45 °С - 4893 см³/добу, при 40 °С - 2041 см³/добу [1].

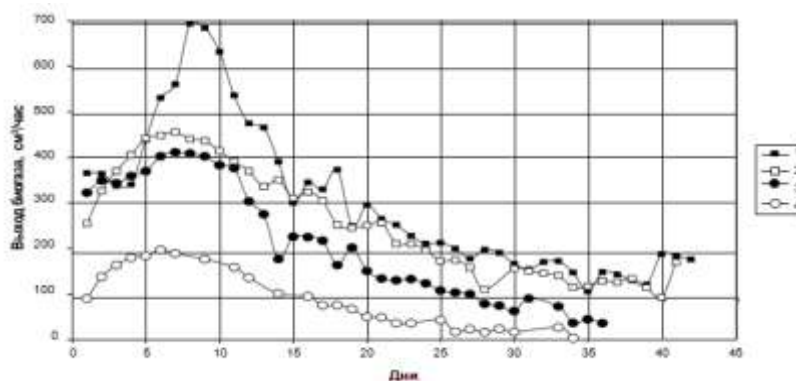


Рис. 1. Вихід біогазу при метановому зброджуванні гноївки ВРХ вологістю 93 % при різних температурних режимах:
1 – t = 55 °С; 2 – t = 50 °С; 3 – t = 45 °С; 4 - t = 40 °С [1]

Аналіз даних [2] випробувань показує, що час нагрівання субстрату до температури 35 °С становить - 46 годин, а до температури 54 °С - 68 години.

Добова витрата твердого палива (кізяка) становить - 31 кг/добу, ККД паливного котла - 78,5 %. Продуктивність по гною становить 0,5 - 0,7 т/добу., По біогазу - 6,5 ... 11,5 м³/добу. Вихід біогазу в мезофільному режимі становить 6,5 м³/добу., в термофільному - 11,5 м³/добу (рисунок 2).

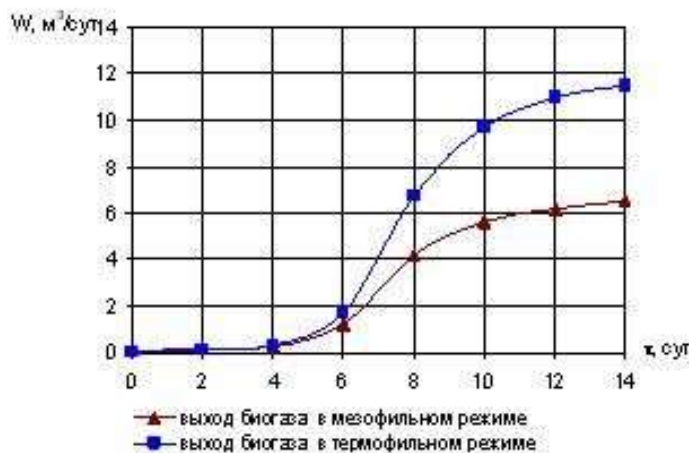


Рис. 2. Вихід біогазу в мезофільному і термофільному режимах [2]

У підсумку, на основі аналізу даних робіт [1, 2] вихід біогазу при переході на термофільний режим ферментації, при тому ж об'ємі реактора, збільшиться щонайменше в 1,5 - 2 рази, що додатково призведе до зниження вартості 1 кВт встановленої потужності, з чого випливає, що якщо головною метою зброджування відходів є отримання біогазу, більш раціональним є термофільний режим.

Вплив ефективності теплоізоляції. Дослідження впливу нестабільності температурного режиму реактора, яка викликана зміною температури навколишнього повітря, на біотехнологічний процес, проводились на прикладі БГУ з середньою в часі температурою в реакторі $T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (відхилення в межах $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), що відповідає мезофільному режиму його роботи [3]. Результати таких досліджень представлені на рисунку 3.

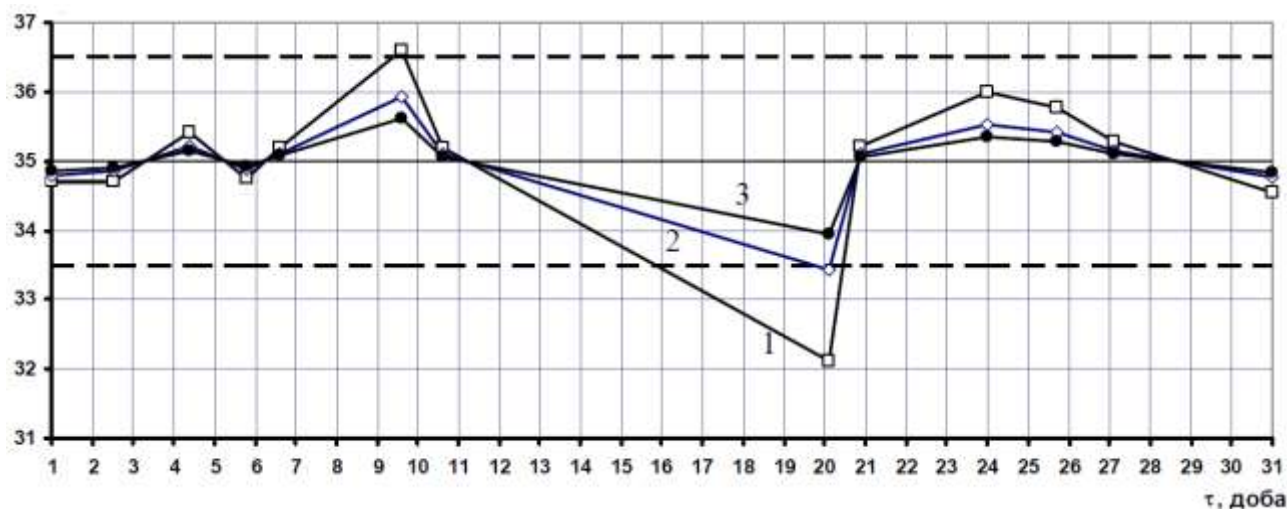


Рис. 3. Зміна температури субстрату в реакторі протягом всього періоду (грудень):

1 – $R_{із} = 1 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$; $\delta_{із} = 0,05 \text{ м}$; 2 – $R_{із} = 2 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$; $\delta_{із} = 0,1 \text{ м}$; 3 – $R_{із} = 3 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$; $\delta_{із} = 0,15 \text{ м}$ [3]

Із рис. 3 видно, що найбільш ефективною для термостабілізації слід приймати ізоляцію, термічний опір якої знаходиться в межах $R_{із} = 2 \dots 3 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$ [3].

Вищий рівень термічної стабільності реактора забезпечується при стабілізації не тільки середньої температури субстрату в реакторі, а і температури внутрішньої стінки реактора $t_{ст}^{BH}$. Тобто необхідне одночасне дотримання двох умов: $-1,5 \leq \Delta T \leq 1,5$; $-1,5 \leq t_{ст}^{BH} \leq 1,5$. Проведені числові дослідження показали, що у випадку роботи БГУ в одному температурному режимі при застосуванні рекомендованої ізоляції, температура внутрішньої стінки реактора виходить за межі $-1,5 \leq t_{ст}^{BH} \leq 1,5$ протягом перехідного періоду року [3]. Тому, з метою забезпечення повної термічної стабільності, пропонується в теплий період року змінювати тепловий режим роботи БГУ з мезофільного ($T = 32 \dots 35 \text{ }^\circ\text{C}$) чи термотолерантного ($T = 39 \dots 42 \text{ }^\circ\text{C}$) на термофільний ($T = 52 \dots 54 \text{ }^\circ\text{C}$) або, за умови збільшення товщини шару ізоляційного покриття, перейти на постійне його використання. Енергетична можливість та доцільність такого переходу описана нижче.

Результати дослідження та їх обговорення. Одним із шляхів підвищення енергоефективності роботи БГУ є зменшення затрат енергоносіїв на забезпечення її технологічних процесів. Відповідно до запропонованої конструктивно-технологічної схеми енергоощадної біогазової установки затрати енергії на термостабілізацію анаеробного бродіння біомаси та на покриття тепловтрат можуть бути відшкодовані надлишковою тепловою енергією когенераційної установки в літній період.

Для визначення тепловтрат діючої біогазової установки по місяцях при розрахунку обрано такі вихідні дані:

- біогазова установка постійної дії з термотолерантним режимом роботи (39...42 °С) об'ємом 4х3600 м³, розмір кожного реактору якої: висота 8 м; діаметр 24 м, які ізольовані мінеральною ватою шаром 100 мм, при цьому термічний опір стінки складає 2,38 (м²·К)/Вт [4];

- біомаса займає 85 % всього об'єму реактора;

- параметри вхідної сировини: жом цукрового буряку – 160 т/добу вологістю 75 %, курячий послід – 40 т/добу вологістю 75 %;

- розрахункові температури нової порції біомаси в теплий та холодний період року відповідає температурі навколишнього середовища;

- потужність когенераційної установки (КГУ) по виробництву теплової енергії – 2378 кВт·год.

За методикою [5] виконано числове моделювання затрат енергоносіїв на забезпечення технологічного процесу запропонованою схемою енергоощадної біогазової установки (див. табл. 1).

Приймаючи до уваги те, що всі чотири реактори замовника, загальний об'єм біомаси в яких 14445,3 м³, працюють в термотолерантному режимі, а також циклічність завантаження реакторів 2х100 т/добу з інтервалом у 12 годин, теплова потужність установки для підтримання та прогріву нової порції біомаси за 1 годину, становитиме:

1. У холодну пору року (при середній температурі зовнішнього повітря -5°C) [6]: для термотолерантного режиму роботи (40°C) – 6,5 МВт·год., термофільного (53°C) – 8,38 МВт·год.

2. В літній період року (при середній температурі зовнішнього повітря $+17^{\circ}\text{C}$) [6]: для термотолерантного режиму роботи – 3,32 МВт·год., термофільного – 5,2 МВт·год.

1. Питомі затрати енергоносіїв на забезпечення технологічних процесів біогазової установки

Параметри	Холодний період, кВт·год./м ² (м ³)	Теплий період року, кВт·год./м ² (м ³)	Річні, кВт·год./м ² (м ³)
Мезофільний режим			
Тепловтрати через поверхню резервуара	101,38	45,62	147,00
Втрати на підігрів нової порції біомаси	56,77	25,55	82,32
Термотолерантний режим			
Тепловтрати через поверхню резервуара	114,05	58,29	172,34
Втрати на підігрів нової порції біомаси	63,87	32,64	96,51
Термофільний режим			
Тепловтрати через поверхню резервуара	147,00	91,24	238,24
Втрати на підігрів нової порції біомаси	82,33	51,10	133,43

Споживана енергія для розігрівання реактора протягом 12 годин, за всіх інших рівних умов, при його роботі в термофільному режимі повинна становити: у першому варіанті 0,83 МВт·год., у другому 0,52 МВт·год.

Враховуючи різницю у споживаній тепловій потужності першого та другого варіантів, а також номінальну теплову потужність когенераційної установки, час роботи останньої, при роботі реакторів БГУ в термофільному режимі, повинен становити (за умови прогріву нової порції біомаси):

- за 1 годину - як у першому, так і у другому варіанті – по 0,8 годин;
- за 12 годин: 0,35 години у першому варіанті, та 0,22 години – у другому.

Тобто, номінальна теплова потужність когенераційної установки достатня для забезпечення покриття теплового навантаження та здійснення переходу роботи реакторів БГУ з термотолерантного до термофільного режиму навіть у холодний період року. Такий крок не потребує значних капіталовкладень, а економічний ефект від його здійснення призведе до збільшення виходу біогазу, щонайменше в 1,5 - 2 рази, а звідси, і до зниження вартості 1 кВт встановленої потужності.

Разом з тим, попередні розрахунки показують, що додаткове збільшення товщини шару теплової ізоляції на 50 мм сприяє зниженню теплових втрат через поверхню резервуара на 15...20 %, що в свою чергу призводить до додаткового скорочення споживання енергії, яке, на прикладі мезофільного режиму роботи, становить 3,6 % або 21 кВт·год./м³. Термін окупності заходу - менше 6-ти місяців.

У підсумку, аналіз отриманих результатів свідчить, що затрати енергії на інтенсифікацію процесів анаеробного бродіння біомаси для кліматичних умов Київської області можуть досягати до 250 кВт·год/рік на 1 м³ установки для мезофільного режиму та майже 400 кВт·год/рік на 1 м³ - для термофільного режиму роботи БГУ. Ці затрати можуть бути компенсовані за рахунок використання надлишкової теплової енергії КГУ відповідно до запропонованої енергоощадної схеми БГУ і конструкції реактора з покращеною теплоізоляцією.

Висновки і перспективи:

1. Збільшення температурного режиму метанового зброджування веде до збільшення виходу біогазу, однак при цьому також і збільшуються витрати на підігрівання субстрату.

2. При переході влітку і восени на термофільний режим ферментації, при тому ж обсязі метантенка, вихід біогазу збільшиться щонайменше в 1,5 - 2 рази, що додатково веде до зниження вартості 1 кВт встановленої потужності.

3. Визначено, що при організації термостабілізації температурного режиму

роботи реактора БГУ ($T = 32...35$ °С) з дотриманням необхідної умови - $1,5 \leq \Delta T \leq 1,5$, найбільш ефективною для всіх періодів буде ізоляція з термічним опором із $R_{із} = 2...3$ ($m^2 \cdot K$)/Вт.

4. Споживана енергія для розігрівання реактора протягом 12 годин, за всіх інших рівних умов, при його роботі в термофільному режимі повинна становити: у зимовий період 0,83 МВт·год., у літній - 0,52 МВт·год.

5. Встановлено, що збільшення товщини шару теплової ізоляції на 50 мм сприяє зниженню теплових втрат через поверхню резервуара на 15...20 %, що в свою чергу призводить до скорочення споживання енергії, яке, на прикладі мезофільного режиму роботи, становить 3,6 % або 21 кВт·год./ m^3 . Термін окупності заходу - менше 6-ти місяців.

6. Розраховано час роботи когенераційної установки, який повинен становити (за умови прогріву нової порції біомаси): за 1 годину - як у першому, так і у другому варіанті – по 0,8 годин; за 12 годин: 0,35 години у першому варіанті, та 0,22 години – у другому.

7. Показано, що номінальна теплова потужність когенераційної установки достатня для забезпечення покриття теплового навантаження та здійснення переходу роботи реакторів БГУ з термотолерантного до термофільного режиму навіть у холодний період року.

8. Знайдено, що затрати енергії на інтенсифікацію процесів анаеробного бродіння біомаси для кліматичних умов Київської області можуть досягати до 250 кВт·год/рік на 1 m^3 установки для мезофільного режиму та майже 400 кВт·год/рік на 1 m^3 - для термофільного режиму роботи БГУ.

Список літератури

1. Поліщук В.М. Вплив режимів метанового бродіння на ефективність виробництва біогазу / В.М. Поліщук, М.М. Лободко, О.В. Сидорчук, О.В. Поліщук // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування: Зб. наук. праць. - Київ, 2013. - № 185. Ч. 3. - С. 180-191.

2. Результаты испытаний биогазовой установки в фермерском хозяйстве [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.rusnauka.com/6_PNI_2011/Agricole/2_79078.doc.htm.

3. Ткаченко С.Й. Термічна і біотехнологічна нестабільність в реакторі анаеробної переробки відходів / С.Й. Ткаченко, В.І. Риндюк, Н.В. Пішеніна, С.В. Риндюк, Н.В. Дишлюк // Вісник Вінницького національного аграрного університету: Зб. наук. праць. - Вінниця, 2011 - № 7. - С. 131-137.

4. Радько І. П. Методика та обладнання для проведення енергетичного аудиту: [Електронний ресурс] / І. П. Радько, В. А. Наливайко, О. В. Окушко, А. В. Міщенко, Є. О. Антипов // Енергетика та автоматика. – 2018. – № 1. – С. 123–134. – Режим доступу: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/viewFile/10596/9329>.

5. Ратушняк Г.С. Біогазові установки з відновлюваними джерелами енергії термостабілізації процесу ферментації біомаси / Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк, І. А. Кощєєв. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 110 с.

6. Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Ізмаїловича Срезневського: Кліматичні дані по м. Києву [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.cgo.kiev.ua/index.php?fn=k_klimat&f=kyiv&p=1

References

5. Polishchuk, V. M., Lobodko, M. M., Sydoruk, O. V., Polishchuk, O. V. (2013). Vplyv rezhymiv metanovoho brodinnya na efektyvnist' vyrobnytstva biohazu [Influence of methane fermentation regimes on biogas production efficiency]. Scientific herald of the NULES of Ukraine, 185 (3), 180–191.

6. Results of tests of a biogas plant in a farm. Available at : http://www.rusnauka.com/6_PNI_2011/Agricole/2_79078.doc.htm.

7. Tkachenko, S.Y., Ryndyuk, V.I., Pishenina, N.V., Ryndyuk, S.V., Dyshlyuk, N.V. (2011). Termichna i biotekhnolohichna nestabil'nist' v reaktori anaerobnoyi pererobky vidkhodiv [Thermal and biotechnological instability in the anaerobic waste recycling reactor]. Visnyk of the VNAU, 7, 131–137.

8. Radko, I. P., Nalyvayko, V. A., Okushko, O. V., Mishchenko, A. V., Antypov, I. O. (2018). Metodyka ta obladnannya dlya provedennya enerhetychnoho audytu [Methodology and equipment for energy auditing]. Power engineering and automation, 1, 123–134. – Available at : <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/viewFile/10596/9329>.

9. Ratushnyak, H. S., Lyalyuk, O. H., Koshcheyev, I. A. (2017). Biohazovi ustanovky z vidnovlyuvanymy dzherelamy enerhiyi termostabilizatsiyi protsesu fermentatsiyi biomasy [Biogas plants with renewable energy sources for thermal stabilization of biomass fermentation process]. Vinnytsya: VNTU, 110.

10. Central geophysical observatory named after Boris Izmailovich Sreznevsky: Climatic data on the city of Kyiv. – Available at : http://www.cgo.kiev.ua/index.php?fn=k_klimat&f=kyiv&p=1

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА АНАЭРОБНОГО
БРОЖЕНИЯ**

В РЕАКТОРАХ БИОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК

С. А. Шворов, Е. А. Антипов

Аннотация. Энергия биомассы один из самых динамично развивающихся направлений возобновляемой энергетики. Особенно актуально его использование в децентрализованных системах энергоснабжения, где в достаточном количестве есть отходы сельскохозяйственного производства. В данной работе рассмотрена проблема термической и биотехнологической стабилизации в реакторах биогазовой установки. Предложена методика оптимизации параметров системы термостабилизации метантенка биогазовых установок. Проведен анализ условий, влияющих на интенсификацию процесса метанового сбраживания. Определена степень влияния на эффективность производства биогаза и его тепловую ценность температурного режима метантенка. Рассмотрены основные понятия и определения по этой проблематике.

Ключевые слова: биогаз, субстрат, метантенк, температурный режим, энергосберегающая технология

**SCIENTIFIC AND TECHNICAL RECOMMENDATIONS
ON INTENSIFICATION OF THE ANAEROBIC FROG PROCESS
IN REACTORS OF BIOGAS PLANTS**

S. Shvorum, I. Antypov

Abstract. Biomass energy is one of the most dynamically developing areas of renewable energy. Particularly relevant is its use in decentralized energy supply systems, where there is a sufficient amount of agricultural waste. In this paper, the problem of thermal and biotechnological stabilization in biogas plant reactors is considered. A technique for optimizing the parameters of the system for the thermostabilization of biogas plants is presented. The analysis of the conditions influencing the intensification of the process of methane fermentation is carried out. The degree of influence on the production efficiency of biogas and its thermal value of the temperature regime of the methane is determined. The basic concepts and definitions on this problem are considered.

Key words: biogas, substrate, methane tank, temperature regime, energy saving technology