

УДК 620.92+502.174.1(075.8)

## БЛОЧНО-МОДУЛЬНАЯ БИОГАЗГЕНЕРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОТХОДОВ ПЛОДОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ

Стручаев Н.И., к.т.н., <https://orcid.org/0000-0002-8891-4960>  
Караев А.И., д.т.н., <https://orcid.org/0000-0001-5134-1727>  
Бондаренко Л.Ю., к.т.н. <https://orcid.org/0000-0001-5858-7375>

*Таврический государственный агротехнологический университет  
имени Дмитрия Моторного*  
e-mail: [usun105@gmail.com](mailto:usun105@gmail.com)

**Аннотация** - статья посвящена повышению эффективности использования отходов плодовой древесины, путем создания блочно-модульной биогазгенераторной установки. Предложена схема расположения элементов блочно-модульной биогазгенераторной установки для отходов плодовой древесины и методика расчета компактных теплоизолированных ёмкостей для биогазгенератора на примере уменьшения потерь энергии в процессе его выработки, находящегося в циклическом процессе. Получены графические зависимости производительности по биогазу от времени в ёмкости реактора сложной формы. Определено время оптимальной продолжительности одного цикла при различном расположении элементов.

**Ключевые слова** - энергосбережение, отходы плодовой древесины, потери энергии, компактные ёмкости сложной формы, блочно-модульная биогазгенераторная установка.

*Постановка проблемы.* Интеграция в мировое сообщество, рост уровня сельскохозяйственного производства, перепроизводство по отдельным позициям и рост конкуренции способствует тому, что украинские производители начинают выходить на европейские рынки сбыта продукции. А для этого нужно, чтобы производимая продукция была сертифицирована. Сертификация GlobalG.A.P. [1] является именно тем инструментом, который на основании отслеживания технологии производства позволяет подтвердить или опровергнуть вывод о безопасности продукции.

Выращивание продукции садоводства осуществляется с оценкой возможных рисков и в пределах четко установленных технологических и экологических требований.

Исходя из этого, стандартом GlobalG.A.P. разработаны контрольные пункты, охватывающие весь процесс выращивания, переработки, хранения и использования побочной продукции садоводства. Побочная продукция садоводства, а именно древесная биомасса срезанных ветвей, относится к восстанавливаемым ресурсам, поэтому может быть использована для энергетических нужд Украины.

В условиях экономии энергоресурсов и повышения экологической безопасности, использование биомассы, полученной от обрезки и удаления многолетних насаждений, для нужд энергетики в настоящее время является весьма актуальной проблемой [2].

*Анализ последних исследований.* В Европейском Союзе использование биомассы, полученной от обрезки и удаления многолетних насаждений, для нужд энергетики является относительно новым направлением [3], который сейчас активно исследуется и развивается.

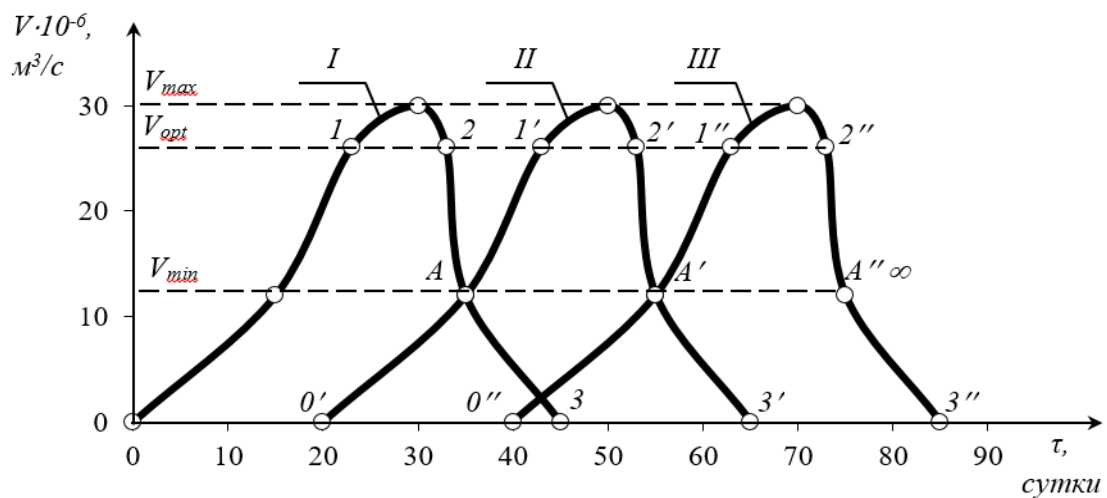
Наиболее распространенными методами использования побочной продукции садоводства, а именно древесной биомассы срезанных ветвей являются: получение удобрений из щепы срезанных ветвей плодовых деревьев [4], получение биогаза и биометана из срезанных ветвей плодовых деревьев [5,6] и использование энергопродукта из плодовой древесины в качестве биотоплива в топках [7]. Есть возможность повысить эффективность использования древесной биомассы срезанных ветвей химической обработкой и замораживанием [8,9]. Поэтому поиск путей повышения эффективности ее использования играет важную роль, поскольку позволяет в течение длительного времени снижать потери ценного энергетического сырья.

*Постановка задачи.* Целью исследования является установление возможности повышения энергоэффективности и стабильности выработки биогаза, а так же определение оптимального расположения реакторов при блочно-модульном использовании биогазгенераторов.

*Основная часть.* Минимизация энергетических ресурсов в производственных сельскохозяйственных системах стимулирует интерес к исследованию возобновляемых источников энергии. Во всем мире ведутся исследования по использованию отходов растениеводства и животноводства для производства биогаза. Широкое распространение биогаз генераторы получили в Китае [6]. Однако, при использовании в хозяйствах единичных установок трудно добиться стабильности выработки биогаза. Существенно улучшить процесс возможно путем использования блочно-модульных схем подключения биогазгенераторов. Для этого необходимо решить

следующие задачи: разработать методику расчета и парадигму производительности реактора; определить время оптимальной продолжительности одного цикла.

Методика исследования основана на модифицированном методе изучения процесса биогаза. При блочно-модульном использовании биогазгенераторов для обеспечения равномерности расхода биогаза в сетевой магистрали важно знать продолжительность цикла работы каждого реактора. (рис. 1).



I, II, III – первый, второй и третий биогазгенераторы;  
 0-1 – выход биогазгенератора на рабочий режим;  
 1-2 – реакция с максимальным выходом биогаза;  
 2-3 – завершение реакции.

Рис. 1. Диаграмма выработки биогаза при блочно-модульном использовании реакторов.

Из рисунка 1 следует, что для стабильной подачи биогаза в систему ( $V_{opt}$ ) необходимо чтобы участки циклов 2-3 (завершение реакции) были перекрыты участками 0-1 (выхода биогазгенератора на рабочий режим), что требует решения задачи по оптимизации продолжительности работы реактора.

В качестве целевой функции [10] можно принять производительность реактора, которую необходимо максимизировать:

$$\varphi = \frac{G(t)}{\tau} = G_{\tau}(t) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $\varphi$  - целевая функция;

$G(t)$  - выход готовой продукции, кг;

$\tau$  - время от начала цикла, сутки;

$G_{\tau}(t) = \frac{G(t)}{\tau}$  - средняя производительность реактора, кг/сутки.

Для решения задачи оптимизации графически изобразим процесс выхода биогаза (рис.1) для биогазгенератора с составом сырья, приведенным в [6] используя теплофизические расчеты [11,12].

Первый этап (I) включает выгрузку шлама, очистку и подготовку реактора к работе, загрузку новой порции сырья и доведения параметров до выхода на рабочий режим.

Второй этап (II) – оптимальный режим, который определен участком прямой 1-2 (рис. 1), включает протекание реакции до достижения  $\max$  и некоторое локальное падение.

Третий этап (III) отображает стабильное снижение выработки биогаза, что свидетельствует о необходимости перехода к первому этапу. Оптимальному моменту времени ( $\tau_{\text{opt}}$ ) окончания второго этапа и переход к третьему соответствует такая скорость реакции, при которой производительность реактора снижается настолько, что дальнейшее его функционирование приводит к снижению производительности  $G_{\tau}(t)$ .

Момент окончания цикла, соответствует точке А (рис. 1) и является критерием оптимизации.

Оптимальный момент окончания цикла можно определить из условия:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\left(\frac{G(t)}{\tau}\right)}{d\tau} \rightarrow 0. \quad (2)$$

Зависимость выхода готовой продукции от времени  $\tau$  получаем путем реализации [10] многофакторного эксперимента  $n^3$ , результаты которого аппроксимируем полиномом вида:

$$G(t) = b_0 + b_1 \cdot \tau + b_2 \cdot \tau^2 \quad (3)$$

где  $\tau$  – полное время цикла, сутки:

$$\tau = t - t_1.$$

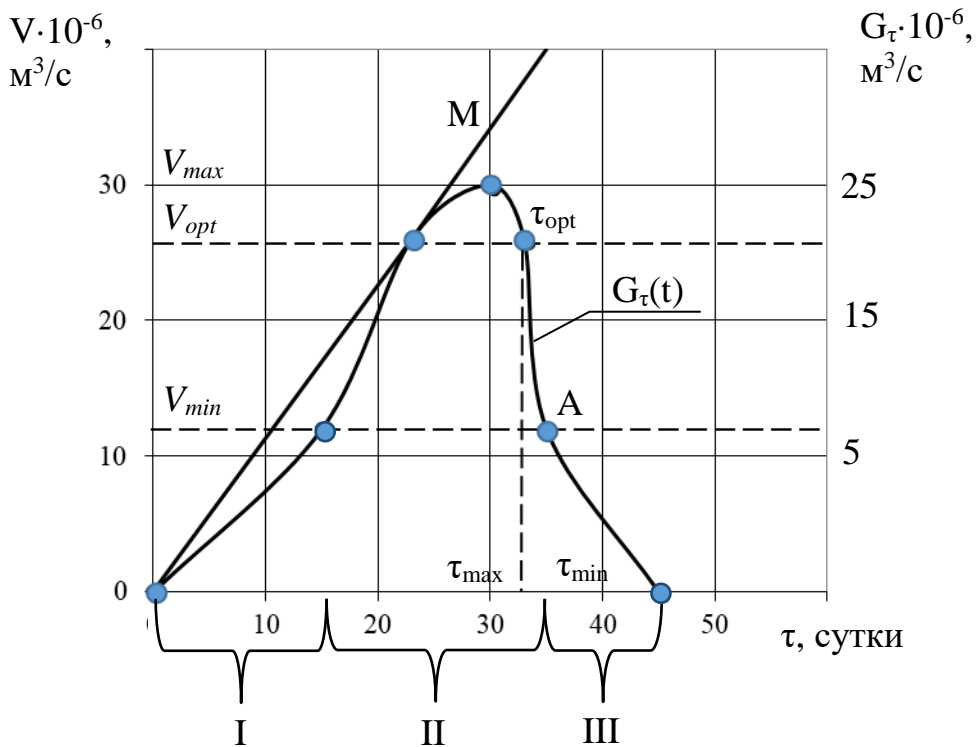
где  $t$  – текущее время, сутки;

$t_1$  – время окончания I этапа, сутки;

$b_0, b_1, b_2$  - коэффициенты регрессии, определяемые путем обработки экспериментальных данных.

Зависимость производительности реактора от времени представлено на рисунке 2.

Для условий экспериментальной установки объемом  $8 \text{ м}^3$  и производительностью  $0,3 \text{ м}^3$  газа на каждый кубометр объема установки в день [2] были получены значения коэффициентов регрессии:  $b_0 = 17,9 \text{ м}^3$ ;  $b_1 = 2,2 \text{ м}^3/\text{сут}$ ;  $b_2 = 0,0195 \text{ м}^3/\text{сут}$ .



I – первый этап реакции до выхода на режим;  
 II – протекание реакции;  
 III – завершение реакции.

Рис. 2. Зависимость производительности реактора от времени.

Из рисунка 2 видно, что целевая функция  $\varphi$  достигает максимального значения, когда прямая O-M является касательной к кривой  $G\tau(t)$ . Подставив полученный полином (3) в (2) имеем:

$$\frac{d\left(\frac{b_0 + b_1 \cdot \tau + b_2 \cdot \tau^2}{\tau}\right)}{d\tau} = \frac{d\left(\frac{b_0}{\tau} + b_1 + b_2 \cdot \tau\right)}{d\tau} = b_0 \left(-\frac{1}{\tau^2}\right) + b_2 = 0. \quad (4)$$

Тогда

$$b_2 = \frac{b_0}{\tau^2}. \quad (5)$$

Из выражения (5) можно получить время оптимальной продолжительности одного цикла работы биогазгенератора:

$$\tau = \sqrt{\frac{b_0}{b_2}} = \sqrt{\frac{17,9}{0,0195}} = 30 \text{ сут.}$$

*Выводы:* 1. Предложена методика расчета и парадигма производительности реактора.

2. Определено время оптимальной продолжительности одного цикла.

3. Доказано, что для прохождения успешной сертификации плодовой продукции по стандарту GlobalG.A.P, производителям необходимо организовать процесс переработки (преобразования) возобновляемых ресурсов садоводства (срезанных ветвей плодовых деревьев) по научно-обоснованным методиками, которые должны обеспечить не только соответствующее качество энергопродукта, но и определенную энергетическую эффективность процесса.

4. Предложенная методика с учетом блочно-модульного использования расчета времени оптимальной продолжительности одного цикла может быть использована при проектировании биогазгенераторов и подбора оборудования.

#### Литература:

11. *Global G.A.P.* Интегрированная система управления сельско-хозяйственным производством [Integrated Farm Assurance Standard (IFA)]. Общий базовый модуль для сельхозпредприятий – Растениеводство – Фрукты и овощи. Контрольные точки и критерии соответствия [Действует с 01.07.2017]. Кельн, 2017. 163 с.

12. Визначення та опис технічної енергетичної системи з використання відновлювальних ресурсів плодкових насаджень / *Караєв О.Г., Бондаренко Л.Ю.* / Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання. Вип.19.- Т.2.- Мелітополь, 2019.- С. 192-199.

13. Перспективи використання біомаси від обрізки та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень для виробництва енергії в Україні / *Г. Г. Гелетуха, Т. А. Желєзна, С. В. Драгнєв, А. І. Баитовий* // Промислова теплотехніка. – 2018. – т.40, № 6. – С. 68-74

14. Термодинамічна модель отримання добрив з тріски зрізаних гілок плодкових дерев / *Караєв О.Г., Бондаренко Л.Ю., Стручаєв М.І.*, / Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ ім. Д. Моторного, 2019. – Вип. 19, т. 3. (с.105-114).-DOI: 10.31388/2078-0877-19-3-105-114

15. Outlook for biogas and biomethane Режимдоступу: <https://webstore.iea.org/outlook-for-biogas-and-biomethane>

16. Ши Линь, А.И. Караев, Н.И. Стручаев. Биогазгенератор для фермерського господарства// Ши Линь, А.И. Караев, Н.И. Стручаев. /Труды ТГАТА, Мелітополь, 1997. – Вип. 2. – С. 7-10.

17. Підвищення ефективності топки для використання енергопродукту з плодової деревини у якості біопалива // Караєв О.Г., Стручаєв М.І., Бондаренко Л.Ю. / Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Інноваційні проекти у галузі технічного сервісу машин», Харків, 2019. – Вип. 201. – С. 253-259.

18. N. Struchaiev, L. Bondarenko, O. Vershkov, A. Chaplinskiy. Improving the efficiency of fruit tree sprayers // Modern Development Paths of Agricultural Production. Trends and Innovations. – Cham: Springer International Publishing, 2019. – P.3-10.

19. Nikolai Struchaiev. Determination of the Duration of Spherical-Shaped Berries Freezing Under the Conditions Stationary Heat Flow / N. Struchaiev, Y. Postol, Y. Stopin, I. Borokhov // Modern Development Paths of Agricultural Production. Trends and Innovations. – Cham: Springer International Publishing, 2019. – P.405-414.

20. Планування експериментальних досліджень процесу охолодження зерна / В.Ф. Ялчак, М.І. Стручаєв, В.О. Верхованцева // Праці ТДАТУ : наукове фахове видання/ТДАТУ. - Мелітополь, 2015. - Вип. 15, т.1: Технічні науки. - С. 3-8.

21. Теплотехніка, теплостачання і використання теплоти в сільськогосподарстві [Heat engineering, heat supply and heat using in agriculture.]. / Didur V.A., Struchaiev M.I. – Kiev.: Agrarna osvita, 2008. – 233pp.[inUkrainian].

<http://nmcbook.com.ua/wpcontent/uploads/2017/11/pdf>

22. Аналіз термодинамічних процесів у потоці повітря /М. І. Стручаєв, Ю. О. Постол // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П.Василенка: наук. фах. видання / ХНТУСГ ім. Петра Василенка. - Харків, 2017. - Вип. 187 : Проблеми енергозабезпечення в АПК України. - С. 28-29.

## **БЛОЧНО-МОДУЛЬНА БІОГАЗГЕНЕРАТОРНА УСТАНОВКА ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ ПЛОДОВОЇ ДЕРЕВИНИ**

Стручаєв М.І., Караєв О.Г., Бондаренко Л.Ю.,

**Анотація** – стаття присвячена підвищенню ефективності використання відходів плодової деревини, шляхом створення блочно-модульної біогазгенераторної установки. Запропоновано схему розташування елементів блочно-модульної біогазгенераторної установки для відходів плодової деревини та методика розрахунку компактних теплоізольованих ємностей для

біогазгенератора на прикладі зменшення втрат енергії в процесі іїциклічного вироблення. Отримано графічні залежності продуктивності по біогазу від часу в ємності реактора складної форми. Визначено час оптимальної тривалості одного циклу при різному розташуванні елементів.

## **BLOCK-MODULE BIOGAS GENERATOR PLANT FOR WASTE FRUIT WOOD**

N.Struchaiev,O. Karaev,L. Bondarenko

### *Summary*

The article is devoted to increasing the efficiency of using fruit wood waste by creating a modular biogas generator plant, the rate of decrease in biogas productivity, a method is proposed for calculating compact heat-insulated containers for a biogas generator using the example of reducing energy losses during its production, which is in a cyclic process. The layout of the elements of the block-modular biogas-generating plant for fruit wood waste is proposed. To solve the optimization problem, we will depict the biogas yield process: the first stage includes sludge unloading, cleaning and preparation of the reactor for operation, loading a new portion of raw materials and bringing the parameters to the operating mode, the second stage - the optimal mode, includes the reaction to a maximum and some local drop, the third section displays a stable decrease in biogas production, which indicates the need to move to the first stage. Graphical dependences of biogas productivity on time in a reactor of complex shape have been determined. The time of the optimal duration of one cycle with different arrangement of elements is determined. It is proved that for a stable supply of biogas to the system, it is necessary that the sections of the cycles corresponding to the completion of the reaction be overlapped by the sections of the cycles of the biogas generator entering the operating mode. It has been proven that in order to pass the successful certification of fruit products according to the GlobalG.AP standard, producers need to organize the process of processing, transforming renewable resources of horticulture - cut branches of fruit trees according to scientifically sound methods, which should ensure not only the appropriate quality of the energy product, but also a certain energy efficiency process. The proposed method for optimizing the cycle time of a biogas generator can be used in the design of modular biogas generating plants for fruit wood waste.