

РАСЧЕТ ТЕПЛОЕМКОСТИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ КОМПРИМИРОВАННОГО ГАЗОВОГО ТОПЛИВА МАРОК «А» И «Б» В ДИЗЕЛЯХ

А. Н. Соболенко, М. В. Флорианская

*Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского,
Владивосток, Российская Федерация*

Применение газового топлива в дизелях на судах портового флота и рыболовных судах прибрежного лова представляет определенный интерес. И если перевод на сжиженный природный газ ограничивается неразвитостью бункеровочных возможностей в портах России, то использование компримированного газа получило довольно широкое распространение в автомобилях и быту. Для этого уже имеется ряд газонаполняющих станций. Представляется целесообразным начать осуществление перевода судов портового флота на компримированный газ, используя существующее газобаллонное оборудование для автомобилей. Необходимо оценить изменение параметров работы двигателей при конвертировании на компримированный газ. Компримированный газ содержит пропан, этан, бутан, метан и др. Рассматривается доля содержания каждого газа по ГОСТу. Количественный состав продуктов сгорания чисто компримированного газа, а также газа, поджигаемого запальным дизельным топливом, был определен по химическим реакциям окисления химических элементов, из которых они состоят, кислородом воздуха. Посредством регрессионного анализа свойств водяного пара и газов получены линейные и квадратичные уравнения регрессии теплоемкостей газов (CO_2 , N_2) и водяного пара (H_2O) в зависимости от температуры. Получены выражения для определения теплоемкости продуктов сгорания компримированного газа для топлива марки «А» и марки «Б». Представлены формулы определения теплоемкости для «чистых» продуктов сгорания компримированного газа, поджигаемого запальным дизельным топливом. Полученные выражения рекомендуется использовать при расчете рабочего цикла дизеля на компримированном газе.

Ключевые слова: газовое топливо, компримированный газ, теплоемкость, продукты сгорания, линейная зависимость, квадратичная зависимость.

Для цитирования: Соболенко А. Н., Флорианская М. В. Расчет теплоемкости продуктов сгорания компримированного газового топлива марок «А» и «Б» в дизелях // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 2. С. 65–74. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-2-65-74.

Введение

Использование сжиженного природного газа на судах, в том числе портофлота, сдерживается отсутствием бункеровочных возможностей. Но в настоящее время довольно широкое распространение получило использование сжатого (компримированного) газового топлива в автомобильных двигателях и бытовой технике, топлива марок «А» и «Б» [1]. В городах создана ограниченная сеть газозаправочных станций, куда газовое топливо поставляется в компримированном виде в баллонах. Таким образом, уже существует определенная доступность. Например, в Таиланде вдоль автомобильных междугородних трасс имеются склады с определенным запасом заправленных газом баллонов. Водители по пути при необходимости меняют баллоны, затрачивая минимальное время.

В портовых городах определенный интерес имеет использование этого вида экологически чистого топлива на судах портофлота. При этом может быть использована схема заправки простой заменой баллонов. Но перевод существующих двигателей портового флота на газ вызовет некоторое изменение рабочего процесса по сравнению с существующей работой на дизельном топливе. Необходимо предварительно в каждом случае произвести расчетную оценку изменения мощности дизеля и определить, каков будет расход газа.

В расчетах рабочего процесса весьма заметное значение на результат оказывают принятые выражения для вычисления теплоемкости.

В работе [2] приводятся выражения для вычисления значений теплоемкости смеси сжимаемого газа и воздуха для процесса сжатия при подаче природного газа на всасывание четырехтактного дизеля, в работе [3] – выражения для вычисления значений теплоемкости для рабочего процесса дизеля при сгорании сжиженного природного газа. Отсутствуют необходимые для расчета рабочего процесса дизеля формулы определения теплоемкости продуктов сгорания компримированного газа.

Методика расчета

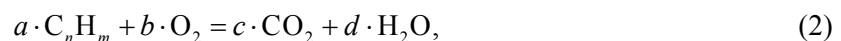
Согласно ГОСТ 27577-87 компримированный газ представляет собой смесь нескольких газов. Преобладающим по количеству является метан. В компримированном газе – топливе марки «А» – в соответствии с ГОСТ 27577-87 содержание метана составляет 90–100 %; в топливе марки «Б» – 85–95 %.

Теплоемкость «чистых» продуктов сгорания, кДж/(кмоль·К), рассчитывается по уравнению теплоемкости смеси газов:

$$c_v = \frac{\sum_{k=1}^l m_k c_{vk}}{\sum_{k=1}^l m_k}, \quad (1)$$

где m_k – количество k -го компонента; c_{vk} – теплоемкость k -го компонента; l – количество компонентов.

По химическим реакциям окисления элементов в компонентах газового топлива при его горении находим количество кмоль продуктов сгорания:



где a , b , c , и d – коэффициенты, уравнивающие левую и правую части выражения (2) [3].

Основываясь на данных [1], примем следующий состав компримированного газа, примененного в качестве топлива:

– топливо марки «А»: доля метана $r_{CH_4} = 91,2$ %; доля этана $r_{C_2H_6} = 4$ %; доля пропана $r_{C_3H_8} = 1,5$ %; доля бутана $r_{C_4H_{10}} = 1$ %; доля пентана $r_{C_5H_{12}} = 0,3$ %; доля диоксида углерода $r_{CO_2} = 1$ %; доля азота $r_{N_2} = 1$ %;

– топливо марки «Б»: доля метана $r_{CH_4} = 87,2$ %; доля этана $r_{C_2H_6} = 4$ %; доля пропана $r_{C_3H_8} = 1,5$ %; доля бутана $r_{C_4H_{10}} = 1$ %; доля пентана $r_{C_5H_{12}} = 0,3$ %; доля диоксида углерода $r_{CO_2} = 1$ %; доля азота $r_{N_2} = 5$ %.

Из формулы (2) следует, что в результате сгорания компримированного газа образуется смесь диоксида углерода CO_2 и паров воды H_2O .

В смеси диоксида углерода CO_2 и паров воды H_2O при сгорании топлива марки «Б» присутствует азот N_2 , имеющийся в исходном топливе.

Общее количество CO_2 в «чистых» продуктах сгорания, кмоль, вычисляем по формуле

$$m_{CO_2} = \sum m_{kCO_2} r_k + \frac{r_{CO_2}}{44}, \quad (3)$$

где m_{kCO_2} – количество углекислого газа в продуктах сгорания, образовавшегося от сгорания доли k -го компонента в газомоторном топливе; r_{CO_2} – доля углекислого газа в исходном газомоторном топливе.

Общее количество H_2O в «чистых» продуктах сгорания, кмоль, определяем по выражению

$$m_{H_2O} = \sum m_{kH_2O} r_k, \quad (4)$$

где m_{kH_2O} – количество паров воды в продуктах сгорания, образовавшееся от сгорания доли k -го компонента в газомоторном топливе.

Общее количество азота N_2 в «чистых» продуктах сгорания, кмоль, вычисляем посредством формулы

$$m_{N_2} = \frac{r_{N_2}}{28},$$

где r_{N_2} – доля азота в исходном газомоторном топливе [3].

Формулы для определения теплоемкости

1. Топливо марки «А» по ГОСТ 27577-87.

Полное сгорание *метана* (CH_4), содержащегося в сжатом газе, – это окисление углерода (С) и водорода (Н), в результате чего получается углекислый газ (CO_2) и водяные пары (H_2O). Эта реакция описывается уравнением



Весовое количество веществ, вступивших в реакцию и получившихся в ее результате на основе их атомных весов, рассчитывается следующим уравнением:

$$16 \text{ кг } (CH_4) + 64 \text{ кг } (O_2) = 44 \text{ кг } (CO_2) + 36 \text{ кг } (H_2O), \quad (6)$$

с переводом на кмоль:

$$16 \text{ кг } (CH_4) + 2 \text{ кмоль } (O_2) = 1 \text{ кмоль } (CO_2) + 2 \text{ кмоль } (H_2O), \quad (7)$$

или

$$1 \text{ кг } (CH_4) + \frac{2}{16} \text{ кмоль } (O_2) = \frac{1}{16} \text{ кмоль } (CO_2) + \frac{2}{16} \text{ кмоль } (H_2O). \quad (8)$$

В результате сгорания 1 кмоль метана получается:

$$m_{\text{мет.}CO_2} = \frac{1}{16} \text{ кмоль } (CO_2) \text{ и } m_{\text{мет.}H_2O} = \frac{1}{8} \text{ кмоль } (H_2O). \quad (9)$$

Сгорание следующего компонента сжатого газа – *этана* – можно описать следующими уравнениями:



$$60 \text{ кг } (C_2H_6) + 224 \text{ кг } (O_2) = 176 \text{ кг } (CO_2) + 108 \text{ кг } (H_2O), \quad (11)$$

$$60 \text{ кг } (C_2H_6) + 7 \text{ кмоль } (O_2) = 4 \text{ кмоль } (CO_2) + 6 \text{ кмоль } (H_2O), \quad (12)$$

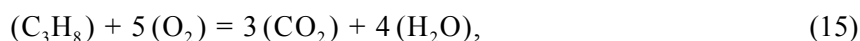
отнесенные к 1 кг газа:

$$1 \text{ кг } (C_2H_6) + \frac{7}{60} \text{ кмоль } (O_2) = \frac{4}{60} \text{ кмоль } (CO_2) + \frac{6}{60} \text{ кмоль } (H_2O). \quad (13)$$

В результате сгорания 2 кмоль этана получается:

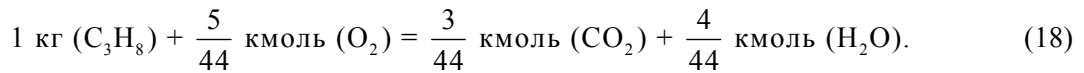
$$m_{\text{эт.}CO_2} = \frac{4}{60} \text{ кмоль } (CO_2) \text{ и } m_{\text{эт.}H_2O} = \frac{6}{60} \text{ кмоль } (H_2O). \quad (14)$$

Химические реакции сгорания *пропана* можно выразить следующими уравнениями:



$$44 \text{ кг } (C_3H_8) + 160 \text{ кг } (O_2) = 132 \text{ кг } (CO_2) + 72 \text{ кг } (H_2O), \quad (16)$$

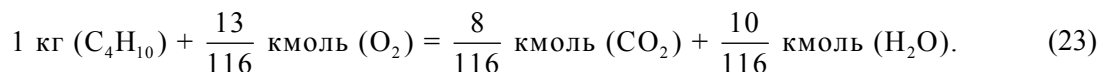
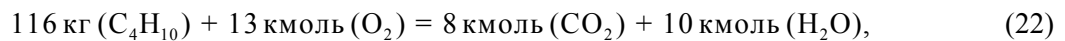
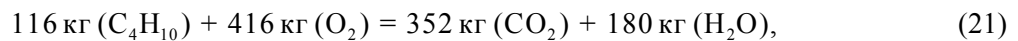
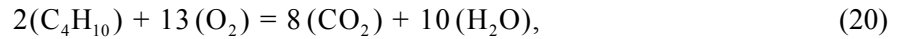
$$44 \text{ кг } (C_3H_8) + 5 \text{ кмоль } (O_2) = 3 \text{ кмоль } (CO_2) + 4 \text{ кмоль } (H_2O), \quad (17)$$



В результате сгорания 1 кмоль пропана получается:

$$m_{\text{проп.}\text{CO}_2} = \frac{3}{44} \text{ кмоль } (\text{CO}_2) \text{ и } m_{\text{проп.}\text{H}_2\text{O}} = \frac{4}{44} \text{ кмоль } (\text{H}_2\text{O}). \quad (19)$$

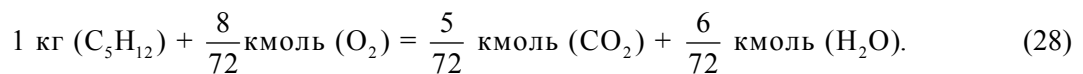
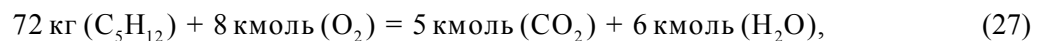
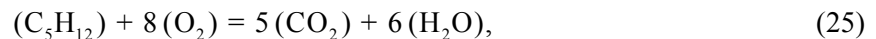
Химические реакции сгорания *бутана* описываются следующими уравнениями:



В результате сгорания 2 кмоль бутана образуется:

$$m_{\text{бут.}\text{CO}_2} = \frac{8}{116} \text{ кмоль } (\text{CO}_2) \text{ и } m_{\text{бут.}\text{H}_2\text{O}} = \frac{10}{116} \text{ кмоль } (\text{H}_2\text{O}). \quad (24)$$

Химические реакции сгорания *пентана* описываются следующими уравнениями:



В результате химических реакций сгорания 1 кмоль пентана получается:

$$m_{\text{пент.}\text{CO}_2} = \frac{5}{12} \text{ кмоль } (\text{CO}_2) \text{ и } m_{\text{пент.}\text{H}_2\text{O}} = \frac{6}{12} \text{ кмоль } (\text{H}_2\text{O}). \quad (29)$$

Количество азота $m_{\text{N}_2} = \frac{1}{28}$ кмоль.

Общее количество кмоль углекислого газа (CO_2) в продуктах сгорания топлива марки «А» рассчитывается по формуле (3):

$$m_{\text{CO}_2} = \sum m_{k\text{CO}_2} r_k + \frac{r_{\text{CO}_2}}{44} = m_{\text{мет.}\text{CO}_2} r_{\text{CH}_4} + m_{\text{эт.}\text{CO}_2} r_{\text{C}_2\text{H}_6} + m_{\text{проп.}\text{CO}_2} r_{\text{C}_3\text{H}_8} + m_{\text{бут.}\text{CO}_2} r_{\text{C}_4\text{H}_{10}} + m_{\text{пент.}\text{CO}_2} r_{\text{C}_5\text{H}_{12}} + \\ + \frac{r_{\text{CO}_2}}{44} = \frac{1}{16} 0,912 + \frac{4}{60} 0,04 + \frac{3}{44} 0,015 + \frac{8}{116} 0,01 + \frac{6}{72} 0,003 + \frac{0,01}{44} = 0,0619.$$

Общее количество кмоль водяных паров в продуктах сгорания топлива марки «А» рассчитывается по формуле (4):

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \sum m_{k\text{H}_2\text{O}} r_k = m_{\text{мет.}\text{H}_2\text{O}} r_{\text{CH}_4} + m_{\text{эт.}\text{H}_2\text{O}} r_{\text{C}_2\text{H}_6} + m_{\text{проп.}\text{H}_2\text{O}} r_{\text{C}_3\text{H}_8} + m_{\text{бут.}\text{H}_2\text{O}} r_{\text{C}_4\text{H}_{10}} + m_{\text{пент.}\text{H}_2\text{O}} r_{\text{C}_5\text{H}_{12}} = \\ = \frac{1}{8} 0,912 + \frac{6}{60} 0,04 + \frac{4}{44} 0,015 + \frac{10}{116} 0,01 + \frac{6}{72} 0,003 = 0,12.$$

Посредством регрессионного анализа таблиц свойств водяного пара и газов [4, 5] были получены линейные и квадратичные уравнения регрессии теплоемкостей газов (CO_2 , N_2) и водяного пара (H_2O) в зависимости от температуры:

1) для углекислого газа:
– простая линейная:

$$c_{vCO_2} = a_{vCO_2} + b_{CO_2} T = 28,774 + 0,00852T$$

при коэффициенте корреляции $R^2 = 0,93$ и среднеквадратичном отклонении $\sigma^2 = 1,464$;
– квадратичная (более точная):

$$c_{vCO_2} = 23,422 + 0,019T - 4,2 \cdot 10^{-6} T^2$$

при коэффициенте корреляции $R^2 = 0,996$ и среднеквадратичном отклонении $\sigma^2 = 0,345$;

2) для водяных паров:
– простая линейная:

$$c_{vH_2O} = a_{vH_2O} + b_{H_2O} T = 23,22 + 0,00555T$$

при коэффициенте корреляции $R^2 = 0,998$ и среднеквадратичном отклонении $\sigma^2 = 0,162$;
– квадратичная (более точная):

$$c_{vH_2O} = 23,32 + 0,00537T + 7,662 \cdot 10^{-8} T^2$$

при коэффициенте корреляции $R^2 = 0,998$ и среднеквадратичном отклонении $\sigma^2 = 0,1602$;

3) для азота:
– простая линейная:

$$c_{vN_2} = a_{vN_2} + b_{N_2} T = 19,9 + 0,00258T$$

при коэффициенте корреляции $R^2 = 0,991$ и среднеквадратичном отклонении $\sigma^2 = 0,14$;
– квадратичная (более точная):

$$c_{vN_2} = 19,75 + 0,00262T + 9,94 \cdot 10^{-8} T^2$$

при коэффициенте корреляции $R^2 = 0,991$ и среднеквадратичном отклонении $\sigma^2 = 0,135$.

Коэффициенты в формуле теплоемкости продуктов сгорания рассчитываем согласно (1):

$$a_{vr} = \frac{\sum a_{vk} m_k}{\sum m_k} = \frac{a_{vCO_2} m_{CO_2} + a_{vH_2O} m_{H_2O} + a_{vN_2} m_{N_2}}{m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{N_2}} =$$

$$= \frac{28,774 \cdot 0,0619 + 23,22 \cdot 0,12 + 19,9 \cdot 0,01}{0,0619 + 0,12 + 0,01} = 24,84;$$

$$b_{vr} = \frac{\sum b_{vk} m_k}{\sum m_k} = \frac{b_{CO_2} m_{CO_2} + b_{H_2O} m_{H_2O} + b_{N_2} m_{N_2}}{m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{N_2}} =$$

$$= \frac{0,00852 \cdot 0,0619 + 0,00555 \cdot 0,12 + 0,00236 \cdot 0,01}{0,0619 + 0,12 + 0,01} = 0,0063.$$

Зависимость средней теплоемкости продуктов сгорания компримированного газового топлива марки «А» от температуры имеет вид:

$$c_{vr} = a_{vr} + b_{vr} T = 24,84 + 0,0063T.$$

При использовании дизельного топлива в качестве запального следует учесть изменение теплоемкости от наличия в выпускных газах продуктов сгорания дизельного топлива.

Формула для расчета теплоемкости продуктов сгорания дизельного топлива [6]:

$$c_{vж} = 20,47 + 0,0036T.$$

Доля жидкого топлива составляет обычно около 0,1. В этом случае теплоемкость продуктов сгорания определяется по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} a_{\text{вгж}} &= 24,84 \cdot 0,9 + 20,47 \cdot 0,1 = 24,4; \\ b_{\text{вгж}} &= 0,0063 \cdot 0,9 + 0,0036 \cdot 0,1 = 0,00603; \\ c_{\text{вгж}} &= 24,4 + 0,00603T. \end{aligned}$$

Аналогичным образом были подсчитаны значения коэффициентов $a_{\text{вг}}$, $b_{\text{г}}$ и $c_{\text{г}}$ для более точной квадратичной модели:

$$c_{\text{вг}} = a_{\text{вг}} + b_{\text{г}}T + c_{\text{г}}T^2.$$

Рассчитаем теплоемкость продуктов сгорания по квадратичной модели газожидкостного топлива:

$$\begin{aligned} a_{\text{вг}} &= \frac{23,422 \cdot 0,0619 + 23,32 \cdot 0,12 + 19,75 \cdot 0,01}{0,0619 + 0,12 + 0,01} = 23,167; \\ b_{\text{г}} &= \frac{0,0194 \cdot 0,0619 + 0,12 \cdot 0,00537 + 0,01 \cdot 0,00262}{0,0619 + 0,12 + 0,01} = 0,0097; \\ c_{\text{г}} &= \frac{-4,255 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0619 + 7,662 \cdot 10^{-8} \cdot 0,12 + 9,94 \cdot 10^{-8} \cdot 0,01}{0,0619 + 0,12 + 0,01} = -2,53 \cdot 10^{-7}; \\ c_{\text{вг}} &= 23,17 + 0,0097T - 2,53 \cdot 10^{-7}T^2. \end{aligned}$$

Теплоемкость продуктов совместного сгорания компримированного газа и запального дизельного топлива может определяться по формуле

$$c_{\text{вгж}} = 22,9 + 0,0087T - 2,53 \cdot 10^{-7}T^2.$$

2. Топливо марки «Б» по ГОСТ 27577-87.

Данный расчет основывается на результатах вычислений (5)–(29).

Число кмоль углекислого газа рассчитано по формуле (3):

$$\begin{aligned} m_{\text{CO}_2} &= \sum m_{k\text{CO}_2} r_k + \frac{r_{\text{CO}_2}}{44} = m_{\text{мет. CO}_2} r_{\text{CH}_4} + m_{\text{эт. CO}_2} r_{\text{C}_2\text{H}_6} + m_{\text{проп. CO}_2} r_{\text{C}_3\text{H}_8} + m_{\text{бут. CO}_2} r_{\text{C}_4\text{H}_{10}} + m_{\text{пент. CO}_2} r_{\text{C}_5\text{H}_{12}} + \frac{r_{\text{CO}_2}}{44} = \\ &= \frac{1}{16} 0,872 + \frac{4}{60} 0,04 + \frac{3}{44} 0,015 + \frac{8}{116} 0,01 + \frac{6}{72} 0,003 + \frac{0,01}{44} = 0,0594. \end{aligned}$$

Число кмоль водяных паров рассчитано по формуле (4):

$$\begin{aligned} m_{\text{H}_2\text{O}} &= \sum m_{k\text{H}_2\text{O}} r_k = m_{\text{мет. H}_2\text{O}} r_{\text{CH}_4} + m_{\text{эт. H}_2\text{O}} r_{\text{C}_2\text{H}_6} + m_{\text{проп. H}_2\text{O}} r_{\text{C}_3\text{H}_8} + m_{\text{бут. H}_2\text{O}} r_{\text{C}_4\text{H}_{10}} + m_{\text{пент. H}_2\text{O}} r_{\text{C}_5\text{H}_{12}} = \\ &= \frac{1}{8} 0,872 + \frac{6}{60} 0,04 + \frac{4}{44} 0,015 + \frac{10}{116} 0,01 + \frac{6}{72} 0,003 = 0,115. \end{aligned}$$

Виды аппроксимирующих формул для расчета теплоемкостей при линейной и нелинейной зависимости от температуры примем такими же, как и для топлива марки «А».

Для определения теплоемкости продуктов сгорания компримированного газового топлива воспользуемся опять формулой (1):

$$\begin{aligned} a_{\text{вг}} &= \frac{\sum a_{vk} m_k}{\sum m_k} = \frac{a_{\text{vCO}_2} m_{\text{CO}_2} + a_{\text{vH}_2\text{O}} m_{\text{H}_2\text{O}} + a_{\text{vN}_2} m_{\text{N}_2}}{m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{N}_2}} = \\ &= \frac{28,774 \cdot 0,0594 + 23,22 \cdot 0,115 + 19,9 \cdot 0,05}{0,0594 + 0,115 + 0,05} = 23,94; \\ b_{\text{вг}} &= \frac{\sum b_{vk} m_k}{\sum m_k} = \frac{b_{\text{CO}_2} m_{\text{CO}_2} + b_{\text{H}_2\text{O}} m_{\text{H}_2\text{O}} + b_{\text{N}_2} m_{\text{N}_2}}{m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{N}_2}} = \\ &= \frac{0,00852 \cdot 0,0594 + 0,00555 \cdot 0,115 + 0,00238 \cdot 0,05}{0,0594 + 0,115 + 0,05} = 0,00563T. \end{aligned}$$

В результате получаем формулу для определения теплоемкости продуктов сгорания чисто газового топлива марки «Б»:

$$c_{\text{вг}} = 23,94 + 0,00563T.$$

При использовании запального дизельного топлива, доля которого составляет в среднем около 0,1, теплоемкость продуктов сгорания определится по нижеприведенным формулам:

$$a_{\text{вгж}} = 23,94 \cdot 0,9 + 20,47 \cdot 0,1 = 23,59;$$

$$b_{\text{вгж}} = 0,00563 \cdot 0,9 + 0,0036 \cdot 0,1 = 0,00543;$$

$$c_{\text{вгж}} = 23,59 + 0,00543T.$$

Аналогично были определены коэффициенты $a_{\text{вгж}}$, $b_{\text{вгж}}$ и $c_{\text{г}}$ для более точной квадратичной зависимости

$$c_{\text{вг}} = a_{\text{вг}} + b_{\text{г}}T + c_{\text{г}}T^2.$$

Определим теплоемкость продуктов сгорания по квадратичной модели компримированного топлива:

$$a_{\text{вг}} = \frac{23,422 \cdot 0,0594 + 23,32 \cdot 0,115 + 19,75 \cdot 0,05}{0,0594 + 0,115 + 0,05} = 22,55;$$

$$b_{\text{г}} = \frac{0,0194 \cdot 0,0594 + 0,115 \cdot 0,00537 + 0,05 \cdot 0,00262}{0,0594 + 0,115 + 0,05} = 0,00846;$$

$$c_{\text{г}} = \frac{-4,255 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0594 + 7,662 \cdot 10^{-8} \cdot 0,115 + 9,94 \cdot 10^{-8} \cdot 0,05}{0,0594 + 0,115 + 0,05} = -1,106 \cdot 10^{-6};$$

$$c_{\text{вг}} = 22,55 + 0,00846T - 1,106 \cdot 10^{-6}T^2.$$

Формула для расчета теплоемкости продуктов сгорания дизеля, использующего компримированный газ марки «Б» по ГОСТ 27577-87 и запальное дизельное топливо имеет следующий вид:

$$c_{\text{вгж}} = 22,34 + 0,00797T - 1,106 \cdot 10^{-6}T^2.$$

Линейные зависимости теплоемкости от температуры для продуктов сгорания в дизеле компримированного газа сведены в табл. 1.

Таблица 1

Линейные зависимости теплоемкости от температуры для продуктов сгорания в дизеле компримированного газа

Топливо марки «А»		Топливо марки «Б»	
При сгорании только чистого газа	При совместном сгорании компримированного газа и запального дизельного топлива	При сгорании только чистого газа	При совместном сгорании компримированного газа и запального дизельного топлива
$c_{\text{вг}} = 24,84 + 0,0063T$	$c_{\text{вгж}} = 24,4 + 0,00603T$	$c_{\text{вг}} = 23,94 + 0,00563T$	$c_{\text{вгж}} = 23,59 + 0,00543T$

Квадратичные зависимости теплоемкости от температуры для продуктов сгорания в дизеле компримированного газа сведены в табл. 2.

Таблица 2

Квадратичные зависимости теплоемкости от температуры для продуктов сгорания в дизеле компримированного газа

Топливо марки «А»		Топливо марки «Б»	
При сгорании только чистого газа	При совместном сгорании компримированного газа и запального дизельного топлива	При сгорании только чистого газа	При совместном сгорании компримированного газа и запального дизельного топлива
$c_{\text{вг}} = 23,166 + 0,00977T - 2,53 \cdot 10^{-6}T^2$	$c_{\text{вгж}} = 22,9 + 0,00877T - 2,53 \cdot 10^{-6}T^2$	$c_{\text{вг}} = 22,55 + 0,00846T - 1,106 \cdot 10^{-6}T^2$	$c_{\text{вгж}} = 22,347 + 0,00797T - 1,106 \cdot 10^{-6}T^2$

Разница в результатах расчета средней теплоемкости по линейной модели в сравнении с квадратичной зависимостью составляет в среднем 1,4 %, т. е. незначительна.

Заключение

Полученные линейные зависимости рекомендуются для использования в расчетах рабочего цикла дизеля методом Гриневецкого – Мазинга, а полученные квадратичные зависимости рекомендуются для использования в расчетах рабочего цикла дизеля методом численного моделирования [7].

Зависимости теплоемкости от температуры компонентов в продуктах сгорания газового топлива – углекислого газа, паров воды, азота – аппроксимируются полиномами первого порядка при коэффициенте корреляции в пределах $R^2 = 0,93 \div 0,998$. При аппроксимации полиномами второго порядка коэффициент корреляции $R^2 = 0,996 \div 0,998$.

Сравнительные расчеты доказали, что при температуре 300 К разница в расчетных значениях теплоемкостей «чистых» продуктов сгорания при использовании формулы для дизельного топлива [6] и формулы для топлива марки «А» составляет 24 %, а при температуре 1 800 К – 34,2 %; для топлива марки «Б» при температуре 300 К – 18,9 %, а при температуре 1 800 К – 26,4 % соответственно. При сравнении с теплоемкостями продуктов сгорания газомоторного топлива (чистый природный газ) [3] разница в расчетных значениях для топлива марки «А» при температуре 300 К составляет 1 %, при температуре 1 800 К – 1,5 %; для топлива марки «Б» при температуре 300 К – 5,2 %, при температуре 1 800 К – 7,8 % соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пахомов Ю. А., Коробков Ю. П., Дмитриевский Е. В., Васильев Г. Л. Топливо и топливные системы судовых дизелей. М.: Транслит, 2007. 494 с.
2. Соболенко А. Н., Самсонов А. И. Расчет теплоемкости заряда сжатия в цилиндре двигателя, работающего на газомоторном топливе // Мор. интеллектуал. технологии. 2018. № 4 (42). Т. 5. С. 66–69.
3. Соболенко А. Н. Расчет теплоемкости продуктов сгорания газомоторного топлива в дизелях // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2019. № 2. С. 48–55.
4. Новиков И. И. Термодинамика: учеб. М.: Лань, 2009. 370 с.
5. Овсянников М. К., Костылев И. И. Теплотехника. Техническая термодинамика и теплопередача: учеб. СПб.: Эльмор, 2014. 208 с.
6. Ваншейдт В. А. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Л.: Судостроение, 1977. 390 с.
7. Гончар Б. М. Численное моделирование рабочего процесса дизелей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1969. 24 с.

Статья поступила в редакцию 09.03.2021

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анатолий Николаевич Соболенко — д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского; Россия, 690003, Владивосток; sobolenko_a@mail.ru.

Мария Васильевна Флорианская — канд. техн. наук, доцент; профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского; Россия, 690003, Владивосток; flormary@yandex.ru.



ANALYSIS OF SPECIFIC HEAT OF COMPRESSED GAS FUEL A AND B COMBUSTION PRODUCTS IN DIESELS

A. N. Sobolenko, M. V. Florianskaya

Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy,
Vladivostok, Russian Federation

Abstract. The article underlines the interest to using gas fuel in diesel engines of the coastal fishing vessels. If the change to liquefied natural gas is limited by the lack of bunkering capabilities in the Russian ports, using compressed gas has become widespread in transport and in the household. A number of gas fueling stations are already available for this purpose. It seems reasonable to start the conversion of the port fleet to compressed gas from using the motor gas bottling equipment for that purpose. It is important to evaluate the change in engine performance parameters when converting to compressed gas. Compressed gas is a mixture of gases such as propane, ethane, butane, methane, etc. There is given the percentage of each gas content, according to GOST. The quantitative composition of the pure compressed gas combustion outcomes, as well as the gas ignited by the ignition diesel fuel was determined by the oxidation reactions of the chemical elements of which they consist, as well as by oxygen from air. As a result of regression analysis applied to define the properties of water vapor and gases, there have been derived linear and quadratic approximating dependences of the heat capacities of gases (CO_2 , N_2) and water vapor (H_2O) on temperature. There have been obtained the equations for determining the heat capacity of the combustion products of compressed gas for fuel grade A and B. There have been produced the formulas for determining heat capacity of pure combustion products of compressed gas ignited by the ignition diesel fuel. The obtained expressions are recommended to be used for analysis of the working cycle of a diesel engine running on the compressed gas.

Key words: gas fuel, compressed gas, heat capacity, combustion products, linear dependence, quadratic dependence.

For citation: Sobolenko A. N., Florianskaya M. V. Analysis of specific heat of compressed gas fuel A and B combustion products in diesels. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2021;2:65-74. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2021-2-65-74.

REFERENCES

1. Pakhomov Iu. A., Korobkov Iu. P., Dmitrievskii E. V., Vasil'ev G. L. *Toplivo i toplivnye sistemy sudovykh dizelei* [Fuel and fuel systems of marine diesel engines]. Moscow, Translit Publ., 2007. 494 p.
2. Sobolenko A. N., Samsonov A. I. Raschet teploemkosti zariada szhatiia v tsilindre dvigatel'ia rabotaiushchego na gazomotornom toplive [Calculating heat capacity of compression charge in cylinder of engine running on gas fuel]. *Morskoe intellektual'nye tekhnologii*, 2018, no. 4 (42), vol. 5, pp. 66-69.
3. Sobolenko A. N. Raschet teploemkosti produktov sgoraniia gazomotornogo topliva v dizeliakh [Analysis of heat capacity of combustion products of gas fuel in diesel engines]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2019, no. 2, pp. 48-55.
4. Novikov I. I. *Termodinamika: uchebnik* [Thermodynamics: textbook]. Moscow, Lan' Publ., 2009. 370 p.
5. Ovsianikov M. K., Kostylev I. I. *Teplotekhnika. Tekhnicheskaya termodinamika i teploperedacha: uchebnik* [Heat engineering. Technical thermodynamics and heat transfer: textbook]. Saint-Petersburg, El'mor Publ., 2014. 208 p.
6. Vansheidt V. A. *Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniia* [Ship internal combustion engines]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1977. 390 p.
7. Gonchar B. M. *Chislennoe modelirovanie rabochego protsessa dizelei: avtoreferat dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Numerical modeling working process of diesel engines: diss. abstr. ... dr. tech. sci.]. Leningrad, 1969. 24 p.

The article submitted to the editors 09.03.2021

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anatoly N. Sobolenko – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Ship Internal Combustion Engines; Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy; Russia, 690003, Vladivostok; sobolenko_a@mail.ru.

Maria V. Florianskaya – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Professor of the Department of Ship Internal Combustion Engines; Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy; Russia, 690003, Vladivostok; flormary@yandex.ru.

