



УТОЧНЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ, ЭФФЕКТИВНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГАЗОПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.Г. Клименко

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

E-mail: kag1958776@gmail.com

Проанализированы технические характеристики известных моделей газопоршневых двигателей, выпускаемых зарубежными и отечественными производителями. По результатам анализа произведена апробация математической модели теплового расчета и расчета эффективных и экологических показателей согласно сведениям, декларируемым производителями, а также по данным аналитических исследований. Проверена адекватность уточненной математической модели, ее пригодность для дальнейшего моделирования модернизированных газопоршневых двигателей. Произведена оценка средних относительных погрешностей с целью проверки адекватности уточненной математической модели.

Ключевые слова: тепловой расчет, газопоршневой дизель, зарубежный производитель, отечественный производитель, тепловые, эффективные и экологические параметры.

Поступила в редакцию: 25.10.2023. После доработки: 20.12.2023.

Введение. Термодинамические расчеты процессов смесеобразования и сгорания топлив являются основой для дальнейшей разработки конструктивных элементов газопоршневых двигателей (ГПД) (устройств смесеобразования, камер сгорания, впускных и выпускных органов, регуляторов фаз газораспределения, механизмов, регулирующих угол опережения подачи топлива и др.).

На сегодняшний день в мире наиболее признанной и применяемой является методика теплового расчета ДВС, предложенная еще в 1907 году профессором МВТУ Гриневецким В.И., в основе которой имеется ряд допущений и приближений. Методика получила дальнейшее развитие в [1–3].

В связи с постоянным совершенствованием вычислительных методов, усовершенствованием конструкций ДВС методика получила свое дальнейшее развитие. Среди современных методов моделирования рабочих процессов ГПД и их составляющих наиболее детальной информация представлена в исследовании [4].

В настоящей работе проверена на адекватность математическая модель на примере теплового расчета газопоршне-

вых дизелей наиболее известных фирм как зарубежных, так и отечественных производителей с применением методик [1–3], куда включена уточненная математическая модель расчета рабочих тел, предложенная автором [5].

Наибольшую сложность в работе представлял поиск достоверных данных о технических характеристиках объектов исследования. Для этого проведена работа с материалами официальных сайтов производителей и поставщиков газопоршневых двигателей [6–8], аналитических и отчетных материалов [9, 10]. Кроме того, следует отметить, что наибольшую сложность представлял недостаток фактических данных, которые еще в недалеком прошлом указывались практически всеми производителями. Часть производителей не указывают такие параметры, как среднее эффективное давление, расход газового топлива, теплотворная способность используемого топлива и др. Так, если отечественное законодательство нормирует показатели газового топлива (важнейшие показатели – низшая и высшая теплота сгорания, метановое число и др.), то в зарубежной практике такие сведения отсутствуют [11]. Только на продукции фирмы

Caterpillar (США) указаны эти сведения и только по одному показателю – низшей теплоте сгорания топливного газа. С другой стороны, ни одним из отечественным производителем газопоршневых двигателей не указываются сведения о КПД механическом и тепловом (в случае работы в когенерационном режиме).

Методика уточненного расчета тепловых, эффективных и экологических характеристик газопоршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Как уже отмечалось выше, в основу теплового расчет газопоршневых ДВС положена методика [1–4]. Для расчета теплоемкости рабочих тел ГПД применена расчетная методика, предложенная в [13], которая в расчетах ГПД ранее не применялась и применена для сравнительной оценки аналитических методов расчета теплоемкостей в [5].

В качестве исходных данных в расчетах использовались характеристики ГПД зарубежного и отечественного производителя по форме, показанной в табл. 1. В табл. 1 по причине экономии места ука-

заны не все модели ГПД. Всего были проанализированы 56 моделей двигателей, по техническим характеристикам которых рассчитывались тепловые, эффективные и экологические показатели, что будет показано ниже. Из 56 моделей проанализированы 9 моделей отечественного производителя (ОАО «Волжский дизель им. Маминых», ОАО «РУМО», Нижний Новгород, ООО «Алтайский Моторный Завод») и 47 моделей ГПД зарубежного производителя (Jenbacher Австрия, Caterpillar США, MWM Германия, Wilson Великобритания, Perkins Великобритания). По результатам расчетов построены гистограммы важнейших показателей ГПД (эффективная мощность N_e , среднее эффективное давление, p_e , эффективный КПД, η_e , часовой расход топлива), определяющих их тепловую, эффективную и экологическую составляющие (см. рис. 1–4).

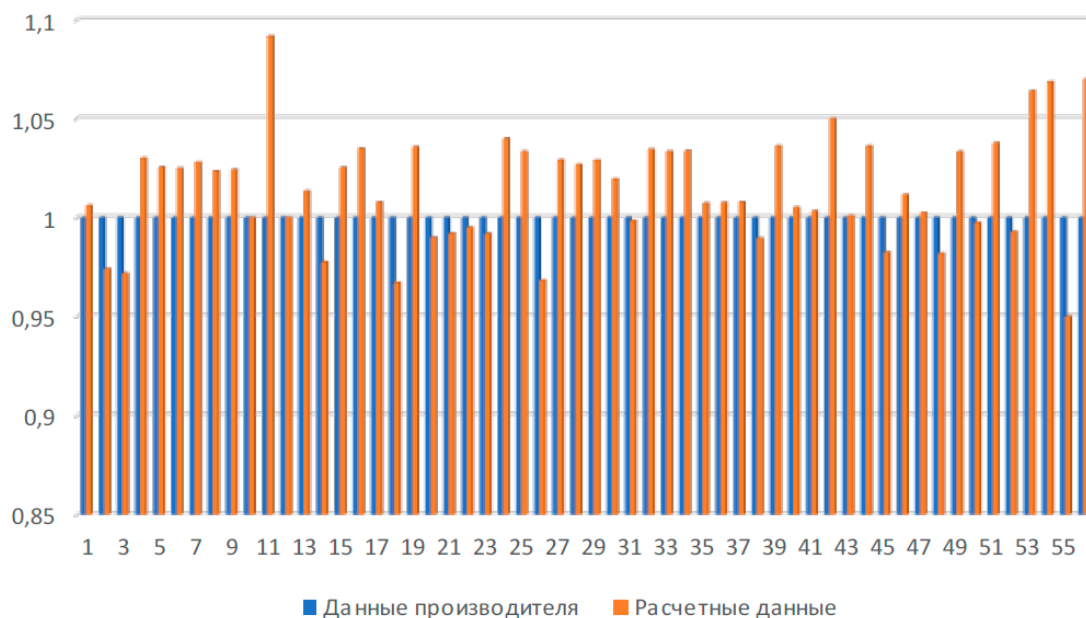


Рис. 1. Сравнительные значения эффективной мощности N_e по данным производителя и теплового расчета ГПД
Fig. 1. Comparative values of effective power N_e according to the manufacturer and thermal calculations of GPE

Таблица 1. Сравнительные параметры ГПД по данным производителей и результатам расчетов

Производитель	Наименование двигателя	Количество, расположение цилиндров	Эффективная мощность, кВт		Среднее индикаторное давление, МПа (расчетное)	Среднее эффективное давление, МПа	Давление наддува	Эффективный КПД		Часовой расход топлива, нм3/ч	
			Данные производителя	Расчет				Данные производителя	Расчет	Данные производителя	Расчет
Jenbacher Австрия	J208	8, L*	330	332	1,84	1,6	0,2	38,7	39,3	90	95,43
	J312	12, V**	637	620,57	1,85	1,7	0,2	40,9	39,5	164	177,66
Caterpillar США	G3306	6, L	72	78,6	0,86	0,6	0,1	-	42,9	27,3	20,7
MWM Германия	TCG 2016 V8	8, L	400	416	1,9	1,9	0,21	42,3	43,9	100	107
Wilson Великобритания	SG240	6, L	192	190	1,35	1,3	0,15	-	40	59,4	54
ОАО "Волжский дизель им. Маминых	ЧН 21/21	6, L	500	491	1,04	0,9	0,12	-	36	156	139
ОАО «РУМО», Нижний Новгород	6ДГ22Г2	6, L	540	558	1,63	1,4	0,18	-	43,6	140	145
	ДГ98М	6, L	1050	1122	1,15	0,98	0,13	-	44	300	286
ООО «Алтайский Моторный Завод»	МТП-100/150	6, L	100	95	0,67	0,4	0,08	-	39	35	28

* L- рядное расположение цилиндров -

** V – V-образное расположение цилиндров

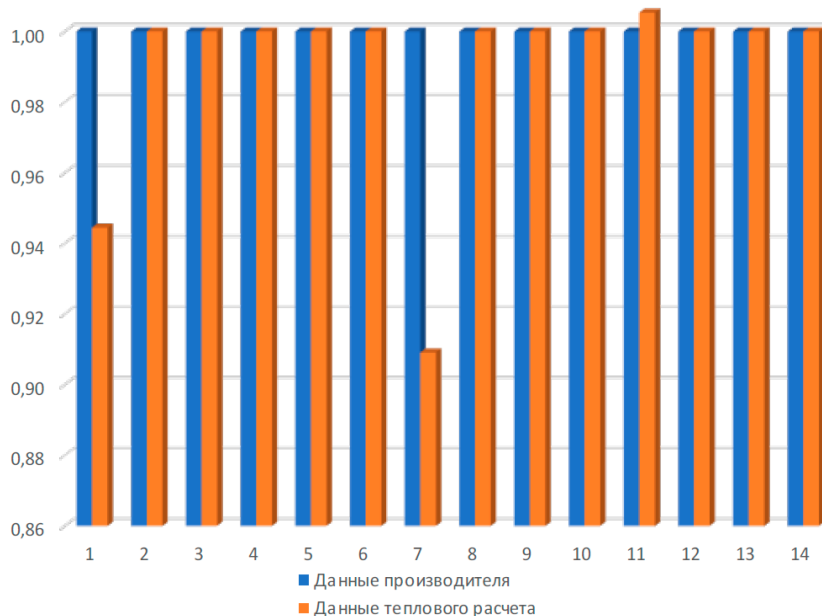


Рис. 2. Сравнительные значения среднего эффективного давления p_e по данным производителя и теплового расчета ГПД
Fig. 2. Comparative values of average effective pressure p_e according to manufacturer's data and thermal calculation of GPE

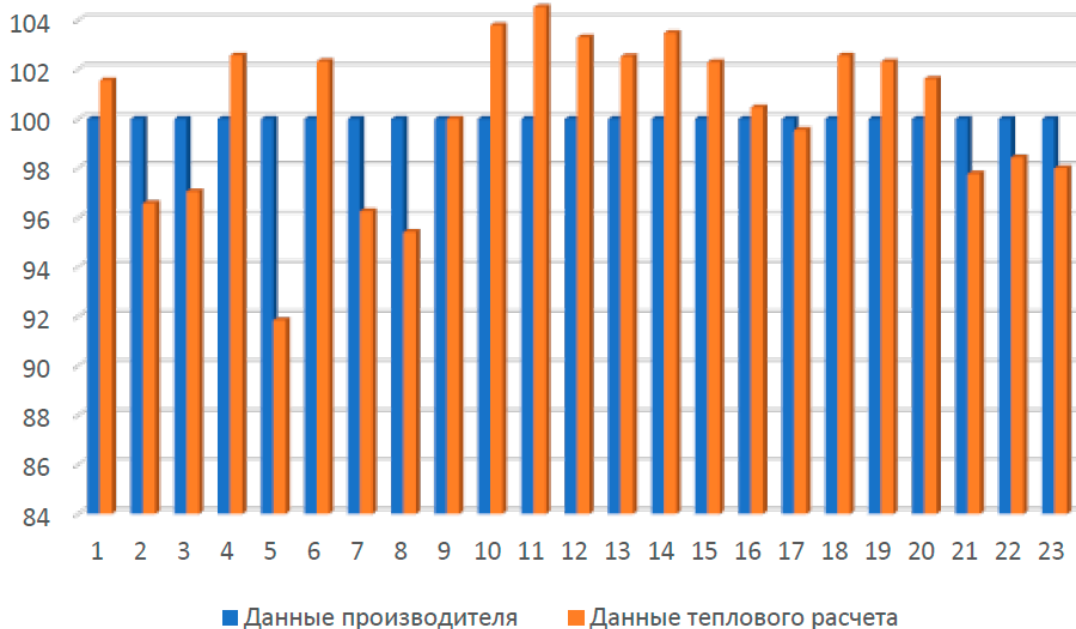


Рис. 3. Сравнительные значения эффективного КПД η_e по данным производителя и теплового расчета ГПД
Fig. 3. Comparative values of effective efficiency η_e according to manufacturer's data and thermal calculation of GPE

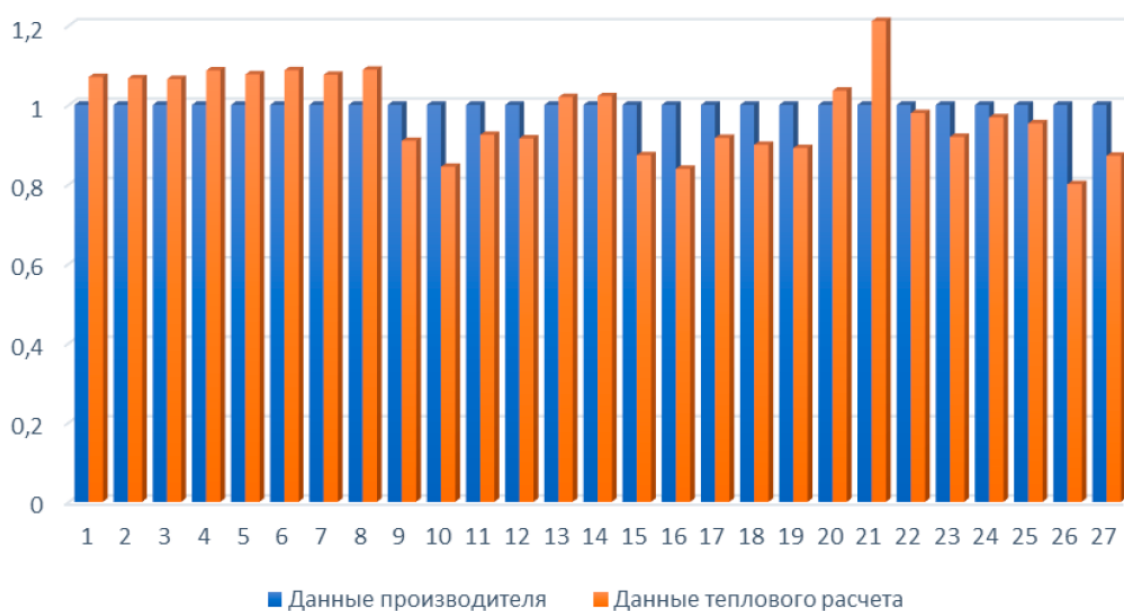


Рис. 4. Сравнительные значения часового расхода газового топлива $G_{m.ch}$ по данным производителя и теплового расчета ГПД
Fig. 4. Comparative values of hourly consumption of gas fuel $G_{f,h}$ according to the manufacturer's data and thermal calculation of GPE

Следует отметить, что выборка показателей от производителя выполнена только в тех случаях, где эти показатели были указаны самим производителем. Данные по остальным моделям не принимались во внимание, и, тем не менее, наименьшее количество выборок (14) составило по показателю «среднее эффективное давление», что вполне может использоваться для проверки адекватности математической модели расчета.

По данным сравнительно теплового расчета выполнена оценка средней относительной погрешности вычисленных значений, указанных выше показателей по [14], которая составила:

- по показателю эффективная мощность N_e 0,02%;
- по показателю среднее эффективное давление p_e 0,01;
- по показателю эффективный КПД η_e 0,02;
- по показателю часового расхода газового топлива $G_{m.ch}$ 0,09.

Выводы. Из совокупности проведенных расчетов тепловых, эффективных и экологических показателей работы ГПД,

а также оценки погрешности выполненных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Предложенная математическая модель показывает хорошее совпадение с данными производителя по показателям тепловых, эффективных и экологических параметров работы двигателей.
2. Расчеты погрешностей, математической модели показывают высокую точность, достаточную для исследовательских задач.
3. Предложенная математическая модель может быть применена качестве базовой для дальнейших исследований и совершенствования рабочих циклов, а также модернизации существующих образцов ГПД.

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. *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.
2. *Байков Б.П., Ваншейдт В.А., Воронцов И.П. и др.* Дизели: Справочник / Л.: Машиностроение. 1977. 479 с.
3. *Коллеров Л.К.* Газовые двигатели поршневого типа. Л.: Машгиз. 1955. 212 с.
4. *Костин А.К., Пугачёв Б.П., Кочинев Ю.Ю.* Работа дизелей в условиях эксплуатации: Справочник. Л.: Машиностроение. 1989. 284 с.
5. *Клименко А.Г.* Уточненная математическая модель расчета теплоемкости рабочих тел, влияющих на эффективные и экологические параметры двигателей внутреннего сгорания // Системы контроля окружающей среды. 2023. № 2(52). С. 123–129.
6. *Электронный ресурс:* <https://www.gazecos.ru/tablegpu.html> (дата обращения: 28.11.2023)
7. *Электронный ресурс:* https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=788 (дата обращения: 20.11.2023)
8. *Электронный ресурс:* <https://cogeneration.ru/?ysclid=lpwmpaqnlc736211544>. (дата обращения: 22.11.2023)
9. *Сорокин В.А., Иванов М.Ю.* Сравнительный анализ технико-эксплуатационных характеристик отечественных и зарубежных судовых дизельных двигателей мощностью до 3 МВт // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2011. № 34. С. 111–131.
10. *Буров В.Д., Дудолин А.А., Макаревич В.В., Макаревич Е.В.* Потенциал применения газопоршневых двигателей зарубежных производителей на территории РФ // Вестник МЭИ. 2009. № 3. С. 5–11.
11. *Изотов Н.И.* Требования к качеству СПГ за рубежом // Транспорт на альтернативном топливе. 2014. № 5(41). С. 20–35.
12. *ГОСТ 5542-2014.* Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. М: Стандартинформ. 2015.
13. *РМГ 29-2013* ГСИ. Метрология. Основные термины и определения Рекомендации по межгосударственной стандартизации. № 29–2013.

UPDATED MATHEMATICAL MODEL OF THERMAL, EFFECTIVE AND ENVIRONMENTAL PARAMETERS OF GAS PISTON ENGINES

A.G. Klimenko

¹Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

²Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

The technical characteristics of known models of gas piston engines manufactured by foreign and domestic manufacturers are analyzed. Based on the results of the analysis, a mathematical model of calculation of thermal, effective and environmental parameters is tested according to the information declared by the manufacturers, as well as according to analytical research data. The adequacy of the mathematical model, its suitability for further modeling of modernized gas piston engines is confirmed. Absolute and relative errors are evaluated in order to test the adequacy of the updated mathematical model.

Keywords: thermal calculation, gas piston diesel, foreign manufacturer, domestic manufacturer, thermal, efficient and environmental parameters.

REFERENCES

1. Babich A.A., Gromov S.A., and Levterov A.M. Sovremennyye metody matematicheskogo modelirovaniya rabochnih 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.
2. Bajkov B.P., Vanshejdt V.A., and Voronov I.P. et al. Dizeli: Spravochnik (Diesels: Handbook). Leningrad: Mashinostroenie, 1977, 479 p.
3. Kollerov L.K. Gazovye dvigateli porshnevoogo tipa (Piston type gas engines). Leningrad: Mashgiz, 1955, 212 p.
4. Kostin A.K., Pugachjov B.P., and Kochinev Ju.Ju. Rabota dizelej v usloviyah ekspluatatsii: Spravochnik (Diesel engine operation under operating conditions: Handbook). Leningrad: Mashinostroenie, 1989, 284 p.
5. Klimenko A.G. Utochnennaya matematicheskaya model' rascheta teploemkosti rabochnih tel, vlijajushhih na effektivnyye i ekologicheskie parametry dvigatelej vnutrennego sgoraniya (Updated mathematical model for calculation of heat capacity of working substances affecting effective and environmental parameters of internal combustion engines). *Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy*, 2023, No 2(52), pp. 123–129.
6. <https://www.gazecos.ru/tablegpu.html> (November 28, 2023).
7. https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=788 (November 20, 2023)
8. <https://cogeneration.ru/?ysclid=lpwmpaqnlc736211544> (November 11, 2023)
9. Sorokin V.A. and Ivanov M.Ju. Sravnitel'nyj analiz tehniko-ekspluatacionnyh harakteristik otechestvennyh i zarubezhnyh sudovyh dizelnyh dvigatelej moshhnost'ju do 3 MVt (Comparative analysis of technical and operational characteristics of domestic and foreign marine diesel engines with capacity up to 3 MWt). *Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva*, 2011, No. 34, pp. 111–131.
10. Burov V.D., Dudolin A.A., Makarevich V.V., and Makarevich E.V. Potencial primeneniya gazoporshnevnyh dvigatelej zarubezhnyh proizvoditelej na territorii RF (Potential of application of gas piston engines of foreign manufacturers in the territory of the Russian Federation). *Vestnik MJeI*, 2009, No. 3, pp. 5–11.
11. Izotov N.I. Trebovaniya k kachestvu SPG za rubezhom (LNG quality requirements abroad). *Transport na al'ternativnom toplive*, 2014, No. 5(41), pp. 20–35.
12. GOST 5542-2014, Moscow, Standartinform, 2015.
13. RMG 29-2013 GSI, № 29, Moscow, Standartinform, 2015.