

**УТОЧНЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ТЕПЛОЕМКОСТИ РАБОЧИХ ТЕЛ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНЫЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ****А.Г. Клименко**

Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

*E-mail: kag1958776@gmail.com*

Проанализированы современные методики расчета рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания (ДВС), определены ключевые направления применения этих методик и пути их совершенствования при расчете удельных теплосемкостей, от которых зависят эффективные и экологические параметры. Проанализированы методы аналитического вычисления теплосемкостей рабочих тел в ДВС, даны рекомендации по практическому использованию методов, применение которых дает наименьшую погрешность и используемые для составления справочных таблиц теплосемкостей рабочих тел. Преимущества рекомендованного метода проанализированы на основе расчетов и сравнительных графиков.

**Ключевые слова:** моделирование рабочих процессов, двигатели внутреннего сгорания, методы расчета теплосемкостей, эффективные и экологические параметры, экологические параметры.

Поступила в редакцию: 02.06.2023. После доработки: 19.06.2023.

**Введение.** Самыми экономичными из тепловых двигателей на сегодняшний день признаются дизельные ДВС, которые по показателям эффективности превосходят газотурбинные, а также ДВС с внешним смесеобразованием. ДВС получили широкое распространение на транспорте, в сфере энергетики, мелиоративной, строительной отраслях, что, прежде всего, продиктовано их высокой эффективностью. Очевидно, что с учетом вышеизложенного, вопросам дальнейшего совершенствования дизельных ДВС, в частности, методам термодинамического моделирования, посвящается значительное количество исследований. Наиболее важными среди этих исследований являются работы, посвященные совершенствованию смесеобразования с целью достижения полноты сгорания топлива, т.е. вопросы топливной эффективности.

Термодинамические расчеты процессов смесеобразования и сгорания топлив являются ключевыми для разработки соответствующих конструктивных элементов дизельных ДВС (устройств смесеобразования, камер сгорания, впускных и выпускных органов, регуляторов фаз газораспределения, механизмов, регули-

рующих угол опережения подачи топлива и др.).

На сегодняшний день в мире наиболее признанной и применяемой является методика расчета ДВС, предложенная еще в 1907 году профессором МВТУ Гриневецким В.И., в основе которой принимается ряд допущений и приближений. В связи с усовершенствованием конструкций ДВС методика получила свое дальнейшее развитие в работах последователей В.И. Гриневецкого в числе которых Е.К. Мазинг, Н.Р. Брилинг, В.Г. Цветков, А.С. Орлин, академик Б.С. Стечкин, С.Е. Лебедев и др. [1]. Среди современных методов моделирования рабочих процессов ДВС и их составляющих наиболее детальной информация представлена в исследовании [2]. Наиболее значимым программным продуктом из проанализированных методик является расчетная программа ДИЗЕЛЬ-РК, апробированная большим количеством дизелестроительных фирм и которая признана одним из перспективных направлений современных методов математического моделирования и компьютерной оптимизации рабочих процессов двух- и четырехтактных ДВС, как с турбонаддувом, так и с приводными

компрессорами [3]. Программа нашла широкое применение как в Российской Федерации, так и за рубежом и представляет собой развитую методику с усовершенствованной математической моделью смесеобразования и сгорания в дизеле.

Следует отметить, что при наличии указанного программного продукта тема совершенствования методик расчета рабочих процессов ДВС не является исчерпанной.

Настоящая работа посвящена одному из важнейших этапов теплового расчета – расчету теплоемкостей рабочих тел при моделировании рабочих процессов ДВС. Начало подобным расчетам было положено еще в 19 веке. В 1780 г. французские ученые Антуан Лавуазье (1743–1794) и Пьер Симон Лаплас (1749–1827) предложили прибор для измерения удельных теплоемкостей, названный ими калориметром [4], а до недавнего времени методики ограничивались данными, полученными еще в первой половине 20 века [5, 6].

**Анализ методов реализации уточненной математической модели расчета теплоемкостей рабочих тел ДВС.** Расчет теплоемкостей является важной составляющей при тепловом расчете ДВС, т.к. от этого параметра в дальнейшем зависит точность оценки термодинамических свойств рабочих тел, которые в рабочем процессе меняются на протяжении всего цикла. При этом повышается достоверность и точность оценки эффективной и экологической составляющей термодинамического расчета.

Учитывая, что внутренняя энергия рабочих тел  $U$  в ДВС (воздух, газ, дизельное топливо, продукты сгорания) есть функция от внутренней энергии вида

$$U = G[c_v(v, t)t + u_0(v)], \quad (1)$$

где  $G$  – масса рабочего тела, кг,  $c_v$  – изохорная теплоемкость, кДж/кг,  $v$ ,  $t$  – концентрация и, соответственно, температура продуктов сгорания,  $u_0(v)$  –

удельная внутренняя энергия рабочего тела при температуре  $t_0$ , то средняя теплоемкость, как функция двух переменных, может быть найдена из зависимости

$$c_v(v, t) = c_v(1, t)v + c_v(0, t)(v - v). \quad (2)$$

Таким образом, анализируя уравнение 1 и 2, не углубляясь в дальнейшие преобразования, можно сделать вывод, что определение теплоемкостей рабочих тел в ДВС значительно может влиять на точность расчетов тепловых процессов.

Методам расчета теплоемкостей рабочих тел в ДВС в последнее время посвящены работы отечественных исследователей [7–9]. В работе [7] за основу расчетных данных теплоемкостей приняты уточненные данные о термодинамических свойствах газов, принятые в соответствующей справочной [9, 11] и научной [13] литературе.

В основе расчетной методики [8] использованы таблицы свойств газов и водяного пара [9], по данным которых получены соответствующие аппроксимирующие зависимости вида

$$c_p = \alpha + \beta T, \quad (3)$$

где  $c_p$  – удельная изобарная молярная теплоемкость газа,  $T$  – абсолютная температура,  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты, что обеспечивает достаточно приближенную точность, не приемлемую для детального расчета термодинамических параметров рабочего процесса ДВС, применяемых при проектировании и конструировании ДВС. Как более точная в [6] предложена полиномиальная зависимость вида

$$c_p = \alpha + \beta T + \gamma T^2, \quad (4)$$

где  $\gamma$  – коэффициент.

Применение данной методики до недавнего времени являлось распространенным подходом при решении подобных задач. Однако развитие вычислительных методов позволяет сегодня ре-

шать задачи без больших затрат времени и с более высокой точностью, что и предлагается в работе [12], в основе которой положено уравнение вида

$$\frac{c_p}{R} = \sum_{i=0}^6 a_i r^i + \sum_{i=7}^{12} a_i \left(\frac{1}{\tau}\right)^{i-6}, \quad (5)$$

где  $\tau = T/T^*$  – относительная температура:  $T$  – температура газа, К,  $T^* = 1000$  К,  $a_i$  – массив коэффициентов, специфичный для каждого газа,  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К). Далее изложенная методика нашла применение в справочной литературе [11], однако сведений о ее использовании в термодинамических расчетах ДВС автором не найдены.

В настоящем исследовании рассматриваются 7 видов рабочих тел, теплоемкости которых определяются в тепловых расчетах ДВС, а также газовых турбин – атмосферный воздух, кислород  $O_2$ , азот  $N_2$ , водород  $H_2$ , оксид углерода  $CO$ , диоксид углерода  $CO_2$ , водяной пар  $H_2O$ . Приоритет отдается топливам газовым и топливам, не содержащим серы. Принципиально указанная методика может быть распространена на такие компоненты продуктов сгорания, как оксиды азота  $NO$ , диоксиды азота  $NO_2$ , аргон  $Ar$  и др.

По данным [12] коэффициенты  $a_i$  для всех веществ, кроме водяного пара и одноатомных газов, определены методом наименьших квадратов для интервала температур  $200 \div 2500$  К. Коэффициенты обеспечивают среднюю квадратическую погрешность: для кислорода –  $0,67 \cdot 10^{-5}$ , азота –  $0,23 \cdot 10^{-4}$ , диоксида углерода –  $0,60 \cdot 10^{-4}$ , оксида углерода –  $0,19 \cdot 10^{-4}$ , азота –  $0,23 \cdot 10^{-4}$ , водорода –  $1,5 \cdot 10^{-5}$ , для водяного пара –  $0,32 \cdot 10^{-2}$ .

Ниже приводятся графики, построенные по названным методикам [8 и 12].

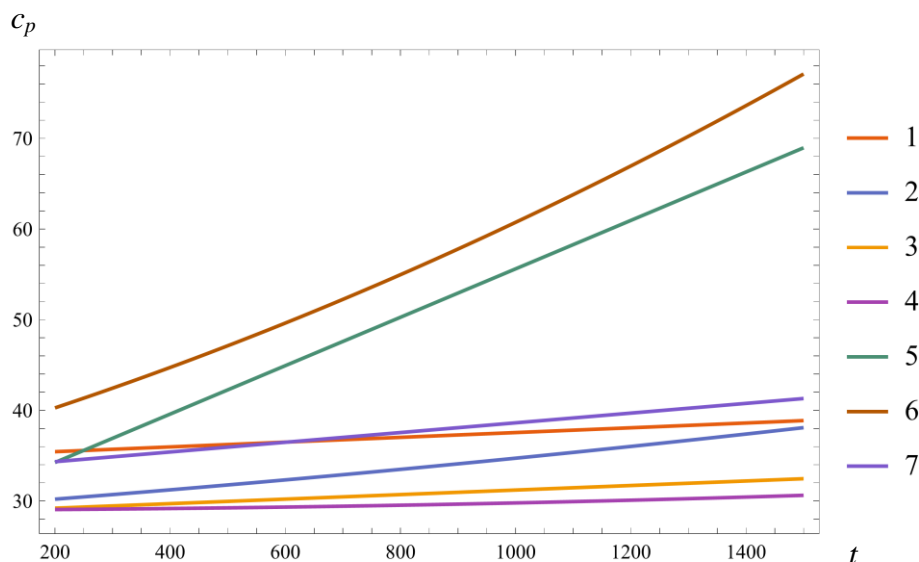
По результатам моделирования графики построены с учетом [8] и [12]. Расчеты производились в два этапа – с тем-

пературами от 200 до 1500°C (см. рис. 1, 2) и с температурами от 1501 до 2500°C (см. рис. 3, 4). Точность расчетов по методике [8] указана автором и составляет от 18,9 до 34 процентов в зависимости от конкретного газа, что для исследовательских целей может быть применено в очень ограниченных случаях.

Из рассмотрения рисунков вытекает очевидный факт расхождения значений теплоемкостей, особенно для атмосферного воздуха и оксида углерода  $CO$ . Вполне очевидно, что методика [12] дает более точные значения теплоемкостей в диапазоне температур от 0 до 2500°C. Там же отмечается, что при температурах более 2000°C следует учитывать явление диссоциации рабочих тел ДВС и даны рекомендации по ее оценке, что является предметом дальнейшего анализа. Таким образом, аналитическое определение теплоемкостей с высокой точностью позволит более объективно оценивать свойства рабочих тел, в состав которых входят, в том числе, и выпускные газы, состав и физические характеристики которых оказывают значительное влияние на эффективную и экологическую составляющие теплового расчета ДВС.

**Выводы.** Анализ существующих методик расчета термодинамических параметров ДВС, что показывает наиболее точной и применяемой на сегодняшний день методикой расчета является программный комплекс ДИЗЕЛЬ-РК.

Применение в современных программных комплексах методики аналитического определения теплоемкостей рабочих тел по [12] может значительно повысить достоверность результатов термодинамических расчетов, которые позволят улучшить оценку термической, экологической и эффективной составляющих рабочих процессов ДВС.



**Рис. 1.** Результаты расчета удельных молярных теплоемкостей  $c_p$

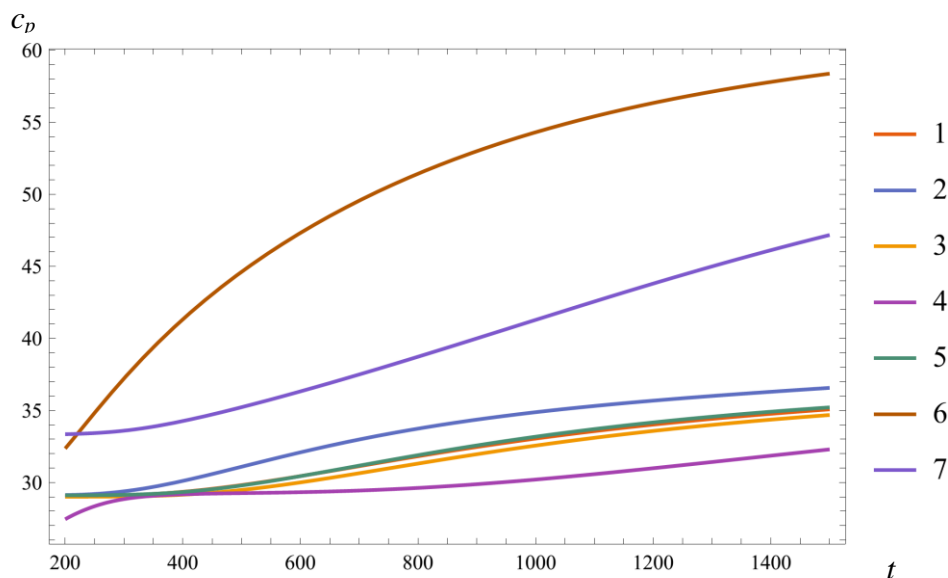
в интервале температур  $t$  от 0 до 1500°C по методике [8]

- 1 – молярная теплоемкость атмосферного воздуха; 2 – молярная теплоемкость кислорода  $O_2$ ;
- 3 – молярная теплоемкость азота  $N_2$ ; 4 – молярная теплоемкость водорода  $H_2$ ;
- 5 – молярная теплоемкость оксида углерода  $CO$ ; 6 – молярная теплоемкость диоксида углерода  $CO_2$ ; 7 – молярная теплоемкость водяного пара  $H_2O$

**Fig. 1.** Results of calculation of the molar heat capacity  $c_p$

in the temperature  $t$  range from 0 to 1500 °C using the methodology [8]

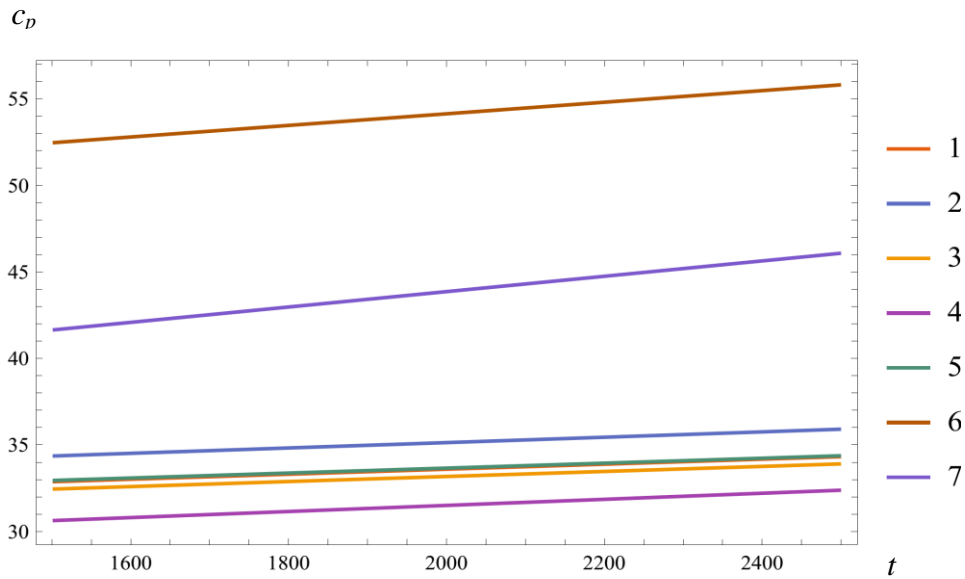
- 1 – molar heat capacity of atmospheric air; 2 – molar heat capacity of oxygen  $O_2$ ;
- 3 – molar heat capacity of nitrogen  $N_2$ ; 4 – molar heat capacity of hydrogen  $H_2$ ;
- 5 – molar heat capacity of carbon monoxide  $CO$ ; 6 – molar heat capacity of carbon dioxide  $CO_2$ ; 7 – molar heat capacity of water steam  $H_2O$



**Рис. 2.** Результаты расчета удельных молярных теплоемкостей  $c_p$  в интервале температур  $t$

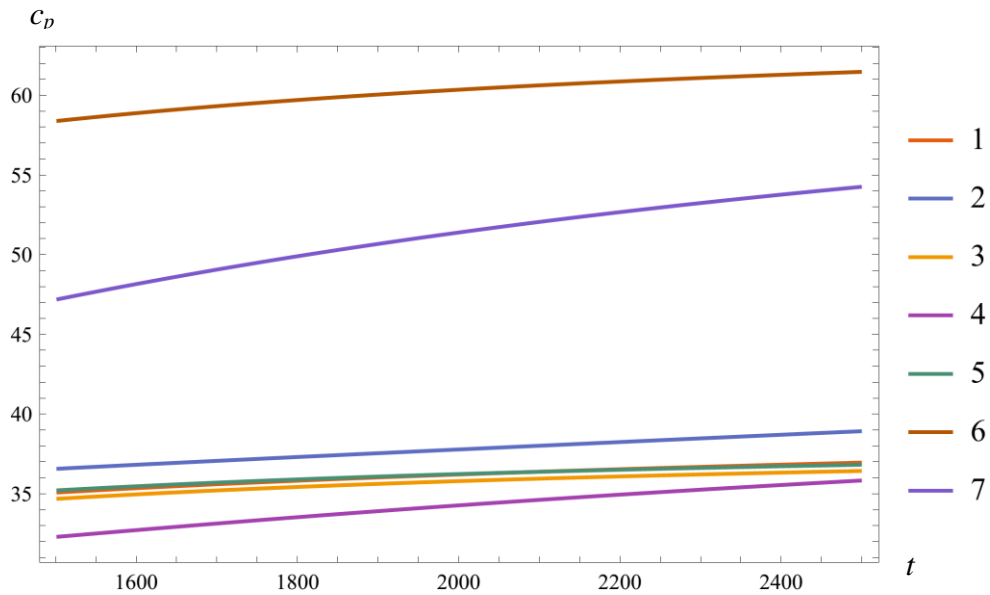
от 200 до 1500°C по методике [10] (все обозначения, как на рис. 1)

**Fig. 2.** Results of calculating the molar heat capacity  $c_p$  in the temperature  $t$  range from 200 to 1500°C according to the method [10] (all symbols as in Fig. 1)



**Рис. 3.** Результаты расчета удельных молярных теплоемкостей  $C_p$  в интервале температур  $t$  от 1501 до 2500°C по методике [8] (все обозначения, как на рис. 1)

**Fig. 3.** Results of calculating the molar heat capacity  $C_p$  in the temperature  $t$  range from 1501 to 2500°C according to the method [8] (all symbols as in Fig. 1)



**Рис. 4.** Результаты расчета удельных молярных теплоемкостей  $C_p$  в интервале температур  $t$  от 1501 до 2500°C по методике [10] (все обозначения, как на рис. 1)

**Fig. 4.** Results of calculating the molar heat capacity  $C_p$  in the temperature  $t$  range from 1501 to 2500°C according to the method [10] (all symbols as in Fig. 1)

*Работа выполнена по госбюджетной теме ИПТС «Создание научных основ разработки гибких мультигенерационных установок с использованием возобновляемых источников энергии и местных ресурсов холода в условиях климатических изменений» (№ госрегистрации 121122300068-6).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Каргин С.А., Исаев А.П., Искендерли Т.И.* Разработка методики расчета показателей рабочего цикла дизелей при различных способах смесеобразования // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2011. № 8(81). С. 69–72.

2. *Бабич А.А., Громов С.А., Левтеров А.М.* Современные методы математического моделирования рабочих процессов дизеля // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2016. № 75. С. 109–115.

3. *Кулешов А.С.* Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС: Автореферат дисс. на соискание ученой степени докт. техн. наук (спец. 05.04.02). Москва. 2011. 32 с.

4. История изобретения калориметра. URL: <https://metrologiya-story.ru/istoriya-izobreteniya-kalorimetra.htm> (Дата обращения 08.06.2023)

5. *Шюле В.* Техническая термодинамика. Т. 1. Кн. 1. М.: Главная редакция энергетической литературы. 1935. 412 с.

6. *Вибе И.И.* Новое о рабочем цикле двигателя. Скорость сгорания и рабочий

цикл двигателя. М.: Свердловск: Машгиз. 1962. 271 с.

7. *Шароглазов Б.А., Попов А.Е.* Уравнения для расчета отношения теплоемкостей рабочего тела в транспортных дизелях // Транспорт Урала. 2011. № 3(30). С. 81–83.

8. *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.

9. *Глушко В.П.* Термодинамические свойства индивидуальных веществ: справ. изд. в 4 т. / под ред. М.: Наука. 1982. 497 с.

10. *Ривкин С.Л.* Термодинамические свойства газов: Справочник. 4-е изд. М.: Энергоатомиздат. 1987. 288 с.

11. *Александров А.А.* Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики // Электронный справочник – URL:<https://www.rosmedlib.ru/book/ISBN9785383013564.html> (Дата обращения 08.06.2023)

12. *Александров А.А., Очков В.Ф., Орлов К.А.* Уравнения и программа для расчета свойств газов и продуктов сгорания // Теплоэнергетика. 2005. № 3. С. 48–55.

13. *Вырубов Д.Н.* Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей // под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. М.: Машиностроение, 1983. 372 с.

#### REFINED MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATION OF HEAT CAPACITY OF WORKING BODIES, INFLUENCING EFFECTIVE AND ENVIRONMENTAL PARAMETERS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

**A.G. Klimenko**

Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28  
E-mail: [kag1958776@gmail.com](mailto:kag1958776@gmail.com)

Modern methods of calculation of working processes of internal combustion engines (ICE) are analyzed, key directions of application of these methods and ways of their improvement in the calculation of specific heat capacities, on which the effective and environmental parameters depend, are determined. The methods of analytical calculation of heat capacity of working bodies in internal combustion engines are analyzed; recommendations on practical use of the methods the application of which gives the smallest

error, used for compilation of reference tables of heat capacity of working bodies, are given. The advantages of the recommended method are analyzed on the basis of calculations and comparative graphs.

**Keywords:** modelling of working processes, internal combustion engines, methods of calculating heat capacity, effective and environmental parameters.

#### REFERENCES

1. Kargin S.A., Isaev A.P., and Iskenderli T.I. Razrabotka metodiki rascheta pokazatelej rabocheho cikla dizel'ej pri razlichnyh sposobah smeseobrazovaniya (Development of the procedure for calculation of diesel engine operating cycle parameters for various mixing methods). *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, No. 8(81), pp. 69–72.

2. Babich A.A., Gromov S.A., and Levterov A.M. Sovremennye metody matematicheskogo modelirovaniya rabochih processov dizelya (Modern methods of mathematical modeling of diesel operating processes). *Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 2016, No. 75, pp. 109–115.

3. Kuleshov A.S. Razvitie metodov rascheta i optimizaciya rabochih processov DVS: special'nost' 05.04.02 «Teplovyje dvigateli»: Avtoref. diss. d-ra tekhn. nauk (Development of calculation methods and optimization of internal combustion engine work processes: specialty 05.04.02 "Heat engines". Synopsis of Dr. tech. sci. thesis). Moscow, 2011, 32 p.

4. <https://metrologiya-story.ru/istoriya-izobreteniya-kalorimetra.html> (June 08, 2023)

5. Shyule V. Tekhnicheskaya termodinamika (Technical thermodynamics). Vol. 1, Moscow: Glavnaya redakciya energeticheskoy literatury, 1935, 412 p.

6. Vibe I.I. Novoe o rabochem cikle dvigatelya. Skorost' sgoraniya i rabochij cikl dvigatelya. (New about engine operating cycle. Engine combustion speed and operating cycle). Moscow, Sverdlovsk: Mashgiz, 1962, 271 p.

7. Sharoglazov B.A. and Popov A.E. Uravneniya dlya rascheta otnosheniya teploemkostej rabocheho tela v transportnyh dizelyah (Equations for calculation of working medium heat capacity ratio in transport diesel engines). *Transport Urala*, 2011, No. 3(30), pp. 81–83.

8. Sobolenko A.N. and Florianskaya M.V. Raschet teploemkosti produktov sgoraniya komprimirovannogo gazovogo topliva marok "a" i "b" v dizelyah (Calculation of heat capacity of combustion products of compressed gas fuel type "a" and "b" in diesel engines) *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2021, No. 2, pp. 65–74.

9. Glushko V.P. Termodinamicheskie svoystva individual'nyh veshchestv (Thermodynamic properties of individual substances). Moscow: Nauka, 1982, 497 p.

10. Rivkin S.L. Termodinamicheskie svoystva gazov (Thermodynamic properties of gases). Moscow: Energoatomizdat, 1987, 288 p.

11. Aleksandrov A.A. available at: <https://www.rosmedlib.ru/book/ISBN9785383013564.html> (June 08, 2023)

12. Aleksandrov A.A., Orlov K.A., and Ochkov V.F. Uravneniya i programma dlya rascheta svoystv gazov i produktov sgoraniya (Equations and program for calculating the properties of gases and combustion products). *Teploenergetika*, 2005, No. 3, pp. 48–55.

13. Vyruhov D.N., Orlina A.S., and Kruglova M.G. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Teoriya porshnevnyh i kombinirovannyh dvigatelej (Internal combustion engines. Theory of piston and combined engines). Moscow: Mashinostroenie, 1983, 372 p.