

УДК 662.767.2:628.544

Т. В. Ефремова, Ади Васим Самир Юнис, И. В. Селиверстова

Волгоградский государственный технический университет

СНИЖЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ЭЛЕВАТОРАХ ПУТЕМ ПОЛУЧЕНИЯ БИОГАЗА ИЗ ОТХОДОВ ОЧИСТКИ ЗЕРНА

Рассматриваются вопросы снижения экологической нагрузки при очистке зерна на элеваторах. Приводится способ утилизации отходов (половы) с получением биогаза в биогазовых установках. Исследуются вопросы подмешивания биогаза к природному газу при сжигании в газогорелочных устройствах в соответствии с ГОСТ 5542—2014. Предлагается смесительная установка, выполненная на основе действия трубки Вентури, для предварительного смешивания биогаза с воздухом. Разработана номограмма для определения соотношения «природный газ — биогаз — воздух» в зависимости от тепловой мощности теплогенерирующих установок.

К л ю ч е в ы е с л о в а: элеватор, экологическая безопасность, биогаз, анаэробное сбраживание, природный газ, число Воббе, смесительное устройство, сжигание газа, газогорелочное устройство, теплогенерирующие установки.

Одним из элементов инфраструктуры, обеспечивающим жизнедеятельность населения как крупных, так и средних городов, является элеватор. Зерновой элеватор — это сооружение, предназначенное для приема, переработки и хранения зерна. Для минимизации потерь и сохранения качества зерна на элеваторах производится вторичная обработка всех зерновых культур [1]. Она заключается в сушке зерна до оптимальных значений (14 %) и удалении из зерновой массы различных включений.

Основным элементом, подлежащим удалению, является полowa (мякина) — органическая оболочка зерна хлебных злаков и некоторых других культур. В состав полowy входят такие ценные компоненты, как полисахариды, представленные высокомолекулярными углеводами (клетчаткой, гликаном, пентозанами), белки, витамины, жиры, лигнин. В процессе сбора урожая содержание полowy от общей массы может достигать 15 %. Так только за 2022—2023 гг. отходы, образующиеся при сборе злаковых в Волгоградской области, составили: в 2022 г. — 375 тыс. т, в 2023 г. — 695 тыс. т, в 2024 г. — 570 тыс. т.

Перед тем, как поместить зерно в силосные емкости, проходит несколько этапов обработки: очистка в сепараторе (удаление крупного мусора); очистка в системе аспирации (удаление легких частиц, полowy); сушка в зерносушилке. На элеваторах полowу удаляют аспирационным методом в циклонах, используя разницу в скорости витания зерна и удаляемых отходов.

Далее органический остаток просто вывозят на городские полигоны твердых бытовых отходов [2]. Так как полowa обладает незначительной скоростью витания и плотностью, то при наличии даже небольшого ветра эти отходы разносятся на значительные расстояния, загрязняя воздух и окружающую полигон ТБО землю. При наличии влаги и положительных температурах полowa активно гниет. Распространение газа и неприятного запаха происходит на расстояние до 300...400 м. Вызываемые гниением полowy нагрузки от запаха обусловлены наличием примесей таких компонентов как сероводород, меркаптаны, различные эфиры, алкилбензолы и др. Эти вещества с интенсивным запахом часто в малых

количествах оказывают вредное действие на самочувствие жителей близлежащих районов. При горении половы выделяется целый комплекс особо опасных веществ. Поэтому неорганизованное сжигание половы представляет собой чрезвычайную опасность. Вещества, выделяющиеся при разложении и сгорании органических отходов, уменьшают толщину озонового слоя Земли, усиливают парниковый эффект и ухудшают экологическую ситуацию в целом. Территории, непосредственно прилегающие к полигонам, подвергаются усиленному воздействию вредных веществ [3].

С другой стороны, полова, как органическая масса, может представлять собой источник получения биогаза, являющегося результатом анаэробного сбраживания органического топлива. Такой способ утилизации органических отходов решает сразу две задачи: снижение антропогенного влияния на окружающую среду и получение дополнительной энергии, частично компенсирующей потребности технологического цикла в тепловой и электрической энергии [4].

Основным продуктом процесса анаэробного брожения является газовая смесь, состоящая из 60...70 % метана (CH_4) и 20...30 % углекислого газа (CO_2). Расщепление органического субстрата на отдельные компоненты и превращение в CH_4 происходят только во влажной среде, поскольку бактерии действуют в растворимой форме. Поэтому для ферментации твердых субстратов необходима вода. Процесс анаэробного сбраживания происходит в биореакторах или метатенках, где, помимо самого сбраживания, происходят смешение с водой, периодическое перемешивание субстрата и поддержание необходимой для процесса температуры [5, 6]. Для получения биогаза возможно использовать растительные остатки не только пшеницы, но любых культур, подлежащих хранению на элеваторах, которые при анаэробном сбраживании суспензии в специальных установках выделяют биогаз [7].

Расчеты показывают, что из 1 кг исходного сырья (без учета воды) можно получить 1,26 м³ биогаза, а из отходов 1 т зерна (15 %) образуется 189 м³ топлива. Учитывая, что для получения биогаза необходимо поддерживать определенную температуру в биореакторах (для мезофильного режима сбраживания 35 °С), часть полученной энергии расходуется на обогрев установки. Летом этот показатель составляет около 32 %, зимой — 50 %. Таким образом, при поступлении на элеватор 1 т зерна можно получить около 129 м³ биогаза летом и около 95 м³ зимой. Так как основное назначение топлива — получение энергии на обогрев в отопительный сезон, то для хранения биогаза, получаемого в теплый период года, необходима установка газгольдеров, что позволит не только сохранить получаемый биогаз, но и увеличить его потребление в холодный период года.

Получаемый биогаз по своему составу отличается от природного газа, поступающего из месторождений [8]. Для использования биогаза в установках, предназначенных для сжигания природного газа, необходимо или внести конструктивные изменения в газогорелочные устройства, или использовать для сжигания газовую смесь, состоящую из природного газа и биогаза. Газ, используемый для сжигания в газогорелочных устройствах, должен соответствовать требованиям ГОСТ 5542—2014¹. При подмешивании биогаза в

¹ ГОСТ 5542—2014. Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200113569>.

природный газ необходимо добиться такого соотношения газов, при котором низшее число Воббе полученной смеси будет не ниже значения низшего числа Воббе при стандартных условиях (41,2 МДж/м³). Исходя из этого требования доля биогаза, подмешиваемого в природный газ, не должна превышать значения, определяемого по следующему выражению:

$$X_{\text{б.г.}} = \frac{4,62}{45,82 - W_{\text{б.г.}}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{б.г.}}$ — число Воббе для природного газа МДж/м³.

Число Воббе зависит от состава природного газа, который, в свою очередь, зависит от месторождения. Для расчетов принято число Воббе для газа Арчединского месторождения ($W_{\text{б.г.}} = 45,82$ МДж/м³). Результаты расчетов максимально допустимого содержания биогаза в газовой смеси приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Максимальное содержание биогаза при числе Воббе = 41,20 МДж/м³

Содержание CH ₄ в биогазе	Низшая теплота сгорания биогаза, МДж/м ³	Плотность биогаза, кг/м ³	Относительная плотность по воздуху	$W_{\text{б.г.}}$, МДж/м ³	Содержание биогаза в газовой смеси, %
40	14,30	1,47	1,14	13,39	14,25
45	16,09	1,41	1,09	15,41	15,19
50	17,88	1,35	1,04	17,53	16,33
55	19,67	1,28	0,99	19,77	17,74
60	21,46	1,22	0,94	22,13	19,50
65	23,24	1,16	0,90	24,50	21,67
70	25,03	1,10	0,85	27,15	24,75

Результаты вычислений показывают, что при содержании CH₄ в биогазе от 40 до 70 % возможно его подмешивание к природному газу с соблюдением требований ГОСТ 5542—2014 от 14 до 25 %. Результаты вычислений отражены на рис. 1. Увеличение доли метана в биогазе позволяет увеличивать его содержание в газовой смеси.

Для организации оптимального процесса горения необходимо смешение трех компонентов: природного газа, биогаза и воздуха.

Все газогорелочные устройства, используемые для сжигания природного газа в теплогенерирующих установках, предусматривают смешение двух газовых сред: природного газа и воздуха. Воздух поступает в смесительную камеру за счет кинетической энергии газовой струи (в инжекционных горелках) или за счет напора, создаваемого вентилятором (в дутьевых горелках). Также вторичный воздух может поступать непосредственно в зону горения в инжекционных горелках. Перемешивание трех сред (природного газа, биогаза и воздуха) в таких газогорелочных устройствах не предусмотрено. Подача биогаза непосредственно в смесительную камеру газогорелочного устройства через дополнительный патрубок не обеспечивает необходимой степени

перемешивания всех компонентов и может привести к недожогу и, как следствие, к образованию монооксида углерода, являющимся сильным отравляющим веществом.

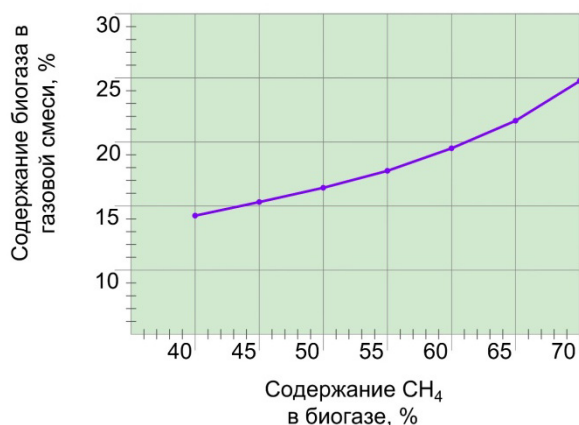


Рис. 1. График зависимости содержания биогаза в газовой смеси от содержания CH_4 в биогазе

Для создания трехкомпонентной газозоудушной смеси необходима дополнительная установка смесительного устройства. Возможны два варианта: предварительное смешение природного газа и биогаза и предварительное смешение биогаза и воздуха. Наиболее оптимальным представляется предварительное смешивание биогаза и воздуха в устройстве, в конструкцию которого входит трубка Вентури (рис. 2). Такие устройства используют, например, для создания синтетического газа, смешивая воздух с паровой фазой сжиженных углеводородных газов. Принцип работы такого устройства основан на поступлении атмосферного воздуха внутрь смесительной камеры за счет создания разрежения биогазом, проходящим через сопло под давлением.

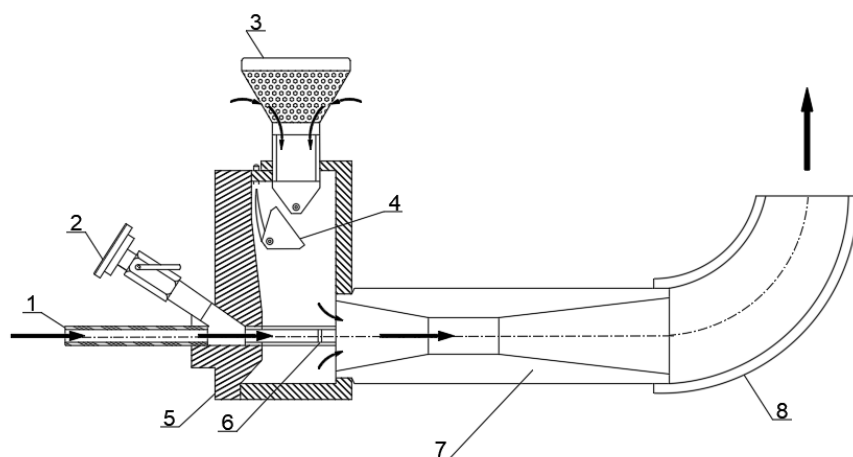


Рис. 2. Устройство для смешивания биогаза с воздухом:

1 — входной патрубок; 2 — штуцер для манометра; 3 — воздушный сетчатый фильтр;
 4 — обратный клапан; 5 — крышка; 6 — сопло; 7 — диффузор; 8 — выходной патрубок

Для использования такого устройства при смешивании воздуха с биогазом необходимо определить теоретическое количество воздуха для сжигания газовой смеси, состоящей из природного газа и биогаза. Результаты вычислений приведены в табл. 2 и на рис. 3.

Таблица 2

Объемы природного газа, биогаза и воздуха в газозвоздушной смеси

Биогаз			Природный газ		Объем воздуха для газовой смеси, $\text{м}^3/\text{м}^3$
Содержание CH_4 в биогазе	Содержание в газовой смеси, %	Объем воздуха, $\text{м}^3/\text{м}^3$	Содержание в газовой смеси, %	Объем воздуха, $\text{м}^3/\text{м}^3$	
40	14,25	3,81	85,75	9,57	8,75
45	15,19	4,28	84,81		8,77
50	16,33	4,76	83,67		8,78
55	17,74	5,24	82,26		8,80
60	19,50	5,71	80,50		8,82
65	21,67	6,19	78,33		8,84
70	24,75	6,66	75,25		8,85

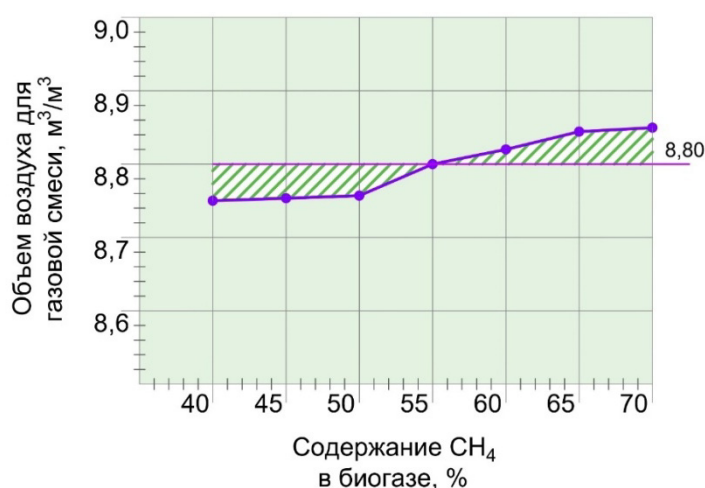


Рис. 3. График зависимости объема воздуха, необходимого для горения, от содержания CH_4 в биогазе

Анализ результатов вычислений в табл. 2 показывает, что при изменении содержания CH_4 в биогазе от 40 до 70 % объем воздуха, необходимого для сжигания газовой смеси природный газ/биогаз, изменяется незначительно и в среднем составляет $8,80 \text{ м}^3$ на 1 м^3 газовой смеси. Это позволяет при определении технических параметров сети газопотребления принять данное числовое значение как константу, что упрощает расчеты установки.

Основным конструктивным параметром смесительного устройства является диаметр сопла, подающего биогаз в газозвоздушную смесь. Теоретическая скорость истечения биогаза из сопла $w_{\text{б.г.}}$, м/с, при низком давлении (до 5 кПа) определяется по выражению [9]:

$$w_{6.г.} = \sqrt{2p_{6.г.} / \rho_{6.г.}}, \quad (2)$$

где $p_{6.г.}$ — давление биогаза перед соплом, Па.

Площадь поперечного сечения седла $f_{6.г.}$, м², определяется по уравнению:

$$f_{6.г.} = \frac{Q_{6.г.}}{3600\mu w_{6.г.}}, \quad (3)$$

где μ — коэффициент расхода, учитывающий неравномерность распределения скоростей потока биогаза по сечению сопла, сопротивления трения в нем и сжатие струи, для такой формы сопла $\mu = 0,65$.

На основании уравнений (2), (3) представляется целесообразным определить диаметр сопла в смесительной установке при различном содержании CH₄ в биогазе при давлении не более 5 кПа (табл. 3, рис. 4).

Таблица 3

Определение диаметра сопла для биогаза

Содержание CH ₄ в биогазе	Плотность биогаза, кг/м ³	Скорость истечения биогаза из сопла $w_{6.г.}$, м/с	Диаметр седла клапана, мм, при расходе биогаза, м ³ /ч			
			1,0	5,0	10,0	20,0
40	1,47	82	2,56	5,76	8,15	11,52
45	1,41	84	2,55	5,69	6,05	11,37
50	1,35	86	2,52	5,62	7,96	11,24
55	1,28	88	2,49	5,56	7,87	11,11
60	1,22	91	2,45	5,47	7,73	10,93
65	1,16	93	2,42	5,41	7,64	10,81
70	1,10	95	2,39	5,35	7,56	10,69

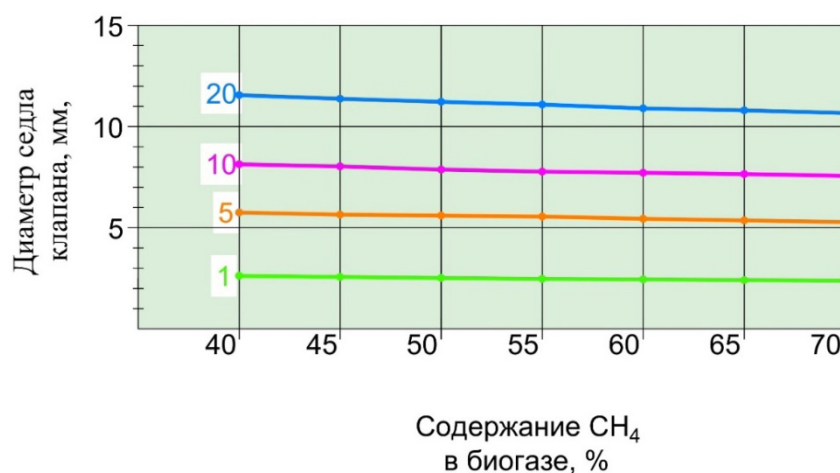


Рис. 4. Изменение диаметра седла при разном содержании CH₄ в биогазе

Анализ данных табл. 3 и рис. 4 показывает, что параметры смесительной установки практически не зависят от содержания CH₄ в биогазе. При разном содержании CH₄ в биогазе можно принимать усредненные значения для

параметров сопла, а площадь поперечного сечения седла и диаметр седлового отверстия зависят только от расхода биогаза. Так, при расходе биогаза $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ диаметр сопла можно принимать размером 2,5 мм, при расходе $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ — 5,6 мм, при расходе $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ — 7,9 мм, при расходе $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ — 11,1 мм.

Важным этапом разработки основных параметров системы с совместным применением природного газа и биогаза является определение параметров газозвушной смеси для обеспечения требуемой тепловой мощности тепло-генерирующей установки. На основании выполненных расчетов разработана номограмма (рис. 5) для определения параметров газозвушной смеси в зависимости от требуемой тепловой мощности установки по выработке тепла. Номограмма выполнена в логарифмической сетке. За исходные данные приняты содержание CH_4 в биогазе, %, (левая вертикальная шкала) и требуемая тепловая мощность, кВт. Искомыми величинами являются расходы биогаза, природного газа и воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$.

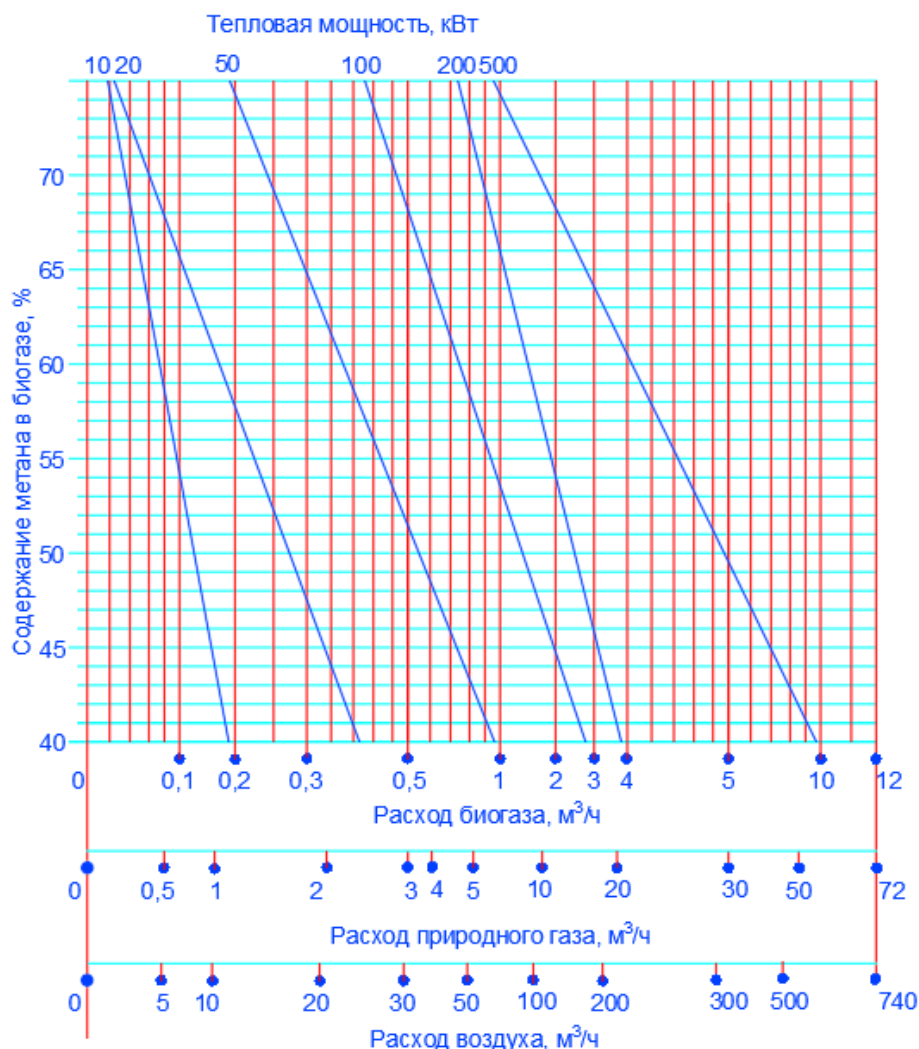


Рис. 5. Номограмма для определения параметров газозвушной смеси

Волгоградская область является одним из основных регионов по выращиванию зерновых культур. Элеваторы способны не только хранить сельхозпродукцию, но и очищать ее от побочных продуктов, которые возможно утилизировать с выгодой для предприятия. В качестве исходного сырья для получения биогаза можно использовать половину зерновых культур. Получения биогаза из отходов сельхозпроизводства поможет не только получить дополнительную энергию, но и сократить количество вредных выбросов в окружающую среду [10]. Для обеспечения требований нормативных документов предлагается использовать смесительную установку, основанную на работе трубки Вентури. Для определения параметров газовой смеси в зависимости от требуемой тепловой мощности теплогенерирующих установок построена номограмма, позволяющая без расчетов определить процентное содержание смеси «природный газ — биогаз — воздух».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фарков А. Г.* Потенциал использования биогаза в регионах аграрной специализации // Инженерный вестник Дона. 2013. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1546.
2. *Малофеев В. М.* Биотехнология и охрана окружающей среды : учебное пособие. М. : Арктос, 1998. 188 с.
3. *Мариненко Е. Е.* Основы получения и использования биотоплива для решения вопросов энергосбережения и охраны окружающей среды в жилищно-коммунальном и сельском хозяйстве : учебное пособие. Волгоград : Изд-во ВолгГАСА, 2003. 100 с.
4. *Щукина Т. В.* Биогаз — перспективы и возможности производства // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2012. №. 1(2). С. 113—118.
5. Pyrolysis of agricultural biomass residues: Comparative study of corn cob, wheat straw, rice straw and rice husk / B. Biswas, N. Pandey, Y. Bisht, R. Singh, J. Kumar, T. Bhaskar // Bioresource Technology. 2017. Vol. 237. Pp. 57—63.
6. *Aqsha A., Tijani M., Moghtaderi B., Mahinpey N.* Catalytic pyrolysis of straw biomasses (wheat, flax, oat and barley) and the comparison of their product yields // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2017. Vol. 125. Pp. 201—208.
7. *Lazdovica K., Liepina L., Kampars V.* Comparative wheat straw catalytic pyrolysis in the presence of zeolites, Pt/C, and Pd/C by using TGA-FTIR method // Fuel Processing Technology. 2015. Vol. 138. Pp. 645—653.
8. *Ефремова Т. В., Инкин А. А.* Применение биогаза на винодельческом предприятии в Республике Крым // Инженерный вестник Дона. 2022. № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7723.
9. *Стаскевич Н. Л., Северинец Г. Н., Вигдорчик Д. Я.* Справочник по газоснабжению и использованию газа. Л. : Недра, 1990. 762 с.
10. *Стребков Д. С., Ковалев А. А.* Биогазовые установки для обработки отходов животноводства // Техника и оборудование для села. 2006. № 11. С. 28—30.

© Ефремова Т. В., Ади Васим Самир Юнис, Селиверстова И. В., 2025

Поступила в редакцию
04.07.2025

Ссылка для цитирования:

Ефремова Т. В., Ади Васим Самир Юнис, Селиверстова И. В. Снижение экологической нагрузки на элеваторах путем получения биогаза из отходов очистки зерна // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2025. Вып. 3(100). С. 40—48. DOI: [10.35211/18154360_2025_3_40](https://doi.org/10.35211/18154360_2025_3_40).

Об авторах:

Ефремова Татьяна Васильевна — канд. тех. наук, доц., доц. каф. энергоснабжения, теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; mama_t63@mail.ru

Ади Васим Самир Юнис — аспирант, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Селиверстова Ирина Владимировна — магистрант, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, г. Волгоград, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Tatyana V. Yefremova, Adi Vasim Samir Yunis, Irina V. Seliverstova

Volgograd State Technical University

REDUCING THE ENVIRONMENTAL LOAD ON ELEVATORS BY PRODUCING BIOGAS FROM GRAIN CLEANING WASTE

The article discusses the issues of reducing the environmental impact during grain cleaning at grain elevators. It presents a method for recycling waste (straw) into biogas in biogas plants. The article also explores the possibility of mixing biogas with natural gas during combustion in gas burners in accordance with GOST 5542—2014. The article proposes a mixing system based on the Venturi tube principle for pre-mixing biogas with air. A nomogram has been developed to determine the natural gas — biogas — air ratio, depending on the thermal capacity of heat-generating units.

Key words: elevator, environmental safety, biogas, anaerobic fermentation, natural gas, Wobbe number, mixing device, gas combustion, gas burner, heat-generating units.

For citation:

Yefremova T. V., Adi Vasim Samir Yunis, Seliverstova I. V. [Reducing the environmental load on elevators by producing biogas from grain cleaning waste]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2025, iss. 3, pp. 40—48. DOI: 10.35211/18154360_2025_3_40.

About authors:

Tatyana V. Yefremova — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; mama_t63@mail.ru

Adi Vasim Samir Yunis — Postgraduate student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation

Irina V. Seliverstova — Master's Degree student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation