

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-141-153

USING THE THERMODYNAMIC PROCESSES FEATURES TO ASSESS THE DIESEL POWER PLANTS TECHNICAL CONDITION

V. I. Kochergin, S. P. Glushkov, E. S. Zinchenko

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation

The results of studying the thermodynamic processes features and analyzing the prospects for using their characteristics to assess the technical condition of diesel power plants are contained in the paper. A structural diagram of a ship power plant, which is proposed to be considered consisting of separate components of mechanical part, thermodynamic part, fuel supply system and automatic speed control system equal in degree of influence on efficiency is proposed. The theoretical analysis results of the joint operation of the mechanical and thermodynamic components of the diesel power function have shown that the temperature of the working surfaces is an important characteristic of the power plant technical state. The concept of the thermodynamic component in this case refers to a combination of fuel combustion processes and combustion product expansion. To improve the design and efficiency of power plants operation, it is necessary to further study the in-cylinder fuel combustion processes and develop operational methods for monitoring the thermal state of diesel internal combustion engines. Control of changes in functional dependencies of working medium temperature on operating conditions and technical condition can in practice contribute to increase the efficiency of ship power plants operation. The experimental studies of the thermal imaging methods prospects to assess the diesel engines technical condition are carried out. It is found that the control reliability increases with an increase in the size of the diesel engine frame due to a decrease in the intensity of the dynamics of temperature equalization of individual cylinders. At the same time, the most expedient and informative is the control of the temperature of the diesel engine exhaust manifold, carried out during the heating of the cold engine or immediately after its completion.

Keywords: power plant, marine diesel, thermodynamic process, fuel combustion, thermomentering, thermal imager.

For citation:

Kochergin, Victor I., Sergei P. Glushkov, and Evgenii S. Zinchenko. "Using the thermodynamic processes features to assess the diesel power plants technical condition." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 141–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-141-153.

УДК 62–971

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В. И. Кочергин, С. П. Глушков, Е. С. Зинченко

Сибирский государственный университет путей сообщения,
Новосибирск, Российская Федерация

В статье проанализированы результаты исследования особенностей термодинамических процессов и анализ перспектив использования их характеристик для оценки технического состояния дизельных энергетических установок. Приведена структурная схема судовой энергетической установки, которую предлагается считать состоящей из отдельных, равных по степени влияния на эффективность работы, составляющих: механической части, термодинамической части, системы топливоподачи и системы автоматического регулирования частоты вращения. Результаты теоретического анализа совместной работы механической и термодинамической составляющих силовой функции дизеля показали, что температура рабочих поверхностей является важной характеристикой технического состояния энергетической установки. К понятию «термодинамическая составляющая» в данном случае относится сочетание процессов горения топлива и расширения продуктов сгорания. Для совершенствования конструкции и повышения

эффективности эксплуатации энергетических установок необходимо более глубокое изучение внутрицилиндровых процессов сгорания топлива и разработка эксплуатационных методов контроля теплового состояния дизельных двигателей внутреннего сгорания. Контроль изменения функциональных зависимостей температуры рабочего тела от условий эксплуатации и технического состояния может способствовать на практике повышению эффективности эксплуатации судовых энергетических установок. Проведены экспериментальные исследования перспективности методов тепловизионных исследований для оценки технического состояния дизелей. Установлено, что достоверность контроля повышается при увеличении размеров остова дизеля ввиду уменьшения интенсивности динамики выравнивания температур отдельных цилиндров. При этом наиболее целесообразным и информативным является контроль температуры выпускного коллектора дизеля, выполняемый в процессе прогрева холодного двигателя или непосредственно после его завершения.

Ключевые слова: энергетическая установка, судовый дизель, термодинамический процесс, сгорание топлива, термометрирование, тепловизор.

Для цитирования:

Кочергин В. И. Использование характеристик термодинамических процессов для оценки технического состояния дизельных энергетических установок / В. И. Кочергин, С. П. Глушков, Е. С. Зинченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 141–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-141-153.

Введение (Introduction)

Термодинамические процессы дизельных энергетических установок можно представить в виде функций непрерывного изменения эффективного давления и температуры рабочего тела в зависимости от времени или угла поворота коленчатого вала. На характер данных функциональных зависимостей главным образом оказывают влияние показатели внутрицилиндровых кинетических процессов сгорания топлива: скорость сгорания топлива, скорость изменения объема рабочего тела и величина угла опережения воспламенения.

Известно, что процесс горения топлива в камерах сгорания двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является сложным и многостадийным. Разделение физико-химических преобразования горючей смеси в цилиндре дизеля на отдельные периоды позволяет более точно представить общую картину термодинамических процессов и разработать практические мероприятия по их совершенствованию или оптимизации [1]. При любом изменении качественного и количественного состава дизельного топлива или топливовоздушной смеси, а также изменении температуры или влажности топлива изменяется величина задержки воспламенения, что приводит к вариации скорости распространения пламени в камере сгорания дизеля и в итоге к изменению текущих значений скорости поршня.

Политропные процессы сгорания топлива в цилиндрах ДВС описываются, как правило, известным уравнением термодинамики $pV^n = \text{const}$. Данное выражение характеризуют термодинамику процессов в цилиндрах ДВС лишь приближенно, так как предполагается, что скорость поршня является постоянной величиной, равной среднему расчетному значению, а рабочее тело в цилиндре двигателя расширяется равномерно и за равный промежуток времени, соответствующий определенной величине угла поворота коленчатого вала. В действительности, на величину показателя политропы расширения и на характер индикаторной диаграммы оказывают влияние ряд факторов, а именно: количество и качество поступившего в цилиндры топлива, характер процессов распространения пламени по объему камеры сгорания, отклонения величин степени сжатия и периода задержки воспламенения от номинальных значений вследствие изменения технического состояния систем двигателя. Поэтому принятое схематичное представление изменения параметров состояния рабочего тела в течение процесса сгорания не дает реального представления об истинной динамике термодинамических процессов дизельных энергетических установок, оказывающей существенное влияние на характеристики рабочих процессов и внешние характеристики ДВС.

Известны предложенные И. И. Вибе достаточно адекватные и совершенные модели процессов сгорания топлива и методики расчета основных параметров указанных процессов. В частности, в по-

луэмпирическом уравнении выгорания топлива в ДВС используется показатель характера сгорания, влияющий на относительную величину отвлеченного времени, соответствующего максимальным значениям скорости сгорания топлива [2]. Среди факторов, оказывающих влияние на величину данного показателя применительно к дизельным двигателям, можно выделить следующие [3]:

- степень задержки воспламенения;
- тип смесеобразования (пленочное или объемное);
- параметры протекания процесса впрыска топлива и наличие многофазного впрыска;
- наличие газотурбинного или механического наддува воздуха;
- качество используемого дизельного топлива (увеличение доли парафинов в топливе приводит к увеличению показателя характера сгорания).

Следовательно, в процессе исследования влияния технического состояния на эффективные показатели работы дизеля необходимо более тщательное изучение изменения во времени термодинамических процессов и учет взаимосвязей между параметрами топливоподачи, кинетикой горения топлива и выходными параметрами дизельного двигателя. Более точное представление о модели внутрицилиндровых процессов сгорания топлива и разработка эксплуатационных методов контроля теплового состояния позволят обеспечить реализацию комплекса мероприятий по совершенствованию конструкции энергетических установок с двигателями внутреннего сгорания и повышению эффективности их эксплуатации. К таким мероприятиям можно отнести практическую реализацию перспектив применения альтернативных видов топлива, повышение экологичности энергетических установок, предотвращение возникновения неустойчивых режимов работы двигателя, а также обеспечение оптимизации внутрицилиндровых процессов и динамических показателей судовых дизелей [4], [5].

Целью настоящей работы является исследование возможности использования характеристик термодинамических процессов для оценки технического состояния дизельных энергетических установок.

Методы и материалы (Methods and Materials)

При анализе моделей развития сложных технических систем наиболее рациональным является использование принципа равнозначности их составляющих. Предположим, что судовая энергетическая установка (СЭУ) как единая система получения эффективной мощности и крутящего момента состоит из отдельных, условно равных по степени влияния на эффективность ее работы составляющих, таких как механическая часть, термодинамическая часть, система топливоподачи и система автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ). Такой подход к дифференциации структуры СЭУ позволяет предположить, что для достижения оптимального сочетания экономических, мощностных, экологических и иных потребительских качеств судового дизеля необходимо обеспечение равного внимания к исследованию и обеспечению качества всех происходящих в дизеле рабочих процессов. Это положение соответствует представлению об эффективном КПД судового дизеля как характеристике совокупности процессов преобразования химической энергии топлива в энергию механическую, описываемому произведением термического КПД идеального цикла (цикла Тринклера), относительного индикаторного КПД, оценивающего приближение процессов параметров действительного цикла к идеальному, а также механического КПД [6].

Особенно важным выполнение данного условия является в связи с необходимостью обеспечения необходимых динамических характеристик и параметров неравномерности вращения энергетической установки и иных судовых механизмов. На основе известных примеров схематичного представления динамики двигателей внутреннего сгорания, учитывающих процессы тепловыделения и наличия термодинамической образующей крутящего момента [7], [8], предлагается структурная схема СЭУ, в которой СЭУ представлена в виде отдельных, равных по степени влияния на эффективность работы дизеля, составляющих с учетом влияния внешних факторов и условий эксплуатации (рис. 1) [9].



Рис. 1. Структурная схема СЭУ

Современные исследования в области совершенствования моделирования топливоподачи и закономерностей сгорания топлива в ДВС указывают на необходимость учета влияния взаимосвязи динамики процессов сгорания с динамикой иных рабочих процессов. Функция, характеризующая зависимость давления газов p_z в цилиндре ДВС от угла поворота коленчатого вала φ [10] представлена в виде

$$p_r = \begin{cases} \frac{\mu}{\vartheta} e^{-\frac{\chi^2}{0,09}}, & \text{если } \chi < 0; \\ \frac{\mu}{\vartheta} e^{-\frac{\chi^2}{(\vartheta/2)^2}}, & \text{если } \chi \geq 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\chi = \varphi + \alpha - \theta$, рад.;

α — угол опережения впрыска;

θ — величина задержки от начала горения топлива до точки максимального нарастания давления;

μ — коэффициент, характеризующий интенсивность сгорания топлива;

ϑ — коэффициент, характеризующий продолжительность горения.

На величину нормальной скорости распространения пламени при горении топливовоздушной смеси в камере сгорания оказывают влияние состав топлива, температура, влажность и ряд иных факторов (например, наличие предварительного подогрева смеси). Можно утверждать, что величина скорости распространения пламени с достаточной степенью достоверности коррелируется с квадратом абсолютной температуры горючей смеси. Даже с учетом достаточно малой величины времени сгорания топлива учет влияния данного показателя на скорость нарастания давления в цилиндрах двигателя следует считать целесообразным и значимым для исследования фактором, так как степень динамичности изменения внешней нагрузки в итоге влияет на показатели надежности и долговечности энергетической установки. Это объясняется, в частности, повышением напряжений и уменьшением толщины масляной пленки в подшипниках коленчатого вала.

Эффективность, долговечность и даже экологичность энергетических установок во многом определяются качественными и количественными характеристиками теплообмена. Это в полной мере относится и к двигателям внутреннего сгорания, где значения индикаторного и среднего эффективного давления в цилиндрах представляют собой универсальные критерии теплотворной способности и технического состояния двигателя [11]. Температурные режимы работы цилиндровой группы определяют и тепловую напряженность деталей двигателя, т. е. значения абсолютной

температуры на поверхности стенок гильз цилиндров, а также возникающие вследствие неравномерности температуры в различных точках деталей температурные напряжения. Именно характер температурных нагружений зачастую приводит к аварийным износам и разрушениям критерияльных деталей ДВС, что особенно характерно для высокофорсированных двигателей [12]. К таким деталям можно отнести поршневые кольца ДВС и являющуюся, по сути, элементом энергетической установки, масляную пленку между поршневым кольцом и внутренней поверхностью втулки цилиндра. Процессы теплообмена в масляных пленках тесно связаны с параметрами рабочих процессов энергетической установки, влияющих как на механическую нагруженность элементов кривошипно-шатунного механизма двигателя, так и на процессы прогрева и испарения масляной пленки [13], [14].

Особенно актуальным представляется необходимость исследований термодинамических процессов, сопровождающих горение топлива в цилиндрах дизеля и производство эффективной мощности с учетом существующей тенденции более широкого применения альтернативных видов топлива [15]. Требования Международной конвенции МАРПОЛ-73/78 фактически ведут к запрету на использование мазута и традиционного дизельного топлива [16], а применение новых видов источников энергии влечет изменение динамических характеристик всего комплекса процессов теплообмена, движения элементов кривошипно-шатунного механизма и регулирования частоты вращения.

При известных геометрических и термодинамических параметрах камеры сгорания, таких как радиус сферы горения и величина давления в цилиндре, возможно определение скорости выделения теплоты, пропорциональной приращению радиуса сферы горения. Между термодинамическими процессами, определяемыми в данном случае величиной суммарного коэффициента теплоотдачи α_Σ , и параметрами рабочего процесса ДВС (скоростью нарастания давления и скоростью поршня), согласно известным исследованиям процессов теплоотдачи стенок цилиндра, существует устойчивая связь [17]:

$$\alpha_\Sigma = 130d^{-0,2}p^{0,8}T^{0,53} \left[c_1 v_{cp} + c_2 \frac{V_h T_1}{p_1 V_1} (p_0 - p) \right], \quad (2)$$

где d — диаметр цилиндра;

c_1 и c_2 — поправочные коэффициенты;

v_{cp} — средняя скорость поршня;

p_0 — текущее значение давления прокрутки;

V_h — рабочий объем цилиндра;

p и T — текущие значения параметров рабочего тела: давления и температуры;

p_1 , V_1 и T_1 — параметры рабочего тела, соответствующие моменту закрытия впускных клапанов.

Таким образом, для анализа и исследования особенностей термодинамических процессов дизельных энергетических установок необходимо математическое моделирование динамики отдельных элементов уточненной структурной схемы СЭУ.

Результаты (Results)

Исходя из утверждения о равной значимости механической и термодинамической составляющих силовой функции дизельной энергетической установки для ее эффективной работы, представим выражения, описывающие процессы, происходящие одновременно в этих, по сути, разнородных с физической точки зрения системах. Характеристиками механической системы дизеля выступают преимущественно геометрические параметры кривошипно-шатунного механизма, а к понятию термодинамической составляющей в данном случае следует относить сочетание процессов горения топлива и расширения продуктов сгорания. Происходящие в цилиндрах ДВС термодинамические процессы и непосредственно связанные с ними компрессионные процессы (наполнение цилиндров дизеля свежим зарядом, сжатие заряда и очистка цилиндров) в итоге порождают суммарную силовую функцию, характеризующуюся величиной крутящего момента M_r , дискретно распределенного по длине коленчатого вала [7], [9].

При использовании безразмерных характеристик термодинамической $Q(\varphi)$ и компрессионной $K(\varphi)$ составляющих силовой функции M_i можно описать для отдельно взятого цилиндра дизеля следующим выражением:

$$M_i(\varphi) = V_h [p_c K(\varphi) + p_i Q(\varphi)], \quad (3)$$

где V_h — рабочий объем цилиндра;

p_c и p_i — функции давления газов в цилиндре, определяющие, соответственно, скоростной и нагрузочный режимы двигателя.

Применительно к многоцилиндровому дизелю, имеющему j цилиндров, суммарная силовая функция может быть представлена совокупностью j силовых функций M_i , действующих на соответствующие участки коленчатого вала, расстояния между которыми определяются расстояниями между отдельными кривошипами двигателя:

$$M_i = \sum_0^{j-1} V_h [p_c K(\varphi - \beta) + p_i Q(\varphi - \beta)], \quad (4)$$

где β — угол поворота коленчатого вала между вспышками в j -м и первом цилиндрах.

Входящие в выражения (3) и (4) составляющие p_c и p_i , являются также функциями от угловой скорости коленчатого вала ω , мгновенные значения которой в свою очередь находятся в зависимости от скорости перемещения поршня и степени нечувствительности регулятора частоты вращения. Силовая функция каждого из цилиндра двигателя зависит от координаты органа управления топливоподачей ψ , особенно в современных системах топливоподачи с электронным управлением многофазным впрыском топлива. В итоге регулирующее воздействие в момент времени t , обеспечивающее необходимое изменение величины цикловой подачи топлива, осуществляется с некоторым запаздыванием:

$$\psi_i = \psi(t_k - t), \quad (5)$$

где t_k — предшествующий момент времени, в который происходит изменение координаты ψ ($k=1, 2, \dots, n$).

В общем случае крутящий момент одного цилиндра дизеля можно представить в виде $M_{ij} = M_K + M_Q$. Текущие значения эффективного крутящего момента на установившихся режимах работы без учета механических потерь определяются известным выражением:

$$M_{e_0} = \frac{j V_h p_i}{2\pi\tau}, \quad (6)$$

где τ — тактность двигателя;

j — количество цилиндров ДВС,

p_i — среднее индикаторное давление.

В динамике изменение эффективного крутящего момента описывается зависимостью

$$M_{e_{cp}} = \frac{\partial M_{e_{cp}}}{\partial \psi} + M_{e_0}. \quad (7)$$

Процесс изменения термодинамической образующей крутящего момента в выражении (3) с учетом прямой связи величины крутящего момента и индикаторного давления можно приближенно описать выражением следующего вида:

$$M'_Q(\varphi, \psi) = V_h Q(\varphi) \frac{\partial p_i}{\partial M_{e_{cp}}} M_{e_{cp}}. \quad (8)$$

Представим значения индикаторного давления в цилиндре дизеля в виде суммы:

$$p_i = p_0 + \Delta p_Q + \Delta p_\psi, \quad (9)$$

где p_0 — давление сжатия топливовоздушной смеси;

Δp_Q — приращение давления от сгорания топлива и последующего расширения рабочей смеси;

Δp_ψ — изменение давления по сравнению с необходимым при текущем значении угла поворота коленчатого вала φ вследствие несвоевременной либо некачественной работы систем управления подачей топлива.

Помимо величины индикаторного давления p_i на текущие значения термодинамической образующей крутящего момента в равной степени влияет и величина температуры рабочего тела T_i в цилиндрах двигателя. Следовательно, для описания процесса изменения M_Q можно использовать следующее выражение:

$$M'_Q(\varphi, \psi) = V_h Q(\varphi) \frac{m R \partial(T_i / V)}{\partial M_{e_{cp}}} M_{e_{cp}}; \quad (10)$$

где m — количество молей газовой смеси;

R — газовая постоянная.

Представленные выражения дают основание сделать вывод о наличии взаимосвязи между внешними характеристиками и параметрами термодинамики дизельных энергетических установок и, следовательно, о наличии возможности практического применения методов анализа параметров термодинамических процессов для оценки технического состояния СЭУ.

Обсуждение (Discussion)

Ввиду того, что величина термодинамической образующей и, соответственно, величина суммарного крутящего момента являются функциями от температуры сгорания топлива в цилиндрах дизеля, температура представляет собой функциональную зависимость от текущих значений крутящего момента, определяемых комплексом условий эксплуатации и техническим состоянием СЭУ: $T_i = f(M_e)$. Поскольку в цилиндре дизеля происходит не только пропорциональное изменение температуры и давления в соответствии с известными физическими законами, но и стохастические процессы горения топлива, динамику рабочих процессов энергетической установки с позиций изменения рабочей температуры в цилиндрах дизеля, в соответствии с (8), также можно представить в виде аналогичных составляющих:

$$T_i = T_0 + \Delta T_Q + \Delta T_\psi. \quad (10)$$

Выражения (1)–(10) могут служить приблизительным описанием термодинамики дизельных энергетических установок. Если пренебречь дискретностью регулирования угловой скорости, описание и возможные решения уравнений динамики рабочих процессов ДВС существенно упрощаются. Характеристики термодинамических процессов, представляющие собой функциональные зависимости температуры рабочего тела от угла поворота и угловой скорости коленчатого вала, могут использоваться для оценки изменений параметров технического состояния дизельных энергетических установок. Отклонение величины индикаторного давления от оптимальных значений, одной из наиболее вероятных причин которого может быть изменение термодинамической составляющей образующей крутящего момента, приводит к изменению параметров технического состояния СЭУ. Такими параметрами в первую очередь являются износ деталей цилиндропоршневой группы и газораспределительного механизма, отказы систем топливоподачи и автоматического регулирования частоты вращения, а также изменение параметров цикловой подачи и качественного состава топлива. Использование характеристик термодинамических процессов для оценки технического состояния дизельных энергетических установок может на практике способствовать повышению эффективности эксплуатации основных и вспомогательных СЭУ.

Основными направлениями перспективных направлений использования термодинамических характеристик в данных целях являются:

- совершенствование термодинамических процессов двигателей внутреннего сгорания;
- исследование влияния термодинамической составляющей образующей крутящего момента на эффективные показатели работы дизелей;
- разработка технологий диагностирования энергетических установок на основе анализа отклонений температуры в цилиндрах дизеля при различных режимах работы от номинальных значений.

Разработка технологий диагностирования технического состояния СЭУ в эксплуатационных условиях представляется наиболее важным направлением использования термодинамических процессов в практических целях. Осуществление контроля изменения в процессе эксплуатации технического состояния дизельных СЭУ, сопровождающегося варьированием характеристик термодинамических процессов, возможно путем использования косвенных методов (например, посредством анализа топливно-экономических и динамических характеристик дизеля). Однако такой подход не позволяет в полной мере дифференцировать влияние термодинамической составляющей на эффективные показатели работы энергетических установок.

В стандартных технологических процессах технического диагностирования предусмотрены процедуры поиска неисправностей, приводящих к изменению эффективных показателей двигателя, в том числе возникающих по причине нарушения процессов сгорания топлива и расширения рабочего тела. В связи с этим при осуществлении мониторинга технического состояния СЭУ обязательно должен быть предусмотрен контроль температурного режима отдельных элементов энергетической установки. Одним из способов контроля температурного режима двигателя, наиболее близких к прямым методам оперативной оценки технического состояния, следует считать не нашедшее в настоящее время широкого распространения *дистанционное термометрирование*. Использование термограмм позволяет контролировать тепловой режим работы дизеля в целом и его отдельных агрегатов.

Экспериментальные исследования с целью оценки перспектив использования особенностей протекания термодинамических процессов для оценки технического состояния дизельных энергетических установок были выполнены на вспомогательной дизель-генераторной энергетической установке, оснащенной двигателем 4ЧН 9,5/11,5, с использованием тепловизора Testo 875. На рис. 2 приведены результаты термометрирования, полученные в процессе прогрева и выхода дизеля на рабочий режим в ходе проведения настоящего исследования. На основе анализа данных термограмм можно утверждать, что для уменьшения влияния нивелирования разности температур боковых поверхностей остова двигателя термометрический контроль целесообразно применять в процессе прогрева СЭУ либо непосредственно после его завершения.

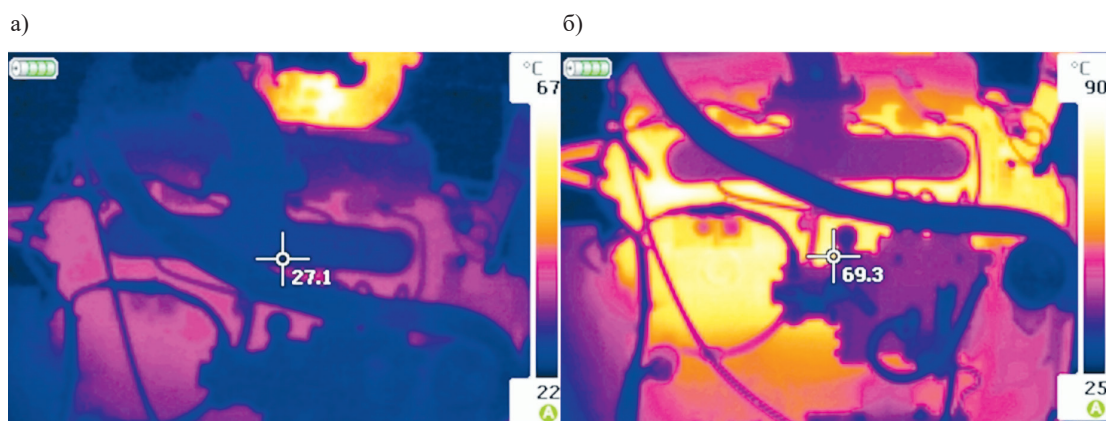


Рис. 2. Термограммы дизеля 4ЧН 9,5/11,5:
а — прогрев холодного двигателя; б — прогретый двигатель

Процесс теплообмена горячего рабочего тела через стенку втулки цилиндра с охлаждающей жидкостью и в дальнейшем с окружающей средой состоит по меньшей мере из трех последовательно протекающих процессов: теплоотдачи, теплопроводности и вновь теплоотдачи. Оптимизация этих процессов, например, путем подбора конструкционных материалов, позволяет повысить надежность энергетических установок [18].

Втулку цилиндра судового дизеля можно условно считать *эллиптическим цилиндрическим отверстием*, вписанным в параллелепипед блока цилиндров. Уменьшение температуры при охлаждении цилиндра после окончания такта рабочего хода происходит по линиям пересечения концентрических сфер с эллиптическими цилиндрическими поверхностями по мере увеличения радиусов этих

сфер [19]. Поскольку в процессе эксплуатации втулка цилиндра приобретает эллипсность, наибольшей температурой остова двигателя следует считать его боковые поверхности, что создает предпосылки для успешного использования методов термометрирования при оценке технического состояния энергетических установок

Моделирование неисправностей топливоподающей аппаратуры показало, что интенсивный прогрев используемого в качестве экспериментальной установки и обладающего достаточно компактными размерами дизеля 4ЧН 9,5/11,5 затрудняет дифференцирование теплового состояния отдельных цилиндров после выхода на рабочий режим. Достоверность диагноза повышается при увеличении размеров остова дизельной энергетической установки, так как уменьшается интенсивность теплоотдачи и выравнивание температур отдельных цилиндров. Наиболее информативным следует считать контроль температурного режима в районе выпускного коллектора дизеля. На рис. 3 приведены результаты выполненного в процессе настоящего исследования термометрирования выпускного коллектора дизеля 4ЧН 9,5/11,5 с неисправной плунжерной парой топливного насоса высокого давления четвертого цилиндра.

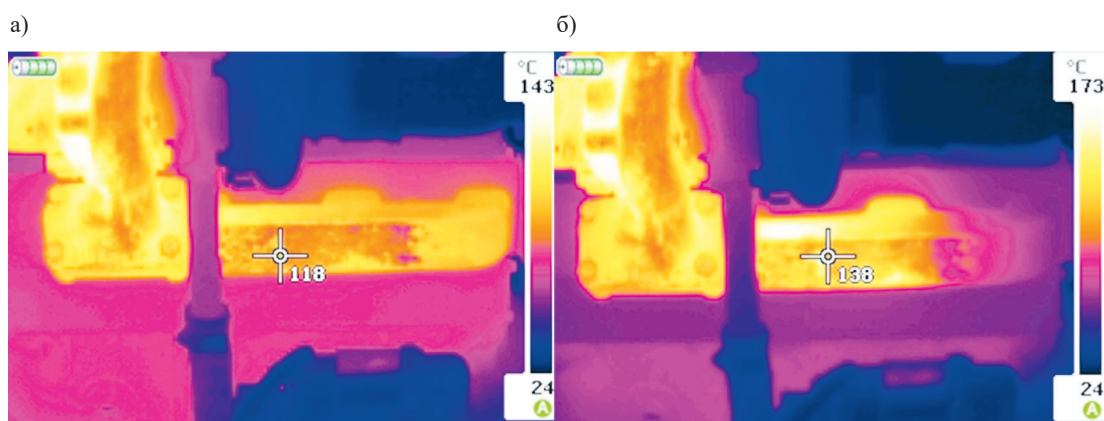


Рис. 3. Результаты термометрирования выпускного коллектора дизеля 4ЧН 9,5/11,5:
а — исправный двигатель; б — двигатель с неисправной плунжерной парой
топливного насоса высокого давления четвертого цилиндра

Приведенный пример наглядно показывает, что вследствие недостаточного количества поступающего в четвертый цилиндр дизельного топлива и снижения температуры в цилиндре температура коллектора в этом районе существенно ниже средних значений остальной части поверхности выпускного коллектора. Из этого следует, что оценка наличия отклонений мощности и крутящего момента дизеля от номинальных значений в связи с изменением величины термодинамической образующей крутящего момента, в соответствии с выражением (10), может быть выполнена на основе использования тепловизионного оборудования. Бесспорно, такое изменение температуры коллектора может быть вызвано также вариацией иных параметров технического состояния дизеля и, возможно, для поиска конкретной неисправности потребуются проведение углубленного диагностирования. Однако для оперативной оценки технического состояния СЭУ характеристики термодинамических процессов могут быть рекомендованы к практическому применению при условии использования термограмм, полученных в процессе прогрева холодного двигателя либо непосредственно после его завершения для уменьшения влияния выравнивания разности температур боковых поверхностей горячего дизеля.

Выводы (Summary)

Проведенное исследование позволяет сделать следующие основные выводы.

1. Термодинамические процессы дизельных энергетических установок, зависящие от характеристик внутрицилиндровых кинетических процессов сгорания топлива, таких как скорость сгорания, скорость изменения объема рабочего тела и величина угла опережения воспламенения,

оказывают существенное влияние на термодинамическую составляющую образования крутящего момента. Таким образом, СЭУ следует считать системой, состоящей из равных по степени влияния на эффективность ее работы составляющих, таких как механическая часть, термодинамическая часть, а также система топливоподачи и система автоматического регулирования частоты вращения. Наиболее активно термодинамические процессы влияют на величину и характер силовой функции на стадиях сжатия рабочего тела, сгорания топлива и расширения продуктов сгорания.

2. Исходя из утверждения о равной значимости механической и термодинамической составляющих силовой функции дизеля для обеспечения его эффективной работы, приведены выражения, представляющие приближенное описание суммарного влияния данных составляющих на эффективные показатели работы энергетической установки. Поскольку величина термодинамической образующей и, соответственно, величина суммарного крутящего момента являются функциями от температуры сгорания топлива в цилиндрах дизеля, то и температура представляет собой функциональную зависимость от текущих значений крутящего момента, определяемых комплексом условий эксплуатации и техническим состоянием СЭУ. Динамика рабочих процессов энергетической установки может быть описана процессами изменения рабочей температуры рабочего тела в цилиндрах дизеля, величина которой в равной степени зависит от термодинамической и механической составляющих причин ее изменения. Более глубокое изучение внутрицилиндровых процессов сгорания топлива и разработка эксплуатационных методов контроля теплового состояния СЭУ позволят обеспечить совершенствование конструкций и повышение эффективности эксплуатации энергетических установок.

3. Наиболее важным направлением использования термодинамических процессов в практических целях следует считать разработку технологий диагностирования технического состояния СЭУ в эксплуатационных условиях. Косвенные методы оценки соответствия термодинамических процессов оптимальным значениям на основе анализа топливно-экономических и динамических характеристик дизеля не обеспечивают в полной мере дифференциацию причин отказов и неисправностей СЭУ. В процессах мониторинга технического состояния обязательно должен быть предусмотрен контроль температурного режима отдельных элементов энергетической установки.

4. С наибольшей вероятностью возможность практического использования характеристик термодинамических процессов для оперативной оценки технического состояния дизельных энергетических установок может быть достигнута посредством дистанционного термометрирования. Использование полученных с помощью тепловизионного оборудования термограмм позволяет контролировать тепловой режим работы дизеля в целом и его отдельных агрегатов. Проведенные экспериментальные исследования показали, что термометрический контроль наиболее целесообразно применять в процессе прогрева холодного двигателя либо непосредственно после его завершения, чтобы обеспечить уменьшение влияния выравнивания разности температур боковых поверхностей горячего дизеля. Достоверность диагностирования возрастает также при увеличении размеров остова дизеля, так как при этом уменьшается интенсивность динамики выравнивания температур отдельных цилиндров. Приведенный в статье пример моделирования неисправности плунжерной пары топливного насоса высокого давления показал, что наиболее целесообразным и информативным является контроль температурного режима работы дизеля в районе выпускного коллектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрусенко С. Е. Механизмы управления рабочим процессом дизельного двигателя / С. Е. Андрусенко, О. Е. Андрусенко, В. В. Колыванов, Ю. И. Матвеев // Научные проблемы водного транспорта. — 2021. — № 68. — С. 98–108. DOI: 10.37890/jwt.v68.206.
2. Вибе И. И. Теория двигателей внутреннего сгорания / И. И. Вибе. — Челябинск: ЧПИ, 1974. — 252 с.
3. Шароглазов Б. А. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов / Б. А. Шароглазов, М. Ф. Фарафонов, В. В. Клементьев. — Челябинск: Изд-во Южно-Уральского гос. ун-та, 2004. — 344 с.

4. *Ладоша Е. Н.* Имитация рабочего процесса поршневых двигателей на основе моделей химических реакций, турбулентности и теплообмена / Е. Н. Ладоша // Инженерный вестник Дона. — 2008. — № 2 (4). — С. 21–33.

5. *Бурков А. Ф.* Повышение эффективности управления комбинированными энергетическими установками судов / А. Ф. Бурков, В. В. Миханов, Нгуен Ван Ха // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 381–389. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-381-389.

6. *Ерофеев П. А.* Классификация современных методов совершенствования рабочего процесса судовых дизелей / П. А. Ерофеев, В. А. Жуков, С. Г. Черный // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 765–774. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-765-774.

7. *Добролюбов И. П.* Динамический метод диагностики автотракторных двигателей. Часть 1. Принципы построения диагностических моделей переходных процессов / И. П. Добролюбов, В. М. Лившиц. — Новосибирск: Сиб. отделение ВАСХНИЛ, 1981. — 86 с.

8. *Леонов Г. Н.* Некоторые особенности моделирования динамики двигателя внутреннего сгорания / Г. Н. Леонов, А. В. Фролов, И. С. Шустов // Ползуновский вестник. — 2012. — № 3–1. — С. 123–128.

9. *Кочергин В. И.* Обеспечение эффективности процессов регулирования частоты вращения эксплуатируемых судовых энергетических установок: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.08.05 / В. И. Кочергин. — Новосибирск, 2020. — 44 с.

10. *Тырловой С. И.* К определению цикловой подачи топлива ТНВД при неустановившихся режимах высокооборотного автомобильного дизеля / С. И. Тырловой // Двигатели внутреннего сгорания. — 2010. — № 1. — С. 21–24.

11. *Ерофеев В. Л.* Энергетический и эксергетический подходы к оценке повышения эффективности тепловых двигателей / В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков, А. С. Пряхин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1017–1026. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1017-1026.

12. *Глушков С. П.* Обеспечение безопасности эксплуатации транспортных средств на основе анализа динамических температурных нагружений / С. П. Глушков, Б. О. Лебедев, С. С. Глушков, В. И. Кочергин, В. О. Жидких // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2019. — № 2 (49). — С. 51–56.

13. *Лебедев Б. О.* Влияние параметров рабочих процессов судовых дизелей на процессы теплообмена в камерах сгорания / Б. О. Лебедев, С. П. Глушков, В. И. Кочергин // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — № 1–3 (43). — С. 42–46.

14. *Glushkov S.* Study of Dynamic Temperature Loads for Power Plant Elements / S. Glushkov, V. Kochergin, B. Lebedev // International School on Neural Networks, Initiated by IIASS and EMFCSC. — Cham: Springer International Publishing, 2022. — Pp. 413–421. DOI: 10.1007/978-3-031-11058-0_40.

15. *Лебедев Б. О.* Особенности использования альтернативных видов топлива для судовых энергетических установок / Б. О. Лебедев, С. П. Глушков, В. И. Кочергин // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 4–4 (42). — С. 139–143.

16. *Хорошев В. Г.* Перспективы использования альтернативных видов топлива в судовых энергетических установках / В. Г. Хорошев, Л. Н. Попов, Р. И. Гатин // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — № 4 (390). — С. 194–202. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-194-202.

17. *Серегин А. С.* Методика расчета рабочего процесса при моделировании кинетики сгорания газообразного топлива в поршневых ДВС / А. С. Серегин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2008. — № 1. — С. 37–44.

18. *Расторгуева О. В.* Исследование проблем теплопередачи в двигателях внутреннего сгорания опасных производственных объектов / О. В. Расторгуева, Д. О. Седелников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Безопасность и управление рисками. — 2016. — № 5. — С. 62–70.

19. *Расулов С. Р.* Распределение температуры при охлаждении деталей, ограниченных поверхностями в виде параллелепипеда и эллиптического цилиндра / С. Р. Расулов, В. А. Ибрагимов, Д. А. Керимов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. — 2016. — Т. 18. — № 3. — С. 146–159. DOI: 10.15593/2224-9877/2016.3.11.

REFERENCES

1. Andrusenko, S. E., O. E. Andrusenko, V. V. Kolyvanov, and Yu. I. Matveev. "Work process control mechanisms of diesel engine." *Nauchnye problemy vodnogo transporta* 68 (2021): 98–108. DOI: 10.37890/jwt.v68.206.
2. Vibe, I. I. *Teoriya dvigatelei vnutrennego sgoraniya*. Chelyabinsk: ChPI, 1974.
3. Sharoglazov, B. A., M. F. Farafontov, and V. V. Klement'ev. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: teoriya, modelirovanie i raschet protsessov*. Chelyabinsk: Izd-vo Yuzhno-Ural'skogo gos. un-ta, 2004.
4. Ladosha, E. N. "Imitatsiya rabocheho protsessa porshnevykh dvigatelei na osnove modelei khimicheskikh reaktsii, turbulentnosti i teploobmena." *Inzhenernyi vestnik Dona* 2(4) (2008): 21–33.
5. Burkov, Alexey F., Victor V. Mikhannoshin, and Nguyen Khan Ha. "Improving the management efficiency of combined power plants of ships." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 381–389. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-381-389.
6. Erofeev, Pavel A., Vladimir A. Zhukov, and Sergei G. Chernyi. "Classification of modern methods for improving the working process of marine diesel engine." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 765–774. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-765-774.
7. Dobrolyubov, I.P., and V. M. Livshits. *Dinamicheskii metod diagnostiki avtotraktornykh dvigatelei. Chast' 1. Printsipy postroeniya diagnosticheskikh modelei perekhodnykh protsessov*. Novosibirsk: Sib. otделение VASKhNIL, 1981.
8. Leonov, G. N., A. V. Frolov, and I. S. Shustov. "Nekotorye osobennosti modelirovaniya dinamiki dvigatelya vnutrennego sgoraniya." *Polzunovskii vestnik* 3–1 (2012): 123–128.
9. Kochergin, V. I. Obespechenie effektivnosti protsessov regulirovaniya chastoty vrashcheniya ekspluatiruemyykh sudovykh energeticheskikh ustanovok. Abstract of PhD diss. Novosibirsk, 2020.
10. Tyrlovoy, S. I. "To determine the cycle fuel supply of the fuel injection pump under unsteady modes of high-speed automobile diesel." *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* 1 (2010): 21–24.
11. Erofeev, Valentin L., Vladimir A. Zhukov, and Alexandr S. Pryachin. "Energy and exergy approaches to assessment enhance the efficiency of heat engines". *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1017–1026. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1017-1026.
12. Glushkov, S. P., B. O. Lebedev, S. S. Glushkov, V. I. Kochergin, and V. O. Zhidkikh. "Vehicles safety operation on the basis of the dynamic temperature tension analysis." *Siberian Transport University Bulletin* 2(49) (2019): 51–56.
13. Lebedev, B. O., S. P. Glushkov, and V. I. Kochergin. "Influence of parameters of working processes of ship diesels on of heat exchange processes in combustion chambers." *Marine Intellectual Technologies* 1–3(43) (2019): 42–46.
14. Glushkov, Sergey, Victor Kochergin, and Boris Lebedev. "Study of Dynamic Temperature Loads for Power Plant Elements." *International School on Neural Networks, Initiated by IIASS and EMFCSC*. Cham: Springer International Publishing, 2022. 413–421. DOI: 10.1007/978-3-031-11058-0-40.
15. Lebedev, B. O., S. P. Glushkov, and V. I. Kochergin. "Features of using alternative types of fuel in marine power plants." *Marine Intellectual Technologies* 4–4 (42) (2018): 139–143.
16. Horoshev, V. G., L. N. Popov, and R. I. Gatin. "Prospects of alternative fuels for marine power plants." *Transactions of the Krylov State Research Centre* 4(390) (2019): 194–202. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-194-202.
17. Seregin, A. S. "Metodika rascheta rabocheho protsessa pri modelirovanii kinetiki sgoraniya gazoobraznogo topliva v porshnevykh DVS." *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* 1 (2008): 37–44.
18. Rastorgueva, O. V., and D. O. Sedelnikov. "Research problems of heat transfer in internal combustion engine." *Safety and Risk Management* 5 (2016): 62–70.
19. Rasulov, S. R., V. A. Ibragimov, and J. A. Karimov. "Temperature distribution in the cooling of parts restricted by the surfaces in the form of parallelepiped and elliptic cylinder." *Safety and Risk Management* 18.3 (2016): 146–159. DOI: 10.15593/2224-9877/2016.3.11.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кочергин Виктор Иванович —
доктор технических наук, доцент
Сибирский государственный университет
путей сообщения
630049, Российская Федерация, Новосибирск,
ул. Дуси Ковальчук, 191
e-mail: vkplus2011@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kochergin, Victor I. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Siberian Transport University
191 Dusi Kovalchuk Str.,
Novosibirsk, 630049,
Russian Federation
e-mail: vkplus2011@yandex.ru

Глушков Сергей Павлович —
доктор технических наук, профессор
Сибирский государственный университет
путей сообщения
630049, Российская Федерация, Новосибирск,
ул. Дуси Ковальчук, 191
e-mail: rcpl.glushkov@yandex.ru
Зинченко Евгений Сергеевич — аспирант
Научный руководитель:
Кочергин Виктор Иванович
Сибирский государственный университет
путей сообщения
630049, Российская Федерация, Новосибирск,
ул. Дуси Ковальчук, 191
e-mail: askambaska@mail.ru

Glushkov, Sergei P. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Siberian Transport University
191 Dusi Kovalchuk Str.,
Novosibirsk, 630049,
Russian Federation
e-mail: rcpl.glushkov@yandex.ru
Zinchenko, Evgenii S. — Postgraduate
Supervisor:
Kochergin, Victor I.
Siberian Transport University
191 Dusi Kovalchuk Str.,
Novosibirsk, 630049,
Russian Federation
e-mail: askambaska@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 17 ноября 2023 г.
Received: November 17, 2023.*