

УДК 621.311

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛОМЫ ОТ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР ДЛЯ  
ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ  
С ПОМОЩЬЮ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА  
USE OF GRAIN STRAW TO PRODUCE HEAT AND ELECTRIC ENERGY  
USING A STIRLING ENGINE**

А.А. Мильяненко

Научный руководитель – А.Г. Герасимова, к.т.н., доцент  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

A. Milyanenko

Supervisor – A. Gerasimova, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian national technical university, Minsk

***Аннотация:** В данной работе рассмотрено использование котлов для сжигания соломы зерновых культур совместно с двигателем Стирлинга, для параллельной выработки тепловой и электрической энергии. Представлены несколько вариантов использования данных установок, произведены расчёты.*

***Abstract:** This paper examines the use of boilers for burning cereal straw together with a Stirling engine for parallel generation of heat and electricity. Several options for using these units are presented, and calculations are made.*

***Ключевые слова:** двигатель Стирлинга, солома зерновых культур, котел для сжигания соломы, мощность, количество вырабатываемой энергии.*

***Keywords:** Stirling engine, cereal straw, straw-burning boiler, power, amount of energy generated.*

### **Введение**

В данный момент во всем мире большое количество соломы никак не используется, а просто сгнивает на полях или хранилищах. При том, что при гниении солома выделяет столько же углекислого газа, сколько и при горении. Использование соломы поможет снизить потребление ископаемого топлива и увеличить рациональность использования природных ресурсов.

### **Основная часть**

Биомасса является одним из основных видов топлива в возобновляемой энергетике. К биомассе относятся и солома. В данный момент перспективным направлением является установка недорогих котлов различного типа для производства тепловой энергии за счёт сжигания соломы. Одним из самых простых и эффективных типов котлов, являются котлы, способные сжигать солому в виде тюков. В таких котлах реализован принцип послойного верхнего горения. Пламя в топке котла постепенно опускается вниз – поэтому стало возможно использовать самое недорогое и даже сырое горючее. Котел отличается простой конструкцией: посередине котла расположена топка, под которой находятся водоохлаждаемые колосники и зольник, сверху теплообменное устройство с двумя горизонтальными полками, наполненные циркулирующим теплоносителем [1].

Главным условием использования соломы является её влажность, для нормальной эксплуатации котлов нужна влажность менее 20 %. Также надо следить за содержанием хлора в соломе, так как его большое количество способствует коррозии оборудования и выходу его из строя. Для решения проблемы с низкой насыпной плотностью соломы решается её тюкованием.

На рисунке 1 показан внешний вид котла, работающего на тюках соломы.



Рисунок 1 – Внешний вид котла, работающего на тюках соломы [2]

Мы предлагаем использовать в таких установках двигатели Стирлинга для производства электричества в то время, когда отопление не требуется, так как они имеют большой КПД, также они при выработке электроэнергии отдают больше тепла на охлаждающую воду, которую можно использовать для отопления и горячего водоснабжения. Данные установки смогут обеспечивать электроэнергией и теплом населенные пункты, находящиеся недалеко от установки либо объекты сельского хозяйства (сушить зерно отапливать фермы, телицы и т.д.).

В расчётах мы использовали котёл длительного горения на тюках соломы Wichlacz GKS 2000S, мощностью 2000 кВт. Котел предназначен для отопления больших частных домов, коттеджей, промышленных и сельскохозяйственных объектов. КПД котла 82-89 % [3].

В качестве топлива используются тюки из соломы длиной и диаметром по 1,7 метра. В топку помещается 2 тюка. Одного тюка соломы хватит на 4 часа работы котла [3].

Рассчитаем массу соломы, которую котел потребляет за одну полную загрузку и за сутки при максимальной мощности. Плотность соломы  $\rho = 110 \text{ кг/м}^3$  [4].

$$V = \pi r^2 h = 3,14 \cdot 0,85^2 \text{ м} \cdot 1,7 \text{ м} = 3,86 \text{ м}^3; \quad (1)$$

$$m_1 = \rho \cdot V = 110 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 3,86 \text{ м}^3 = 424,6 \text{ кг}, \quad (2)$$

где  $V$  – объём 1 тюка,  $\text{м}^3$ ;

$m_1$  – масса 1 тюка, кг.

Так как за 4 часа сгорает один тюк, значит за сутки сгорит 6 тюков.

$$m_{\text{сутки}} = 6 \cdot 424,6 \text{ кг} = 2547,6 \text{ кг}. \quad (3)$$

Получается за сутки котел будет потреблять 2547,6 килограмм соломы в виде тюков.

Далее рассчитаем, какое количество теплиц сможет отопить наш котёл. Для постройки теплицы используются ленточный фундамент, нижние 30 см стены, можно построить из газосиликатных блоков, для улучшения теплоизоляции, а остальную часть из 16 мм двухкамерного поликарбоната для уменьшения теплопотерь.

$$Q = k_T \cdot S_{\text{огр}} \cdot (T_{\text{вн}} - T_{\text{нар}}) \cdot k_{\text{инф}}, \quad (4)$$

где  $k_T$  – коэффициент теплопередачи обшивки (выбираем из списка выше);

$S_{\text{огр}}$  – общая площадь стен и кровли,  $\text{м}^2$ ;

$T_{\text{вн}} - T_{\text{нар}}$  – дельта температур, суммарный перепад между наружной и проектной внутренней,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$k_{\text{инф}}$  – коэффициент инфильтрации, отображающий потери тепла через неплотные примыкания и зазоры (в среднем равняется 1,25). Для качественных фабричных теплиц он может не применяться [5].

У двухкамерного поликарбоната толщиной 16 мм коэффициент теплопередачи обшивки равен  $2,3 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$  [4]. Так как в теплице используются стены из блоков и двухслойного поликарбоната, то коэффициент инфильтрации составит 1,08 из-за потерь через грунт и вентиляцию. Средняя комфортная температура в теплице для роста растений  $+ 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  [6]. Средняя минимальная температура в Республике Беларусь зимой  $- 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$  [7].

Рассчитаем дельту температур.

$$T_{\text{вн}} - T_{\text{нар}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C} - (-8 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 28 \text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (5)$$

Проектируемая теплица будет двухскатная длиной 100 метров, шириной 10 метров, высота боковых стен 3 метра, высота конька крыши 4 метра.

Рассчитаем площадь внешнюю поверхность теплицы.

$$S_{\text{огр}} = S_{\text{стен}} + S_{\text{крыши}} = 100 \cdot 2,7 \cdot 2 + 10 \cdot 3 \cdot 2 + 0,5 \cdot 10 \cdot 1 + 5,1 \cdot 100 \cdot 2 = 1860 \text{ м}^2. \quad (6)$$

Теперь можно рассчитать мощность отопления для теплицы.

$$Q = 2,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 1860 \text{ м}^2 \cdot 28^\circ\text{C} \cdot 1,08 = 129,37 \text{ кВт}. \quad (7)$$

Теперь можно рассчитать количество теплиц, которое отопит один котёл.

$$N = \frac{Q_{\text{КОТЛА}}}{Q} = \frac{2000 \text{ кВт}}{129,37 \text{ кВт}} = 15,46, \quad (8)$$

где  $N$  – количество теплиц.

Из расчёта видно, что данный котел сможет отопить 15 теплиц. Теперь рассчитаем площадь, которую занимают эти теплицы.

$$S_{\text{теплицы}} = 100 \text{ м} \cdot 10 \text{ м} = 1000 \text{ м}^2; \quad (9)$$

$$S = N \cdot S_{\text{теплицы}} = 15 \cdot 1000 = 15000 \text{ м}^2 = 1,5 \text{ га}. \quad (10)$$

Как видно, данная установка сможет отопить 1,5 гектара теплиц при белорусском климате.

На рисунке 2 показан пример тепличного комплекса.



Рисунок 2 – Пример тепличного комплекса [8]

Также можно использовать данную установку для выработки электроэнергии с помощью двигателя Стирлинга. КПД двигателя Стирлинга достигает значений в 40-45 %. [9] Мы предлагаем два варианта:

1. Использовать теплоту сгорания соломы для нагрева горячей стороны двигателя Стирлинга и максимальной выработки электроэнергии, тепловая энергия будет забираться у охлаждающей воды.

Рассчитаем электрическую мощность и энергию, которую выработает станция за сутки:

$$P_{\text{электрическая 1}} = Q_{\text{котла}} \cdot \eta = 2000 \text{ кВт} \cdot 0,4 = 800 \text{ кВт}; \quad (11)$$

$$E = P_{\text{электрическая 1}} \cdot 24 \text{ ч} = 800 \text{ кВт} \cdot 24 \text{ ч} = 19200 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (12)$$

Можно рассчитать какое количество домов может обеспечить одна установка.

Для расчёта возьмём семью из 4 человек, живущую в доме с электрической плитой. В таких условиях норма потребления на одного человека составляет 90 кВт·ч в месяц или 3 кВт·ч в сутки [10]. За количество домов возьмем  $N$ .

$$N = \frac{E}{E_{\text{дома}}} = \frac{19200 \text{ кВт}\cdot\text{ч}}{4\cdot 3 \text{ кВт}\cdot\text{ч}} = 1600 \text{ домов.} \quad (13)$$

Как видно из расчёта, данная установка сможет обеспечить электроэнергией 1600 домов, то есть крупный посёлок. Остатки тепловой энергии можно использовать для нужд отопления.

2. Работа двигателя Стирлинга от теплоты уходящих газов.

Температура в топке котла составляет 800-900 °С, а уходящих газов 100-180 °С, то есть в 5 раз меньше [11]. Получается, что такая установка будет вырабатывать в 5 раз меньше электроэнергии, но будет давать тепловой энергии практически столько же, сколько при обычной эксплуатации.

$$P_{\text{электрическая } 2} = \frac{P_{\text{электрическая } 1}}{5} = \frac{800 \text{ кВт}}{5} = 160 \text{ кВт;} \quad (14)$$

$$E = P_{\text{электрическая } 2} \cdot 24 \text{ ч} = 160 \text{ кВт} \cdot 24 \text{ ч} = 3840 \text{ кВт}\cdot\text{ч;} \quad (15)$$

$$N = \frac{E}{E_{\text{дома}}} = \frac{3840 \text{ кВт}\cdot\text{ч}}{4\cdot 3 \text{ кВт}\cdot\text{ч}} = 320 \text{ домов.} \quad (16)$$

Из расчётов видно, что в таком режиме работы установка сможет обеспечивать электроэнергией 320 домов, а тепловой энергии хватит на тепличный комплекс, либо на установку для сушки зерна, отопления посёлка. Эти расчёты доказывают, что установка на соломе может обеспечивать электричеством и теплом большое количество объектов.

### Заключение

Из изложенного выше видно, что установки по сжиганию соломы с двигателями Стирлинга имеют ряд преимуществ. Они влияют на экологию меньше угольных или газовых станций, также солома при сжигании выделяет столько же CO<sub>2</sub>, сколько при гниении. Такие установки могут обеспечивать отоплением большие тепличные комплексы, колхозы, населенные пункты от деревень до агрогородков. Использование соломы поможет снизить потребление классических источников топлива, тем самым растянув их запасы на больший срок, и улучшить экологическую обстановку.

### Литература

1. Development of the Technology for Combustion of Large Bales Using Local Biomass [Электронный ресурс] / Development of the Technology for Combustion of Large Bales Using Local Biomass. – Режим доступа: <https://www.intechopen.com/chapters/37933/>. – Дата доступа: 11.10.2024.
2. Котлы для сжигания тюков соломы мощностью от 100 до 1000 кВт [Электронный ресурс] / Котлы для сжигания тюков соломы мощностью от 100 до 1000 кВт. – Режим доступа: <https://www.steptrutnov.cz/ru/котлы-на-биомассе/step-ks-100-1000-kw-ru/>. – Дата доступа 11.10.2024.
3. Котел на соломе Wichlacz GKS 2000 кВт [Электронный ресурс] / Котел на соломе Wichlacz GKS 2000 кВт. – Режим доступа:

<https://vodolex.com.ua/ru/catalog/kotel-na-solome-wichlacz-gks-2000-kvt/> /. – Дата доступа 11.10.2024.

4. Возобновляемые источники энергии в России. Солома [Электронный ресурс] / Возобновляемые источники энергии в России. Солома. – Режим доступа: [https://heatclub.ru/articles/article\\_70.html](https://heatclub.ru/articles/article_70.html) /. – Дата доступа 11.10.2024.

5. Как рассчитать необходимую мощность отопления теплицы? [Электронный ресурс] / Как рассчитать необходимую мощность отопления теплицы? – Режим доступа: <https://5energy.ru/blog/kak-rasschitat-neobhodimuyu-moshchnost-otopleniya-teplicy/> /. – Дата доступа 11.10.2024.

6. Оптимальная температура воздуха в теплице – максимальная и минимальная [Электронный ресурс] / Оптимальная температура воздуха в теплице – максимальная и минимальная. – Режим доступа: <https://vesnasad.ru/temperatura-v-teplice/> /. – Дата доступа 11.10.2024.

7. Климат и погода в Беларуси [Электронный ресурс] / Климат и погода в Беларуси. – Режим доступа: <https://www.belarus.by/ru/about-belarus/climate-and-weather#:~:text=Средняя%20температура%20в%20январе%20колеблется,нуля%20сохраняется%20более%20трети%20года/> /. – Дата доступа 11.10.2024.

8. Тепличный комбинат "Берестье" ОАО [Электронный ресурс] / Тепличный комбинат "Берестье" ОАО. – Режим доступа: <https://www.belarusinfo.by/ru/poisk/4624.html> /. – Дата доступа 11.10.2024.

9. Наследники Джона Д. Рокфеллера избавляются от нефтяных активов [Электронный ресурс] / Наследники Джона Д. Рокфеллера избавляются от нефтяных активов. – Режим доступа: <https://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=6158> /. – Дата доступа 11.10.2024.

10. Информация по сбыту для бытовых потребителей [Электронный ресурс] / Информация по сбыту для бытовых потребителей. – Режим доступа: <https://www.energo.by/content/deyatelnost-obedineniya/sbytovaya-deyatelnost/informatsiya-dlya-bytovykh-potrebiteley/> /. – Дата доступа 11.10.2024.

11. Котел ALTEP AGRO [Электронный ресурс] / Котел ALTEP AGRO. – Режим доступа: <https://alterp.by/produksiya/alterp-agro/> /. – Дата доступа 11.10.2024.