

УДК 662.951

**АНАЛИЗ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТОПЛИВА МОДУЛИРУЕМОЙ И
ОДНОСТУПЕНЧАТОЙ ГОРЕЛОК
ANALYSIS OF FUEL CONSUMPTION OF MODULATED AND SINGLE-
STAGE BURNERS**

Н.В. Рачковский, Д.В. Самандук

Научный преподаватель – Ю.П. Ярмольчик, к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

N. Rachkovsky, D. Samanduk

Supervisor – Yu. Yarmolchick, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk

***Аннотация:** Предметом исследования данной статьи является сравнение потребления топлива при применении двух способов регулирования мощности горелок и сравнительная оценка их эффективности.*

***Abstract:** The subject of this article is a comparison of fuel consumption when using two methods of regulating burner power and a comparative assessment of their efficiency.*

***Ключевые слова:** потребление топлива, анализ, эффективность .*

***Keywords:** artificial intelligence, electrical engineering, expert system.*

Введение

В современных системах отопления и промышленных процессах сжигание топлива играет ключевую роль в обеспечении эффективности и надежности работы оборудования. Горелки, как основные устройства, отвечающие за процесс сжигания, имеют разнообразные конструкции, принципы работы, способы регулирования мощности, что влияет как на их производительность, экономичность и удобство эксплуатации, так и на стабильность работы, износ и другие эксплуатационные характеристики огнетехнических теплогенераторов.

В данной работе приведен сравнительный анализ удельного потребления топлива при применении модулируемой горелки и горелки с одноступенчатым управлением.

Целью данной работы является сравнения относительной эффективности горелок с двумя типами регулирования мощности – модулируемой и одноступенчатой. Изучение сравнительных характеристик горелок позволит более точно определить их область применения и оптимальные условия использования. Результаты исследования могут быть полезны как для специалистов в области отопительных технологий, так и для конечных пользователей, стремящихся оптимизировать свои системы сжигания топлива.

Основная часть

Анализируя график, можем разбить его на 3 части, то есть на 3 различные функции.

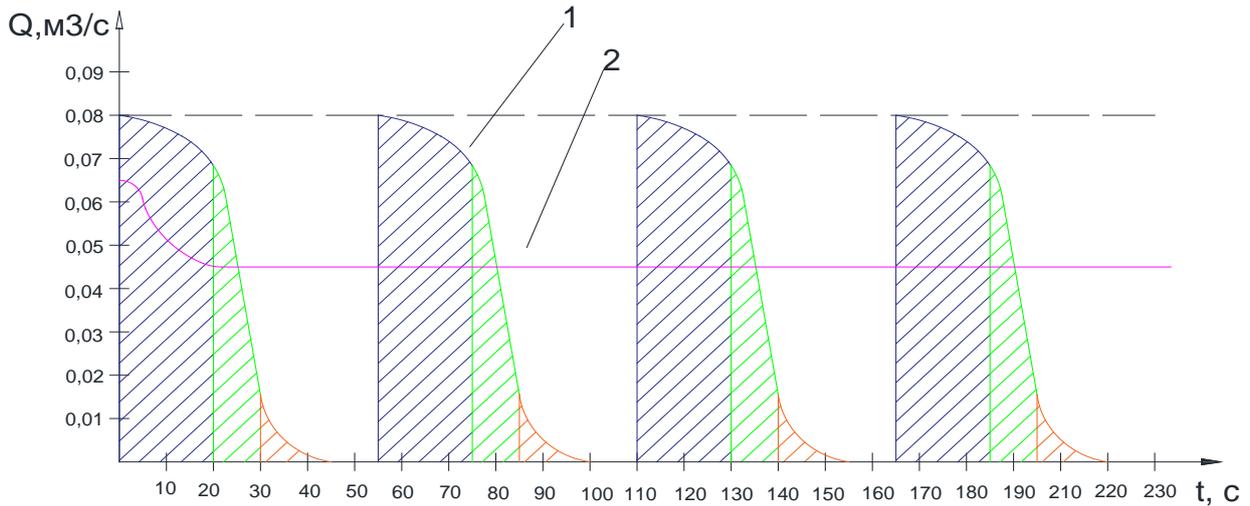


Рисунок 1 – График потребления топлива модулируемой (2) и одноступенчатой горелок (1)

Определение параметра k.

На первом отрезке кривой (участок синего цвета) рассчитаем расход топлива по обратной экспоненциальной функции:

$$f(x) = 1 - e(-x) \tag{1}$$

Для этого участка функция будет выглядеть следующим образом:

$$Q(t) = 0.08 \cdot (1 - \exp(-k(t - 10))) \tag{2}$$

Для определения параметра k по графику можно увидеть, что на 20-й секунде расход составляет 0.065 м³/с. Подставим это значение в уравнение:

$$Q(20) = 0.08 \cdot (1 - \exp(-k(20 - 10))) = 0.068$$

Решим это уравнение для k:

$$\begin{aligned} 0.068 &= 0.08 \cdot (1 - \exp(-10k)) \gg \\ \frac{0.068}{0.08} &= 1 - \exp(-10k) \gg \\ \exp(-10k) &= 1 - \frac{0.068}{0.08} = 1 - 0.85 = 0.15 \end{aligned}$$

Теперь возьмем натуральный логарифм обеих сторон:

$$-10k = \ln(0.15)$$

В итоге параметр k равен:

$$k = \frac{-\ln(0.15)}{10} \approx 0.0733$$

Расход топлива на интервале от 0 до 20 секунд.

Определим функцию расхода топлива на интервале от 0 до 20 секунд:

$$Q(t) = 0.08 \cdot (1 - \exp(-0.0733(t - 10))), 0 \leq t \leq 20$$

Интегрирование для расчета расхода.

Рассчитаем расход топлива за первые 20 секунд:

$$W_1 = \int_0^{10} \frac{0.08}{10t} dt + \int_{10}^{20} Q(t) dt \quad (3)$$

Интеграл на первом интервале (от 0 до 10 секунд):

$$W_1 = \int_0^{10} \frac{0.08}{10t} dt = \left(\frac{0.08}{20} \ln t^2 \right)_0^{10} = \frac{0.08}{20(100)} = 0,4 \text{ м}^3/\text{с}$$

Интеграл на втором интервале (от 10 до 20 секунд). Для интегрирования функции $Q(t)$:

$$W_1^{(2)} = \int_{10}^{20} 0.08(1 - \exp(-0.0733(t - 10))) dt$$

Разделим интеграл:

$$W_1^{(2)} = \int_{10}^{20} 0.08 dt - \int_{10}^{20} 0.08 \cdot \exp(-0,0733(t - 10)) dt$$

Первый интеграл:

$$\int_{10}^{20} 0.08 dt = 0.08 \cdot (20 - 10) = 0.08 \cdot 10 = 0.8 \text{ м}^3/\text{с}$$

Второй интеграл можно решить с помощью подстановки:

– пусть $u = t - 10$,

– тогда $du = dt$,

и пределы интегрирования изменяются с $t = 10$ на $u = 0$, а с $t = 20$ на $u = 10$. Получим итоговую формулу:

$$W_1^{(2)} = -0.08 \int_0^{10} e^{(-0.0733u)} du$$

Решим этот интеграл:

$$\int_0^{10} e^{-au} du = \frac{-1}{ae^{-au}}, \text{ где } a = 0.0733:$$

$$W_1^{(2)} = -0.08 \left(\left[\frac{-1}{0,0733} e^{(-0.0733u)} \right]_0^{10} \right) = -0.08 \left(\left[\frac{-1}{0.0733} \cdot e^{(-0,733)} - e^0 \right] \right) =$$

$$= -0.08 \left(\left[\frac{-1}{0.0733} \cdot e^{(-0,733)} - 1 \right] \right)$$

Теперь подставим значения: $e^{(-0.733)} \approx 0.4804$:

$$W_1^{(2)} = -0.08 \left(\left[\frac{-1}{0.0733} \cdot (0.4804 - 1) \right] \right) = 0.08 \cdot 1 - \frac{0.4804}{0.0733} = 0.08 \cdot \frac{0.5196}{0.0733}$$

$$= 0.08 \cdot 7.0917 \approx 0.5673 \text{ м}^3$$

Общий расход топлива за первые 20 секунд.

Сложим оба результата:

$$W_1 = W_1^{(1)} + W_1^{(2)} = 0.4 + 0.5673 \approx 0.9673 \text{ м}^3$$

Итог Таким образом, общий расход топлива за первые 20 секунд составляет примерно 0.9673 м^3 .

Интервал от 20 до 30 секунд.

На этом интервале (участок зеленого цвета) расход топлива изменяется линейно от $0.068 \text{ м}^3/\text{с}$ до $0.015 \text{ м}^3/\text{с}$. Линейная функция может быть записана в виде:

$$Q(t) = mt + b \quad (4)$$

Для нахождения коэффициентов m (наклон) и b (свободный член), используем два известных значения. В момент времени $t = 20$ секунду:

$$Q(20) = 0.068 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

В момент времени $t = 30$ секунду:

$$Q(30) = 0.015 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Находим наклон m :

$$m = Q(30) - \frac{Q(20)}{30} - 20 = 0.015 - \frac{0.068}{30} - 20 = \frac{-0.053}{10} = -0.0053$$

Теперь подставим одно из значений, чтобы найти b . Используем значение в момент времени $t = 20$:

$$\begin{aligned} 0.065 &= -0.0053 \cdot 20 + b \gg \\ b &= 0.065 + 0.13 = 0.195 \end{aligned}$$

Таким образом, функция расхода топлива на интервале от 20 до 30 секунд:

$$Q(t) = -0.0053t + 0.195, \quad 20 \leq t < 30$$

Расчет расхода топлива на интервале от 20 до 30 секунд.

Вычислим расход топлива за этот интервал:

$$W_1 = \int_{20}^{30} Q(t)dt = \int_{20}^{30} (-0.0053t + 0.195)dt \quad (5)$$

Разделим интеграл:

$$W_1 = \int_{20}^{30} -0.0053tdt + \int_{20}^{30} 0.195tdt$$

Первый интеграл:

$$\begin{aligned} \int_{20}^{30} -0.0053t dt &= -0.0053 \cdot \left(\left[\frac{t^2}{2} \right]_{20}^{30} \right) = -0.0053 \cdot \left(\left(\frac{30^2}{2} - \frac{20^2}{2} \right) \right) \\ &= -0.0053 \cdot \left(\left(\frac{900}{2} - \frac{400}{2} \right) \right) = -0.0053 \cdot (450 - 200) \\ &= 0.0053 \cdot 250 = -1.325 \text{ м}^3 \end{aligned}$$

Второй интеграл:

$$\int_{20}^{30} 0.195 dt = 0.195 \cdot (30 - 20) = 0.195 \cdot 10 = 1.95$$

Теперь сложим оба результата:

$$W_1 = -1.325 + 1.95 = 0.625 \text{ м}^3$$

Интервал от 30 до 45 секунд.

На данном интервале (участок оранжевого цвета) расход топлива изменяется по экспоненциальной функции от $0.015 \text{ м}^3/\text{с}$ до $0 \text{ м}^3/\text{с}$. Экспоненциальная функция представлена в следующем виде:

$$Q(t) = Q_0 e^{-kt} \quad (6)$$

где $Q_0 = 0.015 \text{ м}^3/\text{с}$, а k – это константа, которую нужно определить.

Известно, что в момент времени $t = 45 \text{ с}$, расход топлива должен быть равен нулю. Поскольку экспоненциальная функция стремится к нулю, мы можем выбрать k так, чтобы это соответствовало значению на конце интервала. Находим значение в момент времени $t=45 \text{ с}$:

$$Q(45) = Q_0 e^{-k(45-30)} = 0 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Поскольку экспонента никогда не равна нулю, мы можем просто использовать значение на $t=30 \text{ с}$: Используем уравнение для нахождения значения: В момент времени $t=30 \text{ с}$:

$$Q(30) = Q_0 e^{-k(30-30)} = Q_0 = 0.015 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Мы можем принять $k = (\ln(2))/15$, чтобы достигнуть значения нуля к моменту времени $t=45 \text{ с}$. Таким образом, функция будет иметь вид:

$$Q(t) = 0.015 e^{\left(\frac{-\ln(2)}{15(t-30)} \right)}, \quad 30 < t < 45.$$

Расчет расхода топлива на интервале от 30 до 45 секунд.

Вычислим расход топлива за этот интервал:

$$W_2 = \int_{30}^{45} Q(t) dt = \int_{30}^{45} 0.015 e^{\left(\frac{-\ln(2)}{15(t-30)} \right)} dt$$

Используем замену переменной:

пусть: $u = t - 30$, тогда $du = dt$, пределы интегрирования изменяются с $t = 30$ на $u = 0$, а с $t = 45$ на $u = 15$.

Тогда интеграл приобретает вид:

$$\begin{aligned} W_2 &= \int_0^{15} 0.015 e^{\left(\frac{-\ln(2)}{15u}\right)} du = 0.015 \cdot \left[\frac{-15}{\ln(2)} e^{\left(\frac{-\ln(2)}{15u}\right)} \right]_0^{15} \\ &= 0.015 \cdot \frac{(-15)}{\ln(2)(e^{-1} - e^0)} = 0.010 \cdot \frac{(-15)}{\ln(2)(e^{-1} - e^0)} \end{aligned}$$

Значение $e^{-1} \approx 0.367879$, подставляем значения:

$$\begin{aligned} W_2 &= 0.015 \cdot \frac{(-15)}{\ln(2)(0.367879 - 1)} = 0.015 \cdot \frac{(-15)}{0.693147 \cdot (-0.632121)} \\ &= 0.015 \cdot 15 \cdot \frac{0.632121}{0.693147} = 0.015 \cdot 13.682 = 0.2052 \text{ м}^3. \end{aligned}$$

Общий расход топлива.

Сложим результаты для обоих интервалов:

- расход от 0 до 20 секунд $\Rightarrow W_1 \approx 0.9673 \text{ м}^3$ (участок синего цвета)
- расход от 20 до 30 секунд $\Rightarrow W_2 \approx 0.625 \text{ м}^3$ (участок зеленого цвета),
- расход от 30 до 45 секунд $\Rightarrow W_3 \approx 0.2052 \text{ м}^3$ (участок оранжевого цвета).

Общий расход топлива составляет:

$$W_{\text{общий}}^{\text{цикл}} = W_1 + W_2 + W_3 = 0.9673 + 0.625 + 0.2052 \approx 1.7975 \text{ м}^3.$$

Итог Общий расход топлива за указанные интервалы составляет примерно 1.7975 м^3 . В данном исследовании анализ проводится на промежутке 450 с, то есть за это время горелка с одноступенчатым регулированием совершит 8 циклов Суммарное потребление газа будет равно:

$$W_{\text{общий}} = 1.7975 \text{ м}^3 \cdot 8 = 14.388 \text{ м}^3.$$

Расход топлива от 0 до 20 секунд модулируемой горелки.

Здесь расход уменьшается экспоненциально от $0.065 \text{ м}^3/\text{с}$ до $0.045 \text{ м}^3/\text{с}$. Расход газа от 20 до 450 секунд на данном участке графика расход остается постоянным на уровне $0.045 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для расчета расхода на этом этапе, мы можем использовать формулу экспоненциального затухания.

Обозначим:

- $Q_0 = 0.065 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ – начальный расход,
- $Q_f = 0.045 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ – конечный расход,

$t_f = 20 \text{ с}$ – время, за которое происходит изменение. Функция расхода может быть представлена в виде:

$$Q(t) = Q_0 + (Q_f - Q_0) \cdot ((1 - e^{-\lambda t})) \quad (7)$$

где λ – коэффициент затухания. Чтобы найти λ , мы можем использовать конечное время:

$$Q_f = Q_0 + (Q_f - Q_0) \cdot (1 - e^{-\lambda t_f}) \quad (8)$$

Подставим значения:

$$0.045 = 0.065 + (0.045 - 0.065) \cdot (1 - e^{(-20\lambda)}).$$

Решим это уравнение для нахождения λ :

$$\begin{aligned} 0.045 - 0.065 &= (0.045 - 0.065) \cdot (1 - e^{(-20\lambda)}) \Rightarrow \\ -0.020 &= -0.020 \cdot (1 - e^{(-20\lambda)}). \end{aligned}$$

Это уравнение верно при $e^{(-20\lambda)} = 0$, что невозможно, поэтому мы можем просто взять среднее значение расхода на этом интервале:

$$Q_{\text{ср}} = Q_0 + \frac{Q_f}{2} = 0.065 + \frac{0.045}{2} = 0.055 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Общий расход за первые 20 секунд:

$$Q_1 = Q_{\text{ср}} \cdot t_f = 0.055 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \cdot 20 \text{ с} = 1.1 \text{ м}^3$$

Расход газа от 20 до 450 секунд.

На этом этапе расход остаётся постоянным на уровне $0.045 \text{ м}^3/\text{с}$. Время составляет $450 - 20 = 430 \text{ с}$. Рассчитаем общий расход за этот интервал:

$$Q_2 = Q_f \cdot t = 0.045 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \cdot 430 \text{ с} = 19.35 \text{ м}^3$$

Общий расход топлива.

Теперь сложим оба этапа, чтобы получить общий расход топлива:

$$Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2 = 1.1 \text{ м}^3 + 19.35 \text{ м}^3 = 20.45 \text{ м}^3$$

Заключение

Анализируя два графика потребления топлива модулируемой и одноступенчатой горелки, делаем неоднозначный вывод по математическим расчетам. Экономия топлива при одноступенчатом регулировании составила 29.7% относительно модулируемой горелки

Причиной неоднозначного вывода – неспособность найти мануалы потребления топлива данных горелок. Модулируемая горелка может изменять диапазон изменения мощности в пределах от 10% до 100%. Анализ данного графика проводился при постоянной мощности.

Литература

1. Сравнение ступенчатых и модулируемых горелок [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://staroruspribor.ru/articles/view/71.htm> Дата доступа: 16.11.2024
2. Газовые горелки. Иссерлин А. С. 1996 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://books.totalarch.com/gas-burners> Дата доступа: 16.11.2024.