

Тип статьи: научная
УДК 631.171
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-55-60

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ВАРОЧНОГО КОТЛА С ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ РАСХОДА ГАЗА

*Анатолий Михайлович Шувалов*¹, *Алексей Николаевич Машков*²,
^{1,2} *Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и
нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Российская Федерация*
¹ vniitin@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Анатолий Михайлович Шувалов, vniiti@mail.ru
Corresponding author: Anatoliy Shuvalov, vniitin@mail.ru

Реферат. До недавнего времени отопление сельских домов осуществлялось каменным углем или дровами. Корм животным и пищу готовили на электрических плитах или на газовых плитах с газобаллонным топливом. Это трудоёмкие и энергозатратные технологии. Интенсивно развивающаяся газификация села позволяет повсеместно переводить отопление сельских домов и приготовление кормов и пищи на природный газ. В представленной работе основным оценочным показателем варочного котла принят коэффициент полезного действия. Приведены уравнения, описывающие полезный расход энергии на приготовление продукта в варочном котле, а также потери теплоты на нагрев металлоконструкций, на компенсацию потерь энергии от кожуха котла, на продувку паровой рубашки, потери энергии с уходящими газами. Определён расход энергии на единицу продукции при загрузке котла от 100 до 20 л. Выявлено, что КПД котла уменьшается почти в 2 раза, если вместо 100 л загрузить варочную ёмкость всего лишь на 20 л. По экспериментальным данным определена полезная составляющая энергии, расходуемой на нагрев до кипения 100 л воды и определён КПД котла в автоматическом и в ручном режиме, который составил: в автоматическом режиме $KPD_a=0,84$, в ручном $KPD_p=0,7$. С учетом экспериментальных данных определены общий расход газа на полный цикл приготовления корма в автоматическом и ручном режиме. Определены годовые эксплуатационные затраты от сжигания газа в варочном котле в автоматическом и ручном режиме и экономию затрат на энергообеспечение процесса приготовления корма.

Ключевые слова: газ, варочный котёл, энергия, коэффициент полезного действия, уровень загрузки, потери теплоты, эксплуатационные затраты.

ECONOMIC EFFICIENCY OF THE ENERGY SUPPLY SYSTEM OF A COOKER WITH PROPORTIONAL GAS FLOW CONTROL

*Anatoliy Shuvalov*¹, *Alexey Mashkov*²
^{1,2} *All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture,
Tambov, Russian Federation*
¹ vniitin@mail.ru

Abstract. Until recently, heating of rural houses was carried out with coal or wood. Animal feed and food were prepared on electric stoves or on gas stoves with gas cylinder fuel. These are labor-intensive and energy-consuming technologies. The intensively developing gasification of rural areas makes it possible to universally transfer the heating of rural houses and the preparation of feed and food to natural gas. In the presented work, the main evaluation indicator of the digester is the efficiency factor. Equations are given that describe the useful energy consumption for preparing the product in a digester, as well as heat losses for heating metal structures, for compensating for energy losses from the boiler casing, for purging the steam jacket, and energy losses with flue gases. The energy consumption per unit of production was determined when loading the boiler from 100 to 20 liters. It has been revealed that the

efficiency of the boiler decreases by almost 2 times if, instead of 100 liters, the cooking tank is loaded with only 20 liters. Based on experimental data, the useful component of the energy spent on heating 100 liters of water to a boil was determined and the boiler efficiency in automatic and manual mode was determined, which was: in automatic mode, efficiency = 0.84, in manual mode, efficiency = 0.7. Taking into account experimental data, the total gas consumption for the full cycle of feed preparation in automatic and manual modes was determined. The annual operating costs from burning gas in a digester in automatic and manual modes and cost savings on energy supply for the feed preparation process were determined.

Keywords: gas, digester, energy, efficiency, load level, heat loss, operating costs.

Для цитирования: Шувалов А.М., Машков А.Н. Экономическая эффективность системы энергообеспечения варочного котла с пропорциональным регулированием расхода газа // Наука в Центральной России. 2024. Т. 68, № 2. С. 55-60. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-55-60>.

For citation: Shuvalov A., Mashkov A. Economic efficiency of the energy supply system of a cooker with proportional gas flow control. *Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia*: 2024; 68(2): 55-60. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-55-60>.

Введение. Почти каждый домовладелец в сельской местности имеет личное подсобное хозяйство (ЛПХ) и значительная доля природного газа тратится не только на отопление, но и на приготовление пищи и кормов для животных и птицы. Для этого используются в основном газовые плиты. Практика показывает, что в крупных ЛПХ, где выращиваются 3-5 голов свиней, 2-3 коровы, 15-20 кур выгодно готовить корм не на газовых плитах, а в варочных газоиспользующих котлах.

Однако изобилие природного газа, его дешевизна по сравнению с другими энергоносителями – это не означает вседозволенное и расточительное его использование. Здесь же следует указать, что в России энергоёмкость производства товаров и услуг в 2 раза больше, чем в странах западной Европы. В этой связи с целью экономии энергии и энергозатрат в 2010 году вступил в силу Федеральный закон №261 – ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности...». В ФГБНУ ВНИИТИН проводятся исследования по разработке энергоэкономного газоиспользующего варочного котла с регулированием расхода газа пропорционально потребляемому тепловому потоку в процессе приготовления корма или пищи [1].

Цель работы: оценить снижение энергозатрат варочных котлов в процессе приготовления пищи или корма животным в различных режимах их работы.

Материалы и методы. Для расчета составляющих теплового баланса: полезной энергии на варку содержимого варочной ёмкости, потерь теплоты на разогрев металлоконструкций, теплопотерь от кожуха котла в окружающую среду, на продувку топочного устройства, от химического недожога газового топлива применены методы системного анализа и синтеза существующих знаний в области теплотехники [2-8].

Для экспериментального определения КПД использован действующий экспериментальный образец газоиспользующего варочного котла с регулированием расхода газа пропорционально потребляемому тепловому потоку

Результаты и их обсуждение. Основным показателем, определяющим эффективность работы газоиспользующего варочного котла, является коэффициент полезного действия. Общеизвестно, что КПД для газоиспользующих котлов определяется делением полезно затраченной энергии на разогрев корма в варочной ёмкости до кипения и последующей варки на общую энергию, включающую полезную составляющую энергии и суммарные потери, возникающие в процессе работы котла. Применительно к газоиспользующему варочному котлу полезную составляющую определяют по формуле

$$Q = c m (t - t_0),$$

где Q – полезная энергия на приготовление корма, Вт·ч; c – удельная теплоёмкость приготавливаемого корма (продукта), Вт/кг·С; m – масса корма, кг; t_k и t_n – конечная и начальная температура приготавливаемого корма, С. Следует отметить, что удельная теплоёмкость корма

может значительно варьировать в зависимости от его состава, что может влиять на точность расчетов. Кроме того при определении КПД котла, возникают трудности, связанные с определением различных потерь энергии, которыми являются

$$Q_{\text{общ}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

где $Q_{\text{общ}}$ - суммарные потери энергии на приготовление корма, Вт-ч;

Q_1 - энергия израсходованная на нагрев металлоконструкций корпуса котла, парогенератора, варочной ёмкости, Вт-ч; Q_2 - энергия на компенсацию потерь теплоты через ограждающие конструкции котла (кожух и др), Вт-ч; Q_3 - потери энергии на продувку паровой рубашки в начальный период работы котла, Вт-ч; Q_4 –потери энергии с уходящими в атмосферу газами, Вт-ч; Q_5 – потери энергии от химического недожога топлива, возникающего в результате нарушения оптимального состава смеси газа и воздуха, Вт-ч.

В сельской местности в личных подсобных и фермерских хозяйствах, а также в столовых сельхозпредприятий, сельских школ и больниц по многим причинам возникает потребность заполнять у столитрового варочного котла варочную ёмкость на половину и меньше. А так как потребляемая энергия на разогрев металлоконструкций котла и на компенсацию теплопотерь от его кожуха в окружающую среду почти не зависят от степени заполнения варочной ёмкости, то потери энергии как при 100- процентном заполнении варочной ёмкости, так при малом заполнении одинаковые. Следовательно, расход энергии на единицу приготавливаемого корма или другого продукта будет изменяться в зависимости от уровня заполнения варочной ёмкости, то есть чем больше в варочной ёмкости приготавливаемого продукта, тем меньше расход энергии на единицу приготавливаемого продукта и на оборот, тем меньше заполнена варочная ёмкость, тем больше расход энергии на единицу приготавливаемого корма или пищи.

Рассмотрим, как изменяется КПД при загрузки варочной ёмкости от 100л до 20л. Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1. Изменение КПД котла при различной загрузки варочной ёмкости

Полезный расход энергии, кВт-ч	Полный расход энергии, кВт-ч	КПД	Загрузка варочной ёмкости, л
9,86	11,6	0,84	100
8,874	11,614	0,764	90
7,88	10,62	0,74	80
5,916	8,656	0,683	60
3,946	6,684	0,59	40
1,972	4,46	0,442	20

Как следует из результатов расчета КПД уменьшается пропорционально уменьшению загрузки варочной ёмкости: от 0,84 до 0,442 при загрузке от 100л до 20л, то есть КПД уменьшился почти в 2 раза. Это следует учитывать персоналу, использующему такие варочные котлы.

Наиболее точно определить КПД газоиспользующего варочного котла можно по результатам экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования расхода газа варочным котлом были проведены в ручном и автоматическом режиме с использованием регулятора расхода газа, выполненного на базе полупроводниковых термоэлектрических элементов. По результатам экспериментальных исследований расход газа на нагрев 100л воды до кипения составляет: в ручном режиме $L_p = 747$ л, в автоматическом расхода газа $L_a = 618$ л. Время нагрева воды до кипения в ручном режиме равно 84 мин, в автоматическом – 92 мин. Для определения по экспериментальным данным составляющей полезной энергии необходимо отделить энергию варочного котла, расходуемую в режиме тихого кипения, от теплопотерь.

По данным эксперимента расход газа на компенсацию теплопотерь и поддержание тихого кипения в ручном режиме составляет $L = 1,5 \cdot 84 = 126$ л, в автоматическом - $L = 1,5 \cdot 92 = 138$ л. Отделим энергию тихого кипения от теплопотерь: на поддержание тихого кипения потребуется

перепад температур в пределах 5 °С и если 105 С обеспечивается мощностью 9л/мин, то на 5 °С нужно 0,43л/мин. Следовательно теплотери в автоматическом режиме составят

$$L_{\text{ав.пот}} = 92_{\text{мин}} \cdot (1,5 - 0,43) = 92 \cdot 1,07 = 98,44 \text{ л.}$$

Полезная составляющая определится:

$$L_{\text{полез}} = L_{\text{общ}} - L_{\text{пот}} = 618 - 98,44 = 519,56 \text{ л, тогда}$$

КПД на разогрев продукта до кипения в автоматическом режиме определится:

$$\text{КПД}_a = 519,56 / 618 = 0,84 \text{ или } 84\%.$$

Важно отметить, что полезная составляющая энергии на разогрев продукта и в автоматическом и в ручном режиме одинаковая.

Тогда КПД в ручном режиме:

$$\text{КПД}_p = 519,56 / 747 = 0,695 \text{ или } 70\%.$$

Следует отметить, что в ручном режиме расход газа в единицу времени за период нагрева постоянный, а при автоматическом регулировании расход газа на определённом временном интервале уменьшается пропорционально потребляемому тепловому потоку, то есть в ручном режиме наблюдается перерасход газа.

Важно отметить, что все выше изложенные материалы относятся к изучению расхода газа варочном котлом в режиме разогрева продукта до кипения. Это связано с тем, что варочным котлам присуща одна важная особенность: в начале нагрева температурный напор максимальный, так как температура продукта минимальная, а при закипании температурный напор минимальный, следовательно, потребляемый тепловой поток изменится в процессе нагрева от максимума до минимума. И чтобы обеспечивать такой режим разработана и исследована система пропорционального регулирования расхода газа.

И так как энергия, вырабатываемая газовой горелкой варочного котла, используется не только на разогрев продукта до кипения, но и на варку продукта в течение необходимого времени, то рассмотрим вопрос потребления газа варочным котлом за полный цикл: разогрев до кипения плюс варка продукта. Варка продукта в варочном котле с расходом газа в автоматическом режиме осуществляется на минимальной мощности в режиме тихого кипения и зависит от длительности варки продукта

$$L_v = T_v \cdot Q_{\text{тк}}$$

где T_v – время варки продукта, мин; $Q_{\text{тк}}$ – тепловой поток варочного котла в режиме тихого кипения, л/мин.

Общий расход газа

$$L_{\text{общ}} = L_{\text{рк}} + L_v,$$

где $L_{\text{рк}}$ – расход газа на разогрев до кипения, л /мин; L_v – расход газа на варку продукта после его закипания, л/мин.

Экспериментальные исследования показали, что расход газа на разогрев до кипения в регулируемом режиме изменяется не линейно, поэтому принимается по экспериментальным данным.

Как следует из литературы [9], время варки продуктов составляет широкий диапазон от 0,5 до 3-х часов. Некоторые из них приведены ниже в таблице 2

Таблица 2. Время варки продуктов

п/п	Наименование продукта	Время приготовления, ч
1	Говядина	1,5 - 2
2	Свинина	1 - 1,5
3	Курица домашняя	2 - 3
4	Цыплёнок бройлера	40 мин - 1,5 ч
5	Индейка	1 - 1,5
6	Перловка	50 мин
7	Горох	1 - 2
8	Фасоль	1,5 - 2
9	Пшено	45 мин

Исходя из данных приведённых в таблице 2 для расчета расхода газа примем верхний предел по времени приготовления продукта 3 ч (180 мин). С учетом этих данных, а так же результатов эксперимента определим суммарный расход газа, то есть на разогрев до кипения (618 л) и тихое кипение (1,5 л/мин) в течение 180 мин в автоматическом режиме до полной готовности продукта:

$$L_{\text{общ.а}} = 618 + 1,5 \cdot 180 = 888 \text{ л}$$

В ручном режиме

$$L_{\text{общ.р}} = 747 + 9 \cdot 180 = 2367 \text{ л}$$

За год при двух разовой варки в день в автоматическом режиме

$$L_{\text{общ.а}} = 888 \cdot 2 \cdot 365 = 648240 \text{ л} = 648,2 \text{ м}^3$$

В ручном режиме за год расход газа составляет

$$L_{\text{р.г}} = 2367 \cdot 2 \cdot 365 = 1\,727\,910 \text{ л} = 1727,9 \text{ м}^3$$

По данным «Омскгоргаз» [10] цена 1 м^3 сжиженного газа составляет 75р.

Тогда эксплуатационные затраты за год от сжигания газа варочным котлом при работе в автоматическом режиме составят

$$\mathcal{E}_a = 648,2 \cdot 75 = 48615 \text{ руб}$$

В ручном режиме

$$\mathcal{E}_p = 129540 \text{ руб}$$

Экономия затрат на энергообеспечение процесса приготовления корма за год по сравнению с ручным режимом составляет

$$\mathcal{E} = 129540 - 48615 = 80925 \text{ руб.}$$

Если принять затраты на устройство автоматического регулирования газа равными затратам, связанными с дополнительными затратами на обслуживание котла (ручной розжиг, затраты времени персонала на уменьшение, увеличение расхода газа в процессе варки и др.), то экономия энергзатрат является годовым экономическим эффектом, то есть годовой экономический эффект равен:

$$G_3 = 80925 \text{ руб на один варочный котёл}$$

Выводы:

1. Потери теплоты при различной загрузке варочного ёмкости почти одинаковые, в результате при уменьшении загрузки КПД так же уменьшается от 0,84 до 0,442. Это следует учитывать персоналу, обслуживающему такие варочные котлы.

2. Годовые эксплуатационные затраты на использование газа варочным котлом в ручном режиме в 2,6 раза больше, чем при применении автоматического регулирования расхода газа пропорционально потребляемому тепловому потоку.

Список источников

1. Патент на изобретение. №2708097 РФ. СПК А47J 27/06. Котёл кормоварочный /Шувалов А.М., Машков А.Н., Чернов Д.С.; заявитель и патентообладатель ФГБНУ ВНИИТиН. Оpubл. 04.12.2019. Бюл. №34.
2. Ерохин В.Г. и др. Основы термодинамики и теплотехники. – М.: Машиностроение, 1980. – 224 с.
3. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Энергия, 1973. – 303 с.
4. Михеев М.А. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 346 с.
5. Исаченко В.П. Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1981. – 416 с.
6. Беляев М.И. Тепловое оборудование. – М.: Экономика, 1990. – 559 с.
7. Литвина Л.С. Фролова З.С. Тепловое оборудование общественного питания. – М.: Экономика, 1987. – 272 с.
8. Богданов Г.А. Оборудование общественного питания. – М.: Экономика, 1991. – 317 с.

9. nyankin.ru>advice... (дата обращения: 10.03.2024).
10. Omskgorgaz.ru>akt-gaz (дата обращения: 12.03.2024).

References

1. Patent for an invention. No. 2708097 RF. SPK A47J 27/06. Feed boiler / Shuvalov A.M., Mashkov A.N., Chernov D.S.; applicant and patent holder FGBNU VNIITiN. Publ. 04.12.2019. Bull. No. 34.
2. Erokhin V.G. and others. Fundamentals of thermodynamics and heat engineering. – М.: Mechanical Engineering, 1980. – 224 p.
3. Nashchokin V.V. Engineering thermodynamics and heat transfer. – М.: Energy, 1973. – 303 p.
4. Mikheev M.A. Basics of Heat Transfer. – М.: Energy, 1977. – 346 p.
5. Isachenko V.P. Osipova V.A., Sukomel A.S. Heat transfer. – М.: Energy, 1981. – 416 p.
6. Belyaev M.I. Thermal equipment. – М.: Economics, 1990. – 559 p.
7. Litvina L.S. Frolova Z.S. Thermal equipment for public catering. – М.: Economics, 1987. – 272 p.
8. Bogdanov G.A. Catering equipment. – М.: Economics, 1991. – 317 p.
9. nyankin.ru>advice... (дата обращения: 10.03.2024).
10. Omskgorgaz.ru>akt-gaz (дата обращения: 12.03.2024).

Информация об авторах

А.М. Шувалов - доктор технических наук, профессор; А. Н. Машков - кандидат технических наук.

Information about the authors

A.Shuvalov – Full Doctor of technical sciences, Professor; A. Mashkov - Candidate of Technical Sciences.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 01.04.2024 Принята к публикации (Accepted): 23.04.2024