

Научные труды Дальрыбвтуза. 2023. Т. 65, № 3. С. 110–119.

Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2023. Vol. 65, no 3. P. 110–119.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Научная статья

УДК 621.431.74.016

DOI: <https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2023-65-13>

**Результаты экспериментального исследования параметров
рабочего процесса, динамики тепловыделения и температуры пламени
судового высокооборотного дизеля**

Борис Иванович Руднев¹, Ольга Владимировна Повалихина²

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
Владивосток, Россия

^{1,2} povalichina@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования параметров рабочего процесса, динамики тепловыделения и температуры пламени в судовом высокооборотном дизеле 8 ЧН 13/14. Они существенно дополняют базу данных верификации математических моделей, относящихся к рабочему процессу современных судовых высокооборотных дизелей.

Ключевые слова: судовой дизель, параметры рабочего процесса, динамика тепловыделения, температура пламени

Для цитирования: Руднев Б.И., Повалихина О.В. Результаты экспериментального исследования параметров рабочего процесса, динамики тепловыделения и температуры пламени судового высокооборотного дизеля // Научные труды Дальрыбвтуза. 2023. Т. 65, № 3. С. 110–119.

MARINE POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2023-65-13>

**Results of experimental investigation of parameters work of process, dynamics
of heat emission and temperature of flame in marine high speed diesel**

Boris I. Rudnev¹, Olga V. Povalikhina²

Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia

^{1,2} povalichina@mail.ru

Abstract. Results of experimental investigation of parameters work of process, dynamics heat emission and temperature of flame in marine high speed diesel type 8 ChN 13/14 are present-

ed. They respectable addition base of data for verification of mathematical models appertain to work of process modern marine high speed diesels.

Keywords: marine diesel, parameters of work process, dynamics of heat emission, temperature of flame

For citation: Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Results of experimental investigation of parameters work of process, dynamics of heat emission and temperature of flame in marine high speed diesel. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2023;65(3):110–119. (in Russ.).

Введение

При проектировании и доводке современных судовых дизелей используется большой комплекс математических моделей (ММ), в том числе связанных с моделированием как интегральных параметров рабочего процесса, так и локальных характеристик тепловыделения в камере сгорания (КС) [1]. Однако при верификации указанных ММ наблюдается значительный недостаток экспериментальных данных по интегральным параметрам рабочего процесса и по локальным характеристикам сгорания топлива в КС, в частности, по температуре пламени. Особенно это касается судовых высокооборотных дизелей. Целью настоящей статьи является представление и обсуждение результатов экспериментального исследования указанных выше параметров, полученных при испытании судового высокооборотного дизеля типа 8 ЧН 13/14.

Параметры рабочего процесса

Испытания судового высокооборотного дизеля типа 8 ЧН 13/14 при определении параметров рабочего процесса проводились по нагрузочной и внешней скоростной характеристикам. Основные технические данные указанного дизеля следующие:

Диаметр цилиндра	D=130 мм
Ход поршня	S=140 мм
Порядок работы цилиндров	1-5-4-2-6-3-7-8
Рабочий объем всех цилиндров	14,86 л
Степень сжатия	$\epsilon=16,5$
Номинальная мощность	$N_e=158$ кВт
Номинальная частота вращения коленчатого вала	$n=1700$ мин ⁻¹
Способ смесеобразования	Непосредственный впрыск
Камера сгорания	Неразделенного типа в поршне
Давление наддува (избыточное) при номинальной мощности	0,05 МПа
Угол опережения подачи топлива	$\varphi_{оп}=23^0$ поворота коленчатого вала (ПКВ) до верхней мертвой точки (ВМТ)

Результаты экспериментального исследования, показывающие изменение параметров рабочего процесса по нагрузочной и внешней скоростным характеристикам, представлены на рис. 1–4. Перечень измеряемых параметров и описание контрольно-измерительного комплекса приведены авторами настоящей статьи ранее в работе [1]. Следует отметить, что полученные измерения параметров рабочего процесса дизеля 8 ЧН 13/14 являются

характерными для высокооборотных дизелей такого типа с полуразделенными камерами сгорания (КС) [2–4].

Увеличение часового расхода топлива с ростом нагрузки от $P_{me}=0,12$ МПа до 0,61 МПа в пределах $G_T=12,4-32,1$ кг/ч приводит к уменьшению суммарного коэффициента избытка воздуха от $\alpha=4,4$ до $\alpha=2,0$ (рис.1).

В то же время увеличение нагрузки в указанных выше пределах сопровождается ростом располагаемой теплоты, срабатываемой в турбине турбокомпрессора. Последнее приводит к возрастанию частоты вращения крыльчатки центробежного компрессора и повышению давления наддува P_k .

Увеличение механического КПД η_m по нагрузочной характеристике объясняется увеличением индикаторной мощности дизеля N_i при практически постоянной мощности механических потерь N_m (потери на трение в цилиндропоршневой группе, вентиляционные потери, потери на привод вспомогательных агрегатов). При испытании по нагрузочной характеристике с $n=1700$ мин⁻¹ η_m изменяется от 0,46 до 0,87, при изменении N_e от 25,2 кВт до 125,8 кВт. Рост цикловой подачи топлива приводит к увеличению максимального давления сгорания P_{max} от 6,2 МПа до 8,9 МПа и максимальной температуры цикла T_{max} от 1500 К до 1940 К (рис. 2).

Изменение параметров рабочего процесса при испытании по внешней скоростной характеристике представлено на рис. 3, 4. Характер их протекания качественно хорошо согласуется с результатами испытаний дизелей подобного класса и общеизвестен из теории двигателей внутреннего сгорания [4, 5].

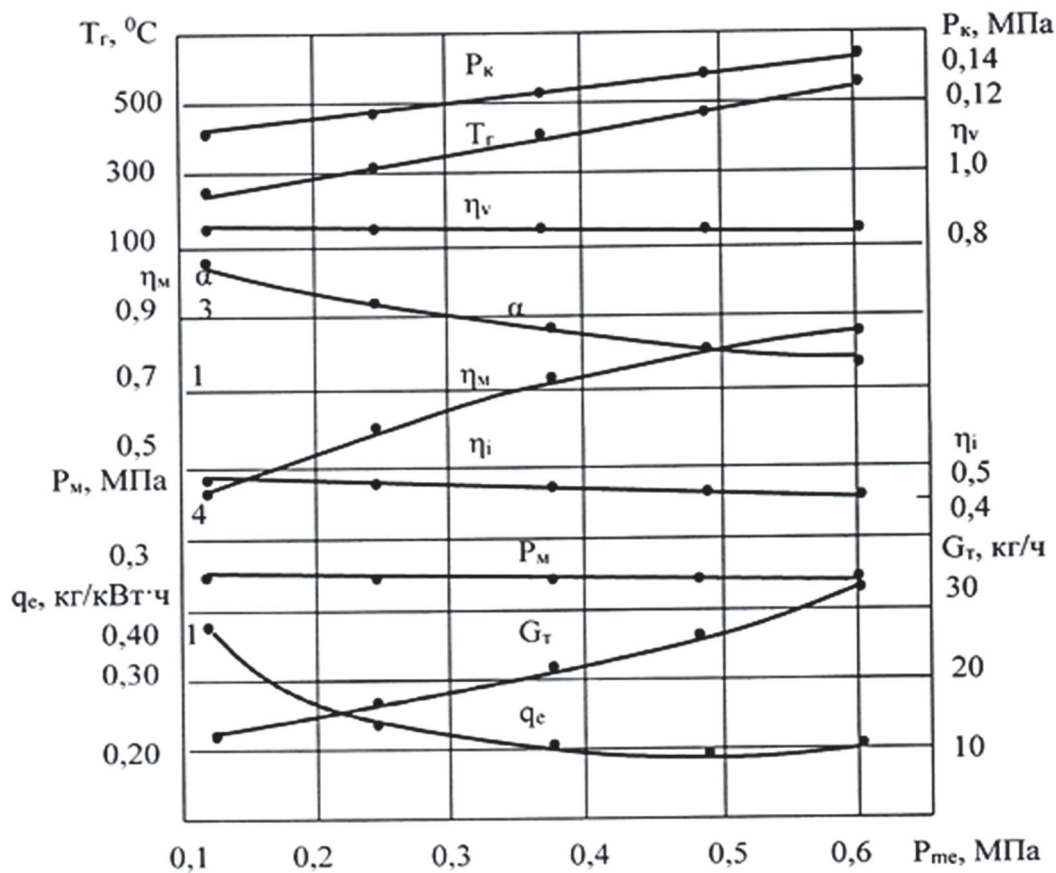


Рис. 1. Нагрузочная характеристика дизеля 8 ЧН 13/14, $n=1700$ мин⁻¹
 Fig. 1. Power characteristics of diesel 8 CHN 13/14, $n=1700$ min⁻¹

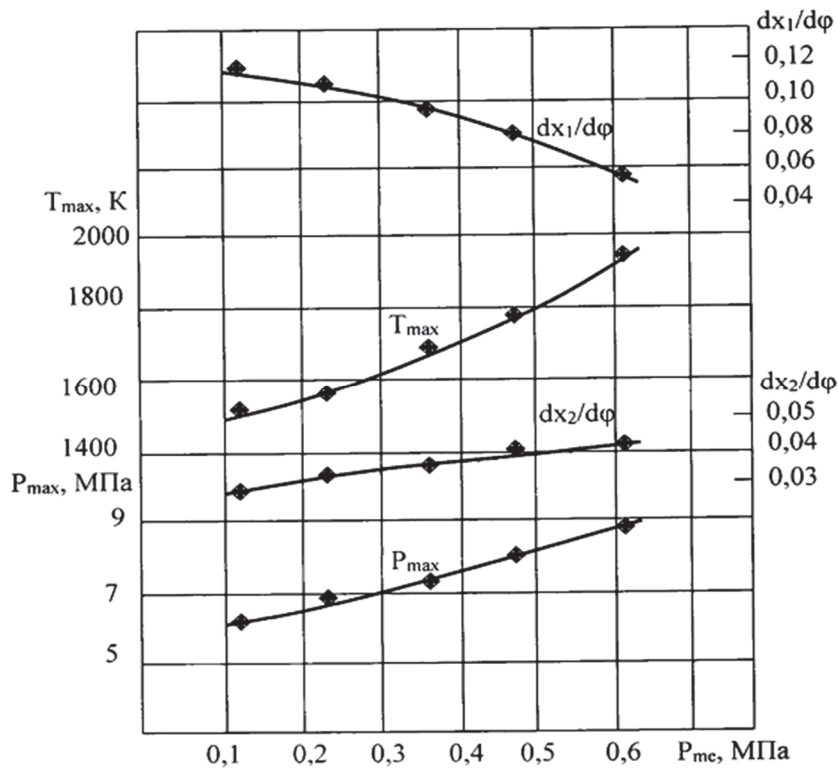


Рис. 2. Изменение параметров рабочего процесса дизеля 8 ЧН 13/14 при испытании по нагрузочной характеристике, $n=1700 \text{ мин}^{-1}$
Fig. 2. Variation of parameters work process diesel 8 ChN 13/14 by experience from power of characteristics $n=1700 \text{ min}^{-1}$

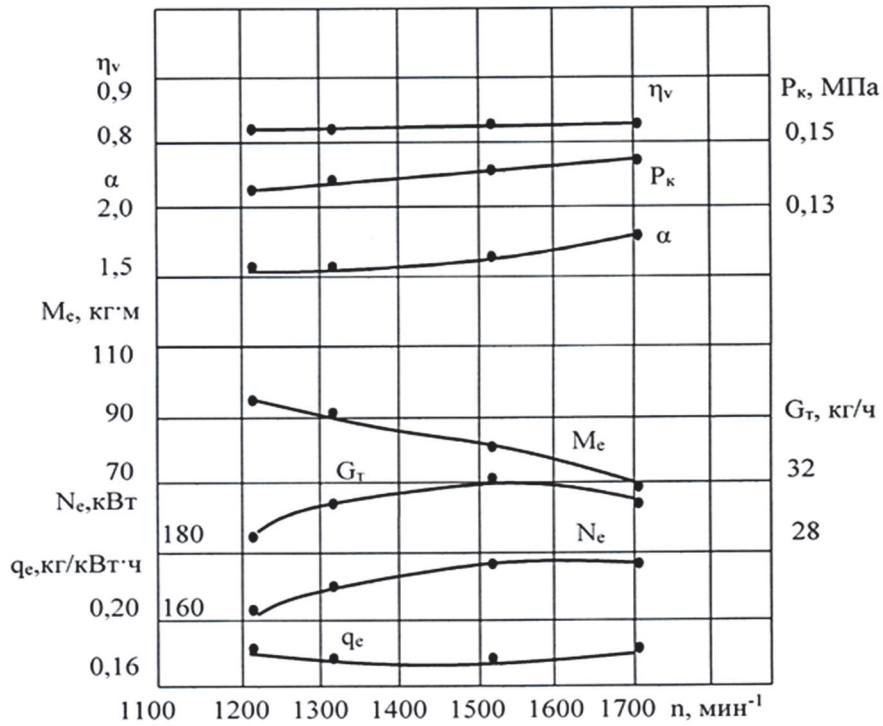


Рис. 3. Внешняя скоростная характеристика дизеля 8 ЧН 13/14
Fig. 3. External speed characteristics of diesel 8 ChN 13/14

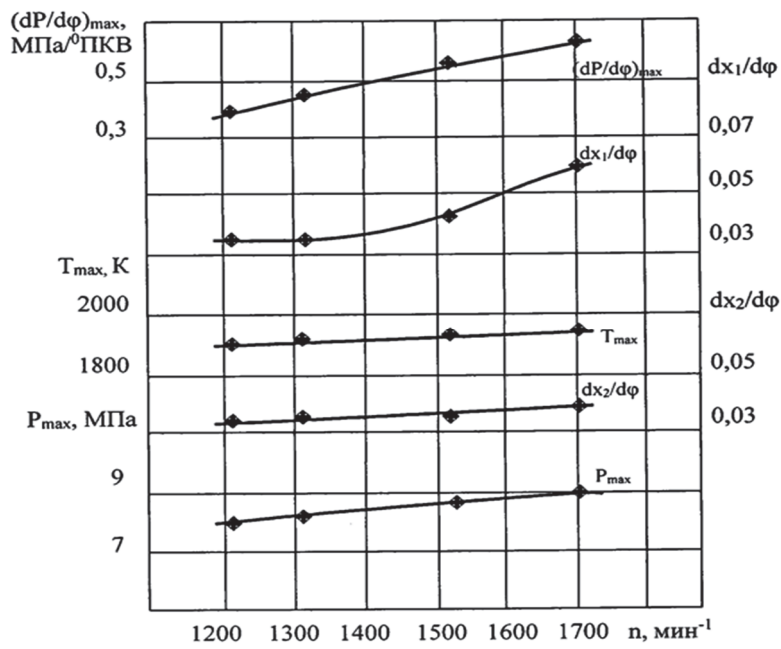


Рис. 4. Изменение параметров рабочего процесса дизеля 8 ЧН 13/14 по внешней скоростной характеристике

Fig. 4. Variation of parameters work process diesel 8 ChN 13/14 from external of speed characteristics

Динамика тепловыделения в камере сгорания

Изменение характеристик динамики тепловыделения $dx/d\phi$ с ростом нагрузки показано на рис. 5.

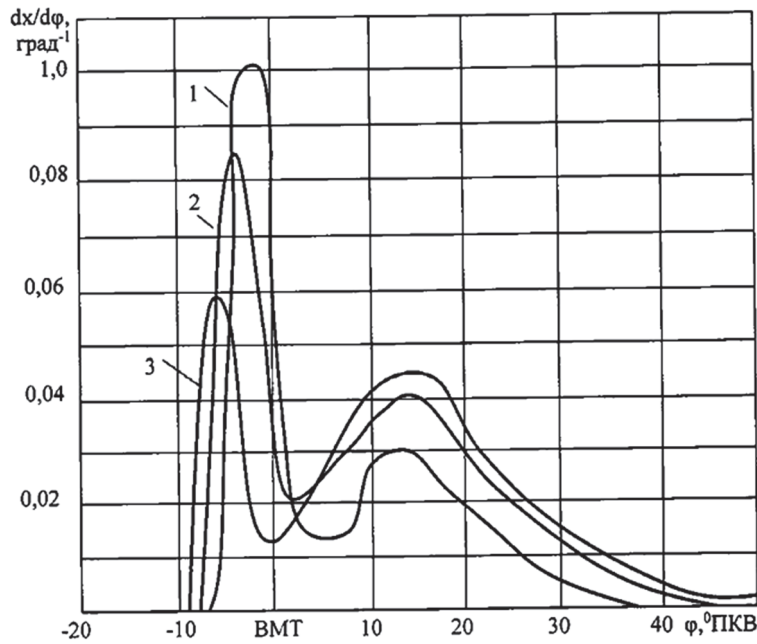


Рис. 5. Изменение динамики тепловыделения дизеля 8 ЧН 13/14 при испытании по нагрузочной характеристике: 1 – $P_{me}=0,61$ МПа; 2 – $P_{me}=0,49$ МПа; 3 – $P_{me}=0,24$ МПа

Fig. 5. Variation of dynamics heat emission 8 ChN 13/14 by experience from power of characteristics: 1 – $P_{me}=0,61$ МПа; 2 – $P_{me}=0,49$ МПа; 3 – $P_{me}=0,24$ МПа

Их протекание по углу ПКВ и перераспределение тепла в цикле объясняются условиями протекания процессов подачи, испарения и сгорания топлива, различных для соответствующих режимов. При увеличении нагрузки возрастание температуры реагирующих продуктов, количества и продолжительности подачи топлива в цикле вызывает:

1) сокращение периода задержки воспламенения (периода индукции), в результате чего уменьшается доля топлива, подготовленного к гомогенному сгоранию, что в свою очередь вызывает снижение количества выделяющейся теплоты и максимальной скорости тепловыделения на начальном участке $dx_1/d\varphi$;

2) последующий этап диффузионного сгорания «сдвигается вправо» по углу ПКВ от ВМТ, увеличивается доля топлива, сгорающего по этому механизму, и $dx_2/d\varphi$.

Изменение параметров динамики тепловыделения при испытании по внешней скоростной характеристике представлено на рис. 6. На характер протекания этих процессов оказывают влияние многие факторы. С уменьшением частоты вращения коленчатого вала снижается весовое наполнение цилиндров воздухом. В то же время несколько возрастает цикловая подача топлива, увеличивается время, отводимое на подготовительные процессы испарения и смешения с воздухом доли топлива, впрыскиваемой за период задержки воспламенения. Вместе с тем в результате потери энергии воздушного заряда в конце такта сжатия ухудшаются условия для турбулентной диффузии, уменьшается дисперсность распыла топлива форсункой вследствие снижения скорости впрыска топлива в КС.

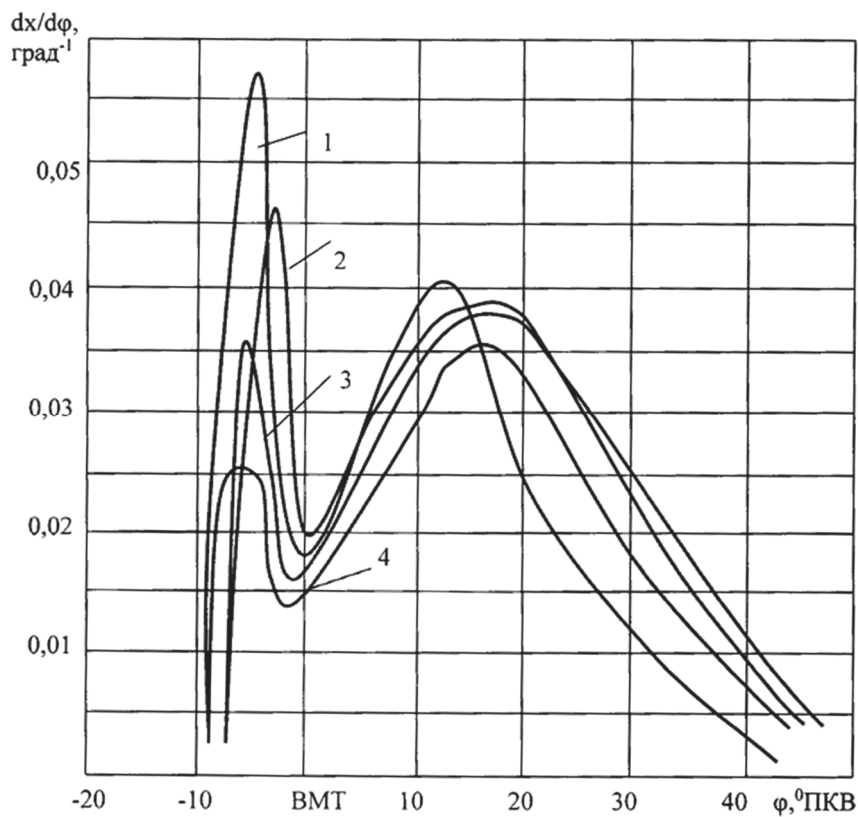


Рис. 6. Изменение динамики тепловыделения дизеля 8 ЧН 13/14 при испытании по внешней скоростной характеристике: 1 – $n=1700 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $n=1500 \text{ мин}^{-1}$; 3 – $n=1300 \text{ мин}^{-1}$; 4 – $n=1200 \text{ мин}^{-1}$

Fig. 6. Variation of dynamics heat emission of diesel 8 ChN 13/14 by experience from external of speed characteristics: 1 – $n=1700 \text{ min}^{-1}$; 2 – $n=1500 \text{ min}^{-1}$; 3 – $n=1300 \text{ min}^{-1}$; 4 – $n=1200 \text{ min}^{-1}$

В результате, несмотря на увеличение времени, отводимого на процессы испарения и смешения топлива с кислородом воздуха, ухудшаются физические условия для протекания этих процессов (уменьшение концентрации кислорода, понижение турбулентной диффузии, снижение дисперсности топливных капель), уменьшается доля топлива, подготовленного к сгоранию за период задержки воспламенения, а следовательно, уменьшается максимальная скорость тепловыделения на первом участке $dx_1/d\varphi$.

Некоторое увеличение цикловой подачи топлива при снижении суммарного коэффициента избытка воздуха α по мере уменьшения частоты вращения коленчатого вала «сдвигают» процесс последующего диффузионного горения и догорания «вправо» от ВМТ по углу ПКВ. Этим объясняется характер изменения максимальной скорости тепловыделения на втором участке $dx_2/d\varphi$ [6].

Температура пламени в камере сгорания

Экспериментальные данные об изменении температуры пламени в КС дизеля 8 ЧН 13/14 в функции угла ПКВ при испытании по нагрузочной и внешней скоростным характеристикам получены с применением методики и контрольно-измерительного комплекса, описание в [6, 7], представлены на рис. 7 и 8. Анализ температурных условий в КС при увеличении нагрузки показывает, что индикаторная температура газов существенно повышается по абсолютным значениям на всем участке изменения в цикле.

В то же время увеличение температуры пламени происходит с меньшей интенсивностью. Так, при росте нагрузки от $P_{me}=0,24$ до $0,61$ МПа T_{max} возросла на 300 К, а температура пламени – лишь на 80 К. Отмеченное можно объяснить незначительным изменением локальных коэффициентов прямой и обратной диффузии горючего газа, кислорода воздуха и продуктов сгорания. Индикаторная же температура газов отражает результат одновременно протекающих во всем объеме КС процессов тепло- и массопереноса и изменяется пропорционально количеству выделяющегося при сгорании топлива теплоты.

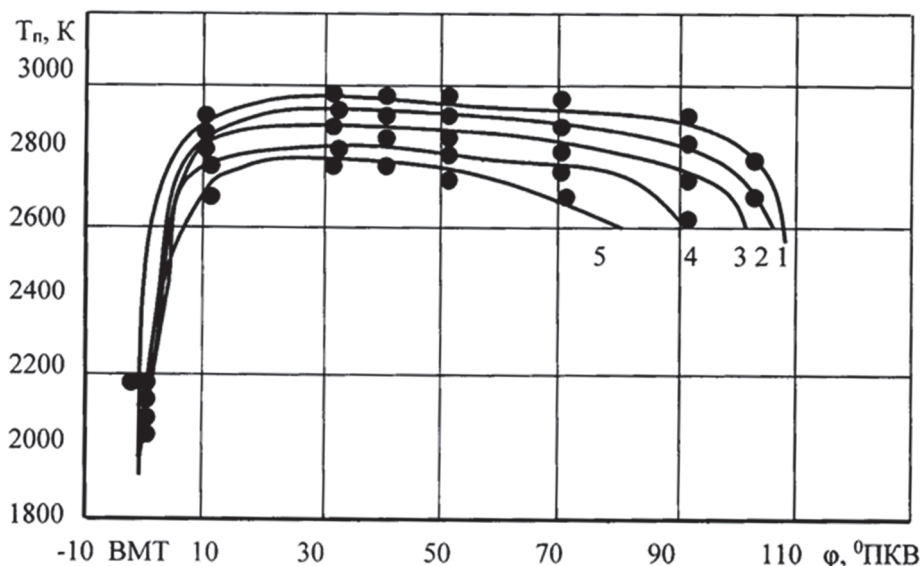


Рис. 7. Изменение температуры пламени в дизеле 8 ЧН 13/14 при испытании по нагрузочной характеристике, $n=1700$ мин⁻¹: 1 – $P_{me}=0,61$ МПа; 2 – $P_{me}=0,49$ МПа;

3 – $P_{me}=0,36$ МПа; 4 – $P_{me}=0,24$ МПа; 5 – $P_{me}=0,12$ МПа

Fig. 7. Variation temperature flame in diesel 8 ChN 13/14 by experience from power characteristics,

$n=1700$ min⁻¹: 1 – $P_{me}=0,61$ МПа; 2 – $P_{me}=0,49$ МПа;

3 – $P_{me}=0.36$ МПа: 4 – $P_{me}=0.24$ МПа: 5 – $P_{me}=0.12$ МПа

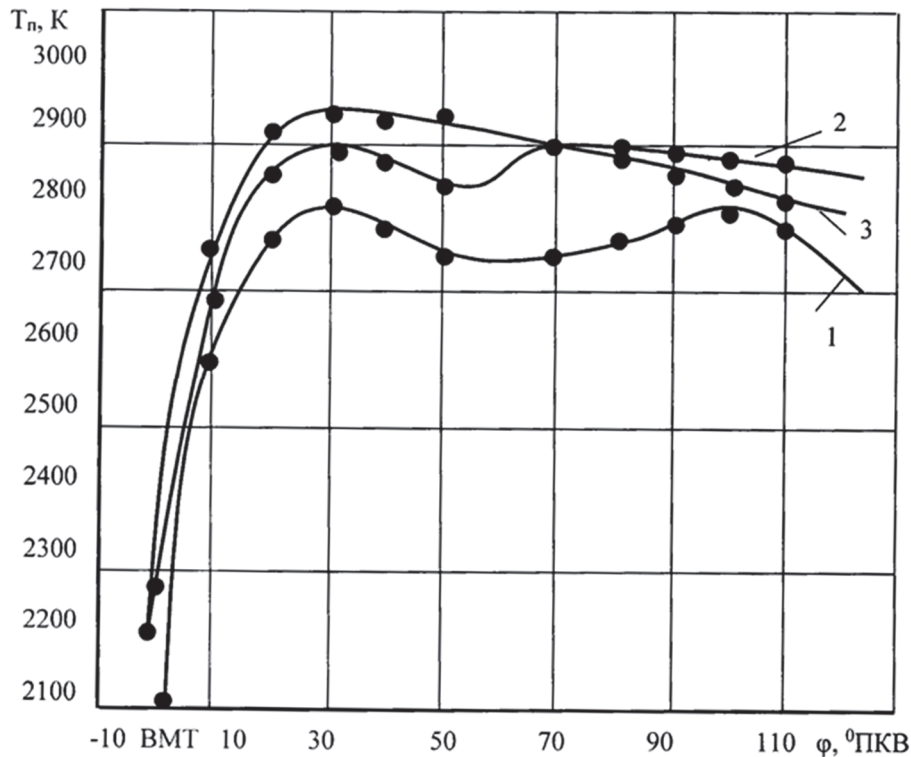


Рис. 8. Изменение температуры пламени в дизеле 8 ЧН 13/14 при испытании по внешней скоростной характеристике: 1 – $n=1200 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $n=1500 \text{ мин}^{-1}$; 3 – $n=1700 \text{ мин}^{-1}$

Fig. 8. Variation of temperature flame in diesel 8 ChN 13/14 by experience of speed characteristics: 1 – $n=1200 \text{ min}^{-1}$; 2 – $n=1500 \text{ min}^{-1}$; 3 – $n=1700 \text{ min}^{-1}$

В то же время увеличение температуры пламени происходит с меньшей интенсивностью. Так, при росте нагрузки от $P_{me}=0,24$ до $0,61 \text{ Мпа}$ T_{max} возросла на 300 К , а температура пламени – лишь на 80 К . Отмеченное можно объяснить незначительным изменением локальных коэффициентов прямой и обратной диффузии горючего газа, кислорода воздуха и продуктов сгорания. Индикаторная же температура газов отражает результат одновременно протекающих во всем объеме КС процессов тепло- и массопереноса и изменяется пропорционально количеству выделяющегося при сгорании топлива теплоты.

Изменение температуры пламени по углу ПКВ при работе дизеля по нагрузочной характеристике, как показали экспериментальные исследования, аналогично таковому при испытании по внешней скоростной характеристике. На кривых $T_n=f(\varphi)$ (см. рис. 7 и 8) можно выделить участок, в течение которого температура пламени остается примерно постоянной, продолжительность этого участка сокращается по мере уменьшения нагрузки. Температура пламени достигает своего максимального значения примерно в районе второго максимума динамики тепловыделения $(dx/d\varphi)_{max2}$. Некоторое уменьшение максимальной температуры пламени по мере снижения частоты вращения коленчатого вала дизеля можно объяснить увеличением затрат теплоты в очагах горения на нагрев сажистых частиц и их излучение.

В целом выполненные исследования по измерению температур пламени показали, что на стадии основного горения высокотемпературные очаги окислительных реакций, составляющие структуру дизельного пламени, занимают весь объем КС и в совокупности с продолжительным сохранением высоких значений температур в объеме КС в течение цикла ($2400\text{--}2900 \text{ К}$) объясняют повышенное содержание оксидов азота в отработанных газах дизелей [8, 9].

Заключение

Представленные в статье экспериментальные значения по параметрам рабочего процесса, динамике тепловыделения и температуры пламени в КС судового высокооборотного дизеля 8 ЧН 13/14 значительно дополняют базу данных, которая используется конструкторами и исследователями для верификации соответствующих СС. Это дает возможность существенно повысить качество проектирования и сократить сроки доводки новых моделей судовых высокооборотных дизелей.

Список источников

1. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 720 с.
2. Чернышев Г.Д., Хачиян А.С., Пикус В.И. Рабочий процесс и теплонапряженность автомобильных дизелей. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.
3. Семенов Б.Н., Павлов Е.П., Концев В.П. Рабочий процесс высокооборотных дизелей малой мощности. Л.: Машиностроение, 1990. 208 с.
4. Дьяченко Н.Х., Костин А.К., Пугачев Б.П. и др. Теория двигателей внутреннего сгорания. Л.: Машиностроение, 1974. 552 с.
5. Вырубов Д.Н., Иващенко Н.А., Ивин В.И. и др. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей. М.: Машиностроение, 1983. 372 с.
6. Руднев Б.И. Процессы локального теплообмена в камере сгорания дизелей. Владивосток: Дальнаука, 2000. 221 с.
7. Руднев Б.И., Поваляхина О.В. Контрольно-измерительный комплекс для исследования параметров рабочего процесса и радиационно-конвективного теплообмена в камере сгорания судового высокооборотного дизеля // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2. Ч. 1. С. 73–78.
8. Смайлс В.И. Малотоксичные дизели. Л.: Машиностроение, 1972. 128 с.
9. Кульчицкий А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей. М.: Академический проект, 2004. 320 с.

References

1. Kavtaradze R.Z. Theory of piston engines. Special chapters. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2008. 720 p.
2. Chernyshev G.D., Khachiyan A.S., Pikus V.I. Workflow and thermal stress of automobile diesels. M.: Mechanical engineering, 1986. 216 p.
3. Semenov B.N., Pavlov E.P., Kontsev V.P. The working process of high-speed diesel engines of low power. L.: Mechanical engineering, 1990. 208 p.
4. Dyachenko N.H., Kostin A.K., Pugachev B.P., etc. Theory of internal combustion engines. L.: Mechanical Engineering, 1974. 552 p.
5. Vyubov D.N., Ivashchenko N.A., Ivin V.I. and others. Internal combustion engines: Theory of reciprocating and combined engines. Moscow: Mashinostroenie, 1983. 372 p.
6. Rudnev B.I. Processes of local heat exchange in the combustion chamber of diesel engines. Vladivostok: Dalnauka, 2000. 221 p.
7. Rudnev B.I., Povalikhina O.V. Control and measuring complex for studying the parameters of the working process and radiation-convective heat exchange in the combustion chamber of a marine high-speed diesel engine // Marine Intelligent Technologies. 2022. No. 2. Part 1. P. 73–78.
8. Smilis V.I. Low-toxic diesels. L.: Mechanical engineering, 1972. 128 p.
9. Kulchitsky A.R. Toxicity of automobile and tractor engines. M.: Academic project, 2004. 320 p.

Информация об авторах

Б.И. Руднев – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры холодильной техники, кондиционирования и теплотехники, SPIN-код: 2797-1790, AuthorID: 423385;

О.В. Повалихина – доцент, доцент кафедры холодильной техники, кондиционирования и теплотехники, SPIN-код: 9956-1129, AuthorID: 875839.

Information about the authors

B.I. Rudnev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Refrigeration, Air conditioning and Heat Engineering, SPIN-code: 2797-1790, AuthorID: 423385;

O.V. Povalichina – Associate Professor, Associate Professor of the Department of Refrigeration, Air conditioning and Heat Engineering, SPIN-code: 9956-1129, AuthorID: 875839.

Статья поступила в редакцию 26.09.2023; одобрена после рецензирования 28.09.2023; принята к публикации 02.10.2023.

The article was submitted 26.09.2023; approved after reviewing 28.09.2023; accepted for publication 02.10.2023.