

УДК 631.1.004.

ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БИОГАЗА, ПОЛУЧЕННОГО В РЕЗУЛЬТАТЕ ПЕРЕРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКОЙ БИОМАССЫ

Б.Э. Хайриддинов¹, С.А. Утаев¹, С.Ю. Ганиев², У.Дж. Турдиев¹

¹Каршинский государственный университет, г. Карши. ул. Кучабат-17, 180103

²Каршинский государственный технический университет г.Карши, ул.
Мустакиллик 225 180100

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15132944>

Аннотация: В статье приведены результаты теплофизических характеристик продуктов сгорания биогаза получаемого от биогазовой установки построенной в подсобном хозяйстве при ООО «Муборакнефтегаз»

Ключевые слова: продукты сгорания, технологические процессы, степень загрязнения воздуха, теплота сгорания, трёх атомные газы, коэффициент избытка воздуха, динамическая вязкость, коэффициент теплопроводности.

FUNDAMENTALS OF THERMAL PERFORMANCE OF BIOGAS OBTAINED FROM THE PROCESSING OF ORGANIC BIOMASS

Abstract: In article are brought results heat physical features of the products of combustion biogas got from biogas of the installation built in subsidiary facilities under ООО “Muborakneftegaz”.

Keywords: products of combustion, technological processes, degree of the soiling the air, heat of combustion, three atomic gases, factor of the excess of the air, dynamic viscosity, factor heat-conducting.

ВВЕДЕНИЕ

Стратегические направления развития энергетики Республики Узбекистан предусматривают широкое использование нетрадиционных источников энергии, в том числе энергии органической биомассы животных. Расчеты показывают, что при переработке органической биомассы в биологический газ ежегодно можно производить в 4,2 раза больше энергии, чем производится на электростанциях Республики Узбекистан.

Тесно с проблемой обращения с отходами связана еще одна, все более обостряющаяся, проблема охраны окружающей среды, которая также требует интенсивной и рациональной переработки органической биомассы.

Использование возобновляемых источников энергии в мире становится все более актуальным в связи с тем, что традиционные источники энергии (уголь, нефть, природный газ) ограничены, а их использование для производства тепла и электроэнергии наносит огромный вред окружающей среде. В связи с этим все большее значение приобретает солнечная энергетика, которую можно использовать для производства экологически чистой тепловой и электрической энергии [1,2,3,4].

Солнце – гигантский источник «чистой» энергии, не загрязняющей окружающую среду. Эффективное использование солнечной энергии позволяет значительно сократить потребление природных ресурсов. Климатические и погодные условия юга Узбекистана создают широкие возможности для эффективного использования солнечной энергии в Кашкадарьинской области [2,3,4,5].

Для достижения максимальной эффективности образования биогаза анаэробная переработка требует определенных температурных условий и технологических процессов, желательно близких к оптимальному процессу [6,7].

Постановка задачи

В республике основным энергетическим топливом является природный газ, в частности биогаз, получаемый в результате анаэробного разложения органических веществ.

В республике наиболее перспективным является использование анаэробного разложения органических веществ с получением биогаза.

Переработка биомассы в анаэробных условиях осуществляется в специальных автоклавах под давлением (рис. 1). Под воздействием метанобразующих бактерий в бескислородной среде при температуре 30...55°C в реакторе происходит ферментация биомассы с образованием горючего газа - биогаза, который используется для технологических и бытовых нужд.

Из 1 т навоза влажностью 70°C можно получить около 220 м³ биогаза с теплотой сгорания 28...35 МДж/м³. Остатки бродильной массы в варочных котлах представляют собой легкоусвояемую растениями, лишенную возбудителей болезней и семян сорняков, легкоусвояемую жидкость высококонцентрированного органического удобрения (гумуса) [8,9].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основными элементами биогазовых установок являются варочный котел (реактор ферментации) (2) и газгольдер (резервуар для хранения биогаза) (3). Производительность и экономическая эффективность всей установки зависит от конструкции варочного котла.

Биогазовые установки не требуют специального дорогостоящего оборудования. Срок окупаемости этих установок составляет 2...4 года.

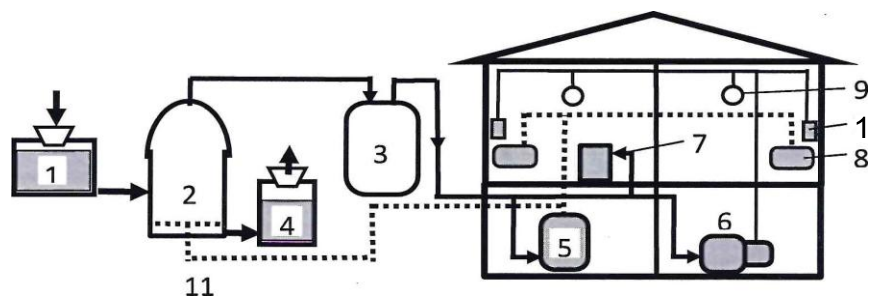


Рис. 1. Принципиальная схема биогазовой установки индивидуального солнечного отопления ООО «Муборакнефтегаз»: 1 – органические отходы; 2-варочный котел; 3-газгольдер; 4-твердые отходы; 5-котел; 6-двигательный электрогенератор; 7-газовая плита; 8-отопительные батареи; 9 и 10 – освещение и электроприборы; 11-обогреваемый варочный котел.

Основными факторами, определяющими широкое внедрение в республике технологии анаэробного разложения органических веществ с получением биогаза, являются:

1) высокая технологическая готовность и экономическая рентабельность; технологическая и эксплуатационная простота биогазовой технологии;

2) для биогазовых технологий сырье доступно практически повсеместно (органические промышленные, сельскохозяйственные и бытовые отходы, навоз и т.п.);

3) климатические условия обеспечивают максимальный выход коммерческого биогаза; зимний температурный режим позволяет обеспечить мезофильное брожение (при 30...40 °С) при минимальных затратах биогаза на подогрев в варочных котлах, а в летнее время - затраты на отопление исчезают;

4) широкие возможности комплексного использования биогазовых установок совместно с солнечными установками. Биогаз обычно содержит 75...81% метана. Другие компоненты включают этан, пропан, бутан (1,8...6,2%) [8,9].

Более тяжелые углеводороды представляют большую ценность как химическое сырье. Состав газообразного топлива задается в объемных долях и записывается в следующем виде [6,10].

$$\sum_{i=1}^{i=m} C_n H_{2n+2} + \sum_{i=1}^{i=m} C_n H_{2n} + H_2 + CO + H_2S + O_2 + N_2 + CO_2 = 100\% \quad (1)$$

Теплотехнические расчеты обычно проводятся для сухого состава газообразных топлив. Теплотворная способность сухого газа определяется объемным составом в процентах (%) и известной теплотой сгорания компонентов.

Теплотворная способность газообразного топлива, кДж/м³.

низший

$$Q_{\text{низ}} = 358CH_4 + 638C_2H_6 + 913C_3H_8 + 1187C_4H_{10} + 1461C_5H_{12} + 126,5CO + 107,5H_2 + 234H_2S; \quad (2)$$

высшей

$$Q_{\text{выс}} = 398CH_4 + 698C_2H_6 + 993C_3H_8 + 1282C_4H_{10} + 1572C_5H_{12} + 126,5CO + 127,5H_2 + 254H_2S; \quad (2a)$$

При известном физико-химическом составе природного газа определяют высшую Q⁺ и низшую Q теплоты сгорания - тепловой эквивалент природного газа E = Q_{вх}/29300.

Для полученного биогаза: Q_{низ}=37600...39100 кДж/м³ Q_{выс} = 41800...44700 кДж/м³; E = 1,28.. 1,34.

Как видно из приведенных выше значений, биогаз имеет высокую теплотворную способность.



Рис. 2. Общий вид биогазовой установки индивидуального солнечного отопления ООО «Муборакнефтегаз»:

Это связано с тем, что биогаз имеет повышенное содержание тяжелых углеводородов. При добыче этих углеводородов (в качестве химического сырья) теплотворная способность биогаза снижается на 4...8%.

Для теплотехнических расчетов принимают значение низшей теплоты сгорания топлива. Теоретическое количество воздуха ($\text{м}^3/\text{м}^3$), необходимое для полного сгорания газа, определяется по формуле [1,2,7].

$$V_{air} = 0,0476 \left[0,5CO + 0,5H_2 + 2CH_4 + 1,5H_2S + \sum_{i=1}^{i=m} (m+n/4) C_m H_n - O_2 \right]. \quad (3)$$

Для биогаза справедливо 0,4...11,15 $\text{м}^3/\text{м}^3$.

В реальных условиях воздух для горения топлива подается в большем количестве по сравнению с его теоретическим количеством $V_{изб}$. Отношение фактического количества воздуха, подаваемого в устройство сгорания, к теоретически необходимому $V_{изб}$ называется коэффициентом избытка воздуха:

$$\alpha = V_{aair} / V_{air} \quad (12)$$

Коэффициент избытка воздуха α зависит от конструктивных особенностей топочного устройства, типа и способа сжигания топлива. Значения α изменяются в пределах $\alpha = 1,02...1,5$. Результаты теоретических и экспериментальных исследований представлены на рис. 2.

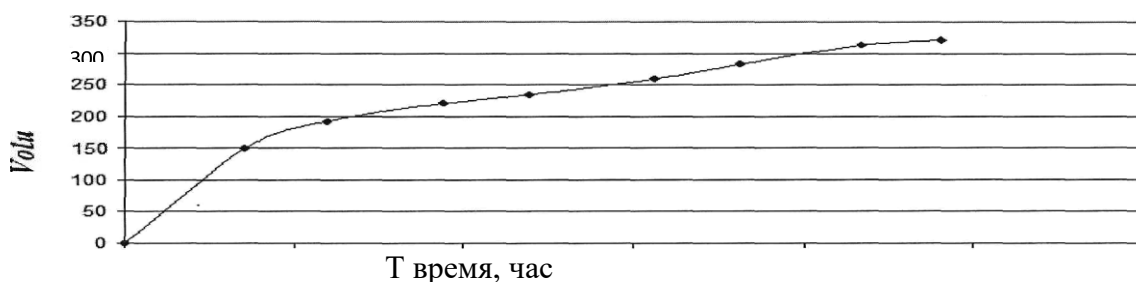


Рис. 3. Зависимость объема получаемого биогаза от продолжительности ферментации навоза мелкого рогатого скота.

Продукты полного сгорания топлива при $\alpha = 1$ содержат: сухие (неконденсирующиеся в топочном устройстве) трехатомные газы R_2O (CO_2 и SO_2); H_2O – водяной пар, полученный при сжигании водорода; N_2 – топливный азот и азот в теоретически необходимом количестве воздуха.

Кроме того, в состав продуктов сгорания топлива входят водяные пары, образующиеся в результате испарения влаги топлива, пар, вносимый в топку вместе с влажным воздухом. Ведь при $\alpha > 1$ в продуктах сгорания будет присутствовать избыток воздуха (дополнительный кислород и азот).

Продукты сгорания биогаза ООО «Муборакнефтегаз» не содержат сернистого газа SO_2 , поэтому принято $R_2O = CO_2$.

Содержание продуктов сгорания представлено: в процентах и долях.

$$RO_2 + N_2 + H_2O = 100\%; \quad X_1 + X_2 + X_3 = 1; \quad (5)$$
$$X_1 = N_2 / 100; \quad X_2 = RO_2 / 100; \quad X_3 = H_2O / 100.$$

по объёмному содержанию

$$V_{cp} = V_{RO} + V_N + V_{HO} \quad (6)$$

$$V_N = 0,79V_{air} + 0,8N_2 / 100; \quad V_N = 8,5...8,86 m^3 / m^3. \quad (7)$$

Объем сухих трехатомных газов

$$V_{RO} = 0,01 \left[CO_2 + CO + H_2S + \sum_{i=1}^{i=m} m C_m H_n \right]; \quad V_{RO} = 1,09...1,137 m^3 / m^3. \quad (8)$$

Теоретический объем водяного пара, образующегося при сгорании водорода и содержащегося в

$$V_{HO} = 0,01 \left[H_2S + H_2 + 2CH_4 + \sum_{i=1}^{i=m} \frac{n}{2} C_m H_n + 0,124x_c \right] + 0,0161V_{air}; \quad (9)$$

$$V_{HO} = 2,255...2,349 m^3 / m^3$$

(9a)

Объемное содержание продуктов сгорания топлива по формуле (6)

$$V_{cp} = 11,862 \dots 12,357 m^3/m^3 \quad (10)$$

Процентное содержание компонентов продуктов сгорания топлива

$$N_2 = 100 \times X_1 = 68,92...71,79\%; \quad RO_2 = 100 \times X_2 = 8,83...9,2\%; \quad (11)$$

$$H_2O = 100 \times X_3 = 19,01 \%$$

Теоретическая температура топлива определяется на основе уравнений энергетического баланса процесса сгорания 1 м³ топлива [3,4]

$$Q_{in} \frac{100 - q_3 - q_4 - q_6}{100 - q_4} + Q_n = \sum_{i=1}^{i=3} (V_i C_i) (T_m - T_0); \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{i=3} (V_i C_i) = V_{RO} C_{RO} + V_N C_N + V_{HO} C_{HO}; \quad (12a)$$

где q_3 – потери тепла от химического недогрева, %; q_4 — потери тепла от механической неполноты сгорания, %; q_6 - теплопотери с физической теплотой шлака, %; Q_h - теплота, вносимая с горячим воздухом, нагретым внутри топочного устройства, кДж/м³;

C_{RO} , C_N , C_{HO} - удельная объемная теплоемкость компонентов продуктов сгорания топлива, кЖ/(м³).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Для газообразного топлива составляющие теплового баланса q_3 , q_4 и q_6 принимаются

$$q_3 = q_4 = q_6 = 0$$

Таким образом, температура сгорания газообразного топлива в соответствии с формулой (12) будет определяться выражением:

$$T_m = (Q_{in} + Q_h) / \left[\sum_{i=1}^{i=3} (V_i C_i) \right] + T_0 \quad (13)$$

Молекулярная масса

$$M_{cp} = M_{RO} X_2 + M_N X_1 + M_{HO} X_3. \quad (14)$$

Значения M_{RO} , M_N , M_{HO} приведены в таблице 1.

$$M_{cp} = 27,571 \text{ кг / Кмоль} \quad (14 \text{ а})$$

Массовая теплоемкость продуктов сгорания

$$C_{cp} = M_{RO2} C_{RO} / M_{cp} + M_N X_1 / C_N / M_{cp} + M_{HO} X_3 C_{HO} / M_{cp} \quad (15)$$

Значения C_{RO} , C_N , C_{HO} приведены в таблице 1.

Плотность сухих продуктов сгорания, кг/м^3

$$\rho_{cp}^d = 0,01[1,96CO_2 + 1,52H_2S + 1,25N_2 + 1,43O_2 + 1,25CO + 0,0899H_2 + \sum(0,536m + 0,045n)C_m H_n]; \quad \rho_{cp}^d = 0,84...0,875 \text{ кг / м}^3. \quad (16)$$

Плотность влажных продуктов сгорания $Q_{увл}$

$$\rho_{cp}^w = \frac{\rho_{cp}^w + \frac{x_c}{1000}}{1 + \frac{xc}{804}}; \quad \rho_{cp}^w = 0,835...87 \text{ кг / м}^3. \quad (17)$$

Плотность продуктов сгорания в зависимости от температуры

$$\rho_{dcp} = \frac{P_0 M_{cp}}{R_0 T_i} \quad (18)$$

Теплопроводность продуктов сгорания - газовой смеси определяется по формуле (11)

$$\lambda_{cp} = \lambda_1 X_1 + \lambda_2 X_2 + \lambda_3 X_3; \quad \lambda_{cp} = 0,0218 \text{ W / (mK)}. \quad (19)$$

Динамическая вязкость продуктов сгорания определяется (11)

$$\mu_{cp} = \frac{\mu_1}{1 + \frac{x_2}{x_1} \Phi_{1,2} + \frac{x_3}{x_1} \Phi_{1,4}} + \frac{\mu_2}{1 + \frac{x_1}{x_2} \Phi_{2,1} + \frac{x_3}{x_2} \Phi_{2,3}} + \frac{\mu_3}{1 + \frac{x_1}{x_3} \Phi_{3,1} + \frac{x_2}{x_3} \Phi_{3,2}}; \quad (20)$$

где $\Phi_{12}... \Phi_{32}$ – функции вязкости:

$$\begin{aligned} \Phi_{1,2} &= \frac{[1 + (\mu_1 / \mu_2)^{1/2} (M_2 / M_1)^{1/4}]^2}{2\sqrt{2}(1 + M_1 / M_2)^{1/2}}; & \Phi_{1,3} &= \frac{[1 + (\mu_1 / \mu_2)^{1/2} (M_3 / M_1)^{1/4}]^2}{2\sqrt{2}(1 + M_1 / M_3)^{1/2}}; \\ \Phi_{2,1} &= \frac{[1 + (\mu_2 / \mu_1)^{1/2} (M_1 / M_2)^{1/4}]^2}{2\sqrt{2}(1 + M_2 / M_1)^{1/2}}; & \Phi_{2,3} &= \frac{[1 + (\mu_2 / \mu_3)^{1/2} (M_3 / M_2)^{1/4}]^2}{2\sqrt{2}(1 + M_2 / M_3)^{1/2}}; \\ \Phi_{3,1} &= \frac{[1 + (\mu_3 / \mu_1)^{1/2} (M_1 / M_2)^{1/4}]^2}{2\sqrt{2}(1 + M_3 / M_1)^{1/2}}; & \Phi_{3,2} &= \frac{[1 + (\mu_3 / \mu_1)^{1/2} (M_2 / M_3)^{1/4}]^2}{2\sqrt{2}(1 + M_3 / M_2)^{1/2}}. \end{aligned}$$

$$\nu_{cp} = \mu_{cp} / \rho_{cp}; \quad a_{cp} = \lambda_{cp} / (\rho_{cp} C_{cp}); \quad Pr_{cp} = \mu_{cp} C_{cp} / \lambda_{cp}. \quad (20a)$$

По формулам (20), (20a):

$$\mu_{cp} = 1,466 \times 10^{-5} \text{ Па с};$$

При известных значениях C_{cp} , λ_{cp} и μ_{cp} определяют коэффициенты кинематической вязкости ($\text{м}^2/\text{с}$) и термодиффузионного аср ($\text{м}^2/\text{с}$), число Прандтля Pr_{cp}

$$\nu_{cp} = \mu_{cp} / \rho_{cp}; \quad a_{cp} = \lambda_{cp} / (\rho_{cp} C_{cp}); \quad Pr_{cp} = \mu_{cp} C_{cp} / \lambda_{cp}. \quad (21)$$

Зависимость теплопроводности λ_{cp} и динамической вязкости μ_{cp} продуктов сгорания от температуры определяют по формуле Сазерленда [11.12]

$$\lambda_{cp} = \lambda_{cp0} A_i; \quad \mu_{cp} = \mu_{cp0} A_i \quad (22)$$

$$\text{где} \quad A_i = \frac{273,15 + B_i}{T_{oi} + B_i} \left(\frac{T_{oi}}{273,15} \right)^{3/2}; \quad T_{oi} = t_{oi} + 273,15 \quad (22a)$$

Значение B_i приведены в таблице 1.

Таким образом, при известных значениях термодинамических параметров продуктов сгорания топлива теплота сгорания в соответствии с формулой (13) равна:

$$T_t = 1915 \dots 1995 \text{ К}; \quad \text{or} \quad t_t = 1642 \dots 1722 \text{ }^\circ\text{C} \quad (23)$$

Таблица 1. Физические параметры воздуха и продуктов сгорания при $t = 0^\circ \text{C}$

параметры	воздух	Азот N_2	Углекислый газ CO_2	Водяной пар CO_2
M_i , кг/кмоль	28,95	28	44	18
$100 \times X_i$, %		71,79	9,2	19,01
C_{pi} , КДЖ/(кг К)	0,9956+ +0,00009299t	1,024+ +0,00008855t	0,8654+ +0,0002443t	1,833+ +0,0003111t
λ_{oi} В(м К)	0,02438	0,0243	0,0137	0,0162
$\mu_{oi} \times 10^5$, Па с	1,7198	1,66	1,37	0,88
B_i	122	113	239,7	961

При температурах горения $t_t > 1650^\circ \text{C}$ образуются оксиды азота (NO , NO_2 ; NO_4 ; NO_5), которые при соединении с влагой и воздухом образуют азотную кислоту [5-8]. Образование NO и NO_2 ускоряется при повышении температуры, давления и избытка воздуха. Снижение образования NO , NO_2 и их выбросов в атмосферу можно обеспечить, соблюдая условие $\alpha = 1$ и снижая температуру сгорания топлива до $< 1650^\circ \text{C}$. Лучшим способом снижения температуры горения является разбавление топлива дымовыми газами, т.е. рециркуляционное использование продуктов сгорания топлива. Рециркуляция дымовых газов при сжигании природного газа позволяет снизить выбросы NO и NO_2 на 60 % [3-6].

ВЫВОДЫ

Результаты теплофизических характеристик продуктов сгорания биогаза, полученные от биогазовой установки, построенной в подсобном хозяйстве ООО «Муборакнефтегаз», используются для исследования тепловых балансов печных устройств

и котельных установок, моделирования тепломассообмена тепловых процессов с использованием теплоты продуктов сгорания топлива.

Условные обозначения: a_i – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; C_i – теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; M_i – молекулярная масса, $\text{кг}/\text{кмоль}$; P_0 – барометрическое давление, Па ; R_0 – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{К}\cdot\text{кмоль})$; t – температура, $^\circ\text{C}$; T_i – абсолютная температура, К ; x_m – влажность, $\text{кг}/\text{кг}$; X_i – объемные доли компонентов охлаждающей смеси; λ_i – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; μ_i – коэффициент динамической вязкости, Пас ; ν_i – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ_i – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; $P_{\text{Г}}$ – критерии подобия Прандтля.

Литература

1. Хайриддинов Б.Э., Н.С.Холмирзаев, Ш.Х.Эргашев. «Сочетание солнечной теплицы-животноводческой фермы с подпочвенным аккумулятором тепла». «Символ науки». Международный научный журнал. Международный центр Omega science инновация 16 (2017)
2. Б.Э.Хайриддинов, Н.С.Холмирзаев, Г.Г.Халимов, А.С.Рысбаев, а Ш.Х.Эргашев, 2018. Муқобил энергия манбаларидан фойдаланиш. *Монография* Т. ADAD PLYUS, 417
3. Б.Э.Хайриддинов, Н.С.Холмирзаев, Ш.Х.Эргашев, А.Б.Хайриддинов, Д.Ж.Нурматова Комбинирование гелиотеплицы-животноводческих ферм с подпочвенным аккумулятором теплица Символ науки. 2017.
4. Ergashev Sh.H. et al “Results of mathematical modeling of nstatic temperature temperature heating of” livestock heat complex”through the use of solar and bio energy” International Conference onremote Sensing of the Earth: Geoinformatics, Cartography, Ecology, and Agriculture (RSE 2022). Vol.12296. SPIE, 2022.
5. Uzakov G.N. Technical and economic calculation of combined heating and cooling systems vegetable store-solar greenhouse. Applied Solar Energy.- Allerton Press, USA,2012-vol. 48 №1-PP. 60-61
6. Khusenov A.A. et al 2022 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1070 012032
7. Ergashev Sh.H. et al 2022 IOP Conf.Ser.: Earth Environ. Sci. 1070 012031
8. Fayziyev T.A., Ergashev Sh.H., Ro'ziqulov G'.Yu., “Chorvachilik komplekslarini loyihalash va ularning issiqlik hamda namlik rejimlari hisobi” Innovatsion texnologiyalar, po 2(42), 2021, pp 60-67.
9. Toshmamatov B.M., G.N.Uzakov., I.N.Kodirov., I.A.Khatamov Calculation of the heat balance of the solar installation for the thermal processing of municipal solid waste.// International Journal of Applied Engineering research and Development (IJAERD) ISSN (P) 2250-1584; ISSN (E): 2278-9383 Vol 10 Issue1, Jun 2020, India. PP. 21-30
10. Uzakov G.N. “Calculation of the heat engineering characteristics of a combined system of a vegetable storage facility and solar greenhouse”.Applied Solar energy 47.3 (2011): 248-251.