

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-290-300

IMPROVING THE QUALITY OF HEAT DISSIPATION ANALYSIS IN MARINE DIESEL BY CLARIFYING THE UPPER DEAD CENTER POSITION OF THE PISTON

V. V. Gavrilov¹, V. Yu. Mashchenko², V. A. Zhukov¹

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — State Marine Technical University of Saint-Petersburg,
St. Petersburg, Russian Federation

It is declared that an increase in the technical, economic and environmental performance of the diesel engine can be achieved by controlling the combustion process of fuel by influencing the parameters of the fuel equipment and combustion chamber. Information about the combustion process is obtained by registering in the experiment and analyzing the indicator diagram. The purpose of the study is to assess the possibility and identify means to improve the quality of the analysis of the combustion process in the ship diesel engine by obtaining reliable characteristics of heat release during fuel combustion as a result of the analysis of indicator diagrams. It is shown that the known methods and means of obtaining heat release characteristics do not provide sufficient analysis accuracy. It is proved that the heat dissipation characteristics can be distorted as a result of an error in determining the ordinate axis on the indicator diagram corresponding to the position of the upper dead center of the piston. A technique for high-precision determination of the upper dead center position, which is determined by dividing in half the time interval between two signals corresponding to the same position of the piston during its ascending and descending motion, is proposed. A device has been developed to implement this technique. Using it in practice makes it possible, by ensuring the necessary accuracy of indicating the upper dead center position on the indicator diagram, to improve the quality of the computational and experimental determination of the heat release characteristics during fuel combustion, which, in turn, allows to provide high technical, economic and environmental performance of the diesel engine during its manufacturing and improve the quality of its diagnosis during operation.

Keywords: in-cylinder processes in diesel engine, analysis of the indicator diagram, dead center of the piston, differential characteristic of heat release.

For citation:

Gavrilov, Vladimir V., Vladimir Yu. Mashchenko, and Vladimir A. Zhukov. "Improving the quality of heat dissipation analysis in marine diesel by clarifying the upper dead center position of the piston." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 290–300. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-290-300.

УДК 62–144:62–977

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА АНАЛИЗА ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ В СУДОВОМ ДИЗЕЛЕ ЗА СЧЕТ УТОЧНЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ВЕРХНЕЙ МЕРТВОЙ ТОЧКИ ПОРШНЯ

В. В. Гаврилов¹, В. Ю. Мащенко², В. А. Жуков¹

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «СПбГМТУ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Отмечается, что повышение технико-экономических и экологических показателей дизеля может быть достигнуто с помощью управления процессом горения топлива посредством воздействия на параметры топливной аппаратуры и камеры сгорания. Предлагается информацию о процессе горения получать посредством регистрации в процессе проведения эксперимента двух симметрично расположенных относительно верхней мертвой точки поршня угловых положений коленчатого вала и анализа индикаторной диаграммы. Целью выполненного исследования являлась оценка возможности и определения средств повышения качества анализа процесса горения в судовом дизеле за счет получения достоверных характеристик тепловыделения при горении топлива в результате анализа индикаторных диаграмм. Показано, что известные методы и средства получения характеристик тепловыделения не обеспечивают достаточной точности анализа. В работе доказано, что характеристики тепловыделения могут быть искажены в результате ошибки в определении на индикаторной диаграмме оси ординат, соответствующей положению верхней мертвой точки поршня. Предложена методика высокоточного определения положения верхней мертвой точки, которое получают делением пополам интервала времени между двумя сигналами, соответствующими одному и тому же положению поршня при восходящем и нисходящем его движении. Разработано устройство для реализации указанной методики. Использование предложенной методики на практике позволит за счет обеспечения необходимой точности указания положения верхней мертвой точки на индикаторной диаграмме повысить качество расчетно-экспериментального определения характеристик выделения теплоты при сгорании топлива, что в свою очередь дает возможность обеспечить высокие технико-экономические и экологические показатели дизеля при его создании и повысить качество его диагностирования в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: внутрицилиндровые процессы в дизеле, анализ индикаторной диаграммы, мертвая точка поршня, дифференциальная характеристика тепловыделения.

Для цитирования:

Гаврилов В. В. Повышение качества анализа тепловыделения в судовом дизеле за счет уточнения положения верхней мертвой точки поршня / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко, В. А. Жуков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 290–300. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-290-300.

Введение (Introduction)

Технико-экономические и экологические показатели судового дизеля находятся в непосредственной зависимости от качества его рабочего процесса, в особенности от качества процесса горения топлива. Весьма полезная информация о процессе горения топлива может быть получена из анализа так называемых *характеристик тепловыделения при горении* [1]. Предпринимаемые многочисленные попытки аналитически связать между собой расходную характеристику впрыскивания топлива (не вполне корректно по традиции называемую *законом подачи топлива*) с характеристикой тепловыделения не дали положительного результата. Причина состоит в том, что параметры и характер протекания сложного комплекса многостадийного процесса горения топлива в дизеле зависит от большого числа конструктивных и эксплуатационных факторов. В настоящее время отсутствует возможность при помощи математической модели достаточно адекватно описать химические реакции преобразования топлива и процессы, лимитирующие скорость реакций. Между тем важно располагать возможностью получения достоверных характеристик тепловыделения.

Цель исследования состоит в оценке возможности и определении средств повышения качества анализа рабочего процесса судового дизеля за счет получения достоверных характеристик тепловыделения при горении топлива.

Адекватное описание тепловыделения необходимо не только на стадии доводки рабочего процесса вновь создаваемого дизеля, но и для решения многих иных задач, например, для проверки точности математического моделирования внутрицилиндровых процессов в дизеле, его диагностирования в ходе эксплуатации и других задач [2], [3]. Повышение точности определения характеристик тепловыделения в ДВС сохраняет актуальность при переводе двигателей на газовое топливо, о чем свидетельствуют исследования [4], [5].

При индицировании рабочего процесса выполняют два независимых друг от друга измерения: текущего давления в рабочем цилиндре и положения верхней мертвой точки (ВМТ) поршня

на индикаторной диаграмме (ИД). Ошибка в определении ВМТ может оказать влияние на достоверность получаемой в результате анализа диаграммы характеристик тепловыделения [6]. Между тем результаты исследований показали, что на практике при использовании известных методов и средств определения положения ВМТ на индикаторной диаграмме ошибка измерений зачастую находится в диапазоне от $-2,0$ до $+2,0$ град. поворота коленчатого вала ($^{\circ}$ п. к. в.) [7]. Достоверность математического определения положения ВМТ, в частности посредством анализа кривых давления сжатия и расширения на индикаторной диаграмме, записанной при отключении подачи топлива в цилиндр [8], [9], на наш взгляд, не определена достаточно строго.

С учетом ранее изложенного для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить, насколько существенным является влияние погрешности в определении положения ВМТ, указанной на индикаторной диаграмме, на характеристики тепловыделения при горении топлива;
- предложить методику и средство обеспечения приемлемой погрешности при определении положения ВМТ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Теоретические основы вычисления характеристик тепловыделения на базе индикаторной диаграммы (решение так называемой *обратной задачи расчета рабочего процесса в дизеле*), выполняемые с использованием функций Вибе [10], подробно рассмотрены в работе [11]. Методика расчета, реализуемая в процессе проведения исследований на основе использования данных теоретических положений, изложена в работах [1], [3]. Вид характеристик тепловыделения приведен на рис. 1 [1]. Наряду с указанными характеристиками в результате обработки ИД получают ряд важных параметров диаграмм, отражающих те или иные свойства рабочего процесса дизеля.

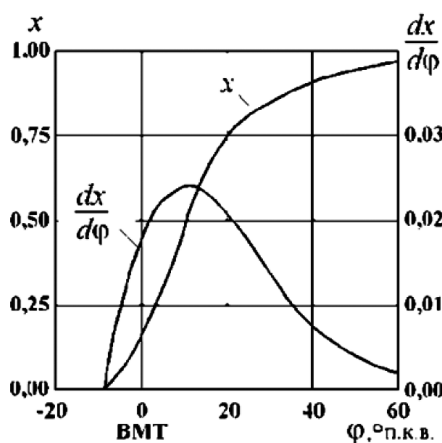


Рис. 1. Упрощенный вид характеристик тепловыделения при горении топлива в дизеле

Fig. 1. A simplified view of the heat release characteristics during fuel combustion in the diesel engine

Характеристики тепловыделения в рабочем цикле дизеля оказывают определяющее влияние как на экологические, так и на экономические показатели двигателя [12]–[14], поэтому их анализу уделяется столь пристальное внимание. При описании процесса горения обычно используют две приведенные на рис. 1 разновидности характеристик: во-первых, *интегральную характеристику тепловыделения*, представляющую собой функцию количества теплоты Q , кДж, выделившейся в цилиндре дизеля, от угла поворота коленчатого вала $Q = f(\varphi)$ или времени $Q = f(\tau)$, во-вторых, *дифференциальную характеристику тепловыделения* $dQ/d\varphi = f(\varphi)$ — характеристику интенсив-

ности тепловыделения (так называемой *скорости тепловыделения*) [4]. Как правило, используют характеристики не абсолютного, а относительного тепловыделения, которые получают делением текущих значений $Q(\varphi)$ на теплоту $Q_{ц}$, выделившуюся при сгорании цикловой дозы $g_{ц}$, кг/цикл, поданного в цилиндр топлива (цикловой подачи): $x(\varphi) = Q(\varphi) / Q_{ц}$. Заметим, что $Q_{ц} = g_{ц} Q_{н}$, где $Q_{н}$ — низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг. В этом случае характеристика относительной скорости тепловыделения $dx / d\varphi = f(\varphi)$.

Выделившаяся при горении теплота представляет собой сумму двух составляющих: теплоты, теряемой из цикла за счет теплопередачи через стенки рабочего цилиндра, и теплоты, направленной на совершение полезной работы и повышение внутренней энергии заряда цилиндра. Первую составляющую определяем по методике Эйхельберга, вторую, названную авторами данной работы (Прим. ред.) *располагаемой теплотой*, получаем посредством обработки и анализа ИД. Характеристики относительной выделившейся теплоты x , относительной располагаемой теплоты x_i и относительной теплоты потерь x_w показаны на рис. 2, где линия $x = f(\varphi)$ в процессе горения асимптотически приближается к единице, но не достигает ее. Это объясняется тем, что окончанием периода сгорания топлива $\varphi_{сгор}$ повсеместно принято считать момент достижения x значения 0,98–0,99.

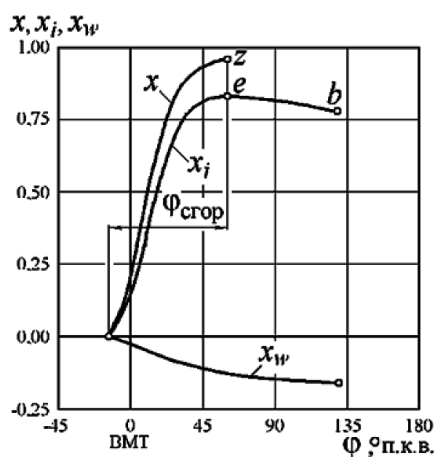


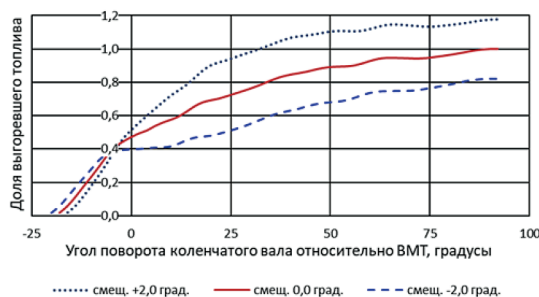
Рис. 2. Характеристики выделившейся и располагаемой теплоты, а также тепловых потерь при горении топлива в дизеле
Fig. 2. Characteristics of released and available heat, as well as heat losses during fuel combustion in the diesel engine

Для решения первой из сформулированных в работе задач были получены в экспериментах, проводимых на дизеле 6ЧН30/38 (2Д42), *многоцикловые индикаторные диаграммы* с использованием индикатора МАИ-2. Режим работы дизеля соответствовал цикловой подаче топлива $g_{ц} = 0,0014$ кг/цикл при частоте вращения коленчатого вала 715 мин^{-1} . Для имитации ошибки в определении положения ВМТ на ИД при анализе диаграмма искусственно смещалась относительно исходного положения на $-2,0$ и $+2,0^\circ$ п. к. в. Было принято, что в исходной ИД положение ВМТ определено без ошибки.

Результаты и их обсуждение (Results and Discussion)

Рассмотрим результат исследования, приведенный на рис. 3, который позволяет определить, насколько существенно искажаются характеристики тепловыделения при смещении положения ВМТ на ИД в указанных ранее пределах (от $-2,0$ до $+2,0^\circ$ п. к. в.). Кривые тепловыделения, обозначенные сплошной линией, относятся к исходной ИД, для которой принято, что положение ВМТ указано достаточно точно. Следует обратить внимание на то, что в данном случае линия $x = f(\varphi)$ к моменту окончания горения приближается к единице, что свидетельствует о достоверности результата регистрации и обработки исходной ИД.

а)



б)

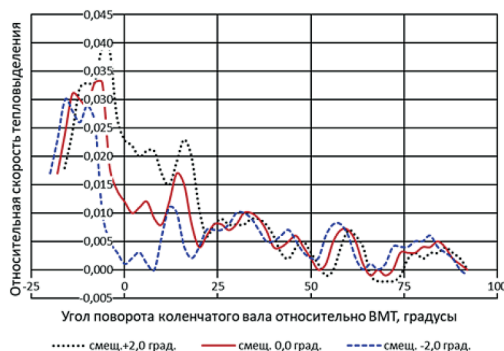


Рис. 3. Характеристики тепловыделения при сгорании топлива в дизеле:
а — интегральная характеристика; б — дифференциальная характеристика
Fig. 3. Characteristics of heat release during fuel combustion in the diesel engine:
a — integral characteristic; b — differential characteristic

При расчете двух других вариантов характеристик тепловыделения положение ВМТ на диаграмме искусственно смещено на $-2,0$ и $+2,0^\circ$ п. к. в. относительно исходного варианта. Из рис. 3 видно, насколько значительно различаются интегральные характеристики тепловыделения. При смещении ИД на -2° среднее индикаторное давление p_i составляет всего 82 % исходного варианта, при смещении ИД на $+2^\circ$ p_i увеличивается на 24 %. Соответственно указанным значениям изменяется рассчитанная по ИД индикаторная мощность двигателя. Также значительно различаются дифференциальные характеристики тепловыделения: при смещении ИД на -2° максимум относительной скорости тепловыделения $dx / d\phi$ снижается с 0,033 до 0,029 и его положение изменяется с -7° до -10° ; при смещении ИД на $+2^\circ$ максимум $dx / d\phi$ увеличивается с 0,033 до 0,039 и его положение изменяется с -7° до -5° . Указанные отклонения от исходного варианта свидетельствуют о значительной ошибке в оценке жесткости процесса сгорания. Кроме того, при смещении ИД на -2° скорость тепловыделения $dx / d\phi$ оказалась нулевой уже при 8° после ВМТ, что, разумеется, не соответствует действительности.

Таким образом, в проведенном исследовании доказано, что ошибка в определении ВМТ на индикаторной диаграмме оказывает весьма существенное влияние на качество анализа тепловыделения при сгорании топлива в дизельном двигателе. Вместе с тем реально существующая погрешность в определении ВМТ на ИД в пределах $\pm 2,0$ град. ПКВ [3] не позволяет на практике достаточно успешно решать задачи доводки рабочего процесса двигателя и задачи его диагностирования. Укажем возможные основные причины столь существенной погрешности. Датчик отметчика ВМТ, сигнал которого подается на ИД, как правило, устанавливают на маховике коленчатого вала двигателя в положении, соответствующем ВМТ поршня. Обеспечение необходимой высокой точности фиксирования указанного положения коленчатого вала представляет собой трудную задачу. Дополнительные сложности вызывают искажения, вносимые измерительной системой при передаче и регистрации сигнала датчика. Эти обстоятельства и вызывают отмеченную значительную погрешность в определении ВМТ на ИД.

На базе проведенного исследования принято решение разработать методику высокоточного определения положения ВМТ поршня на ИД, в основе которой заложен следующий принцип: вместо формирования одного сигнала, соответствующего ВМТ поршня, формируется пара сигналов, соответствующих некоторому промежуточному положению поршня при его движении до и после ВМТ. Положение ВМТ на ИД определяется при помощи «программного» деления пополам отрезка между указанными сигналами. Преимущество предложенной методики определяется на основе анализа рис. 4.

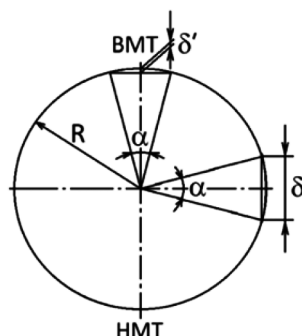


Рис. 4. Графическое обоснование методики определения ВМТ поршня двигателя на индикаторной диаграмме

Fig. 4. Graphic substantiation of the method for determining the upper dead center of the engine piston on the indicator diagram

Для обеспечения угловой погрешности в определении ВМТ на ИД $\pm \left(\frac{\alpha}{2} \right)$ абсолютная погрешность определения линейного положения поршня в окрестности его ВМТ должна быть в пределах δ' (высота сегмента круга в секторе углового размера α). В случае регистрации текущего положения поршня, например, при 90 град. до или после его ВМТ угловая погрешность в определении ВМТ на ИД $\pm \left(\frac{\alpha}{2} \right)$ может быть обеспечена при абсолютной погрешности δ (длина хорды окружности в секторе углового размера α). Наглядно показано, что допустимая погрешность измерения текущего положения поршня при его значительном отклонении от ВМТ многократно выше, чем при измерении его положения в окрестности ВМТ. Реализация предложенного принципа обеспечивает возможность существенного повышения точности определения положения ВМТ на индикаторной диаграмме и, соответственно, качества анализа внутрицилиндровых процессов в двигателе.

Для количественной оценки преимущества предложенного способа определения положения ВМТ на ИД на основе регистрации двух симметрично расположенных относительно ВМТ поршня угловых положений коленчатого вала выполнен соответствующий расчет. Рассмотрим случай, когда необходимо рассчитать допустимую погрешность в измерении положения поршня, при которой обеспечена погрешность определения углового положения ВМТ в пределах $\pm 2,0^\circ$ п. к. в. При традиционном способе определения ВМТ (по результатам измерений перемещения поршня в окрестности его ВМТ, точнее, фиксации его положения при «нулевом перемещении» относительно ВМТ) допустимая погрешность рассчитывается по следующей формуле высоты сегмента круга в секторе углового размера α :

$$\delta' = R \left[1 - \cos \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right], \quad (1)$$

где R — радиус окружности (радиус кривошипа в двигателе).

Расчет для предложенной методики определения ВМТ (по регистрации двух симметрично расположенных относительно ВМТ поршня угловых положений коленчатого вала) выполнен применительно к угловому положению кривошипно-шатунного механизма 90° п. к. в. до ВМТ

(или 90° п. к. в. после ВМТ). Использована следующая формула длины хорды окружности в секторе углового размера:

$$\delta = 2R \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right). \quad (2)$$

В результате расчетов оказалось, что для исследованного случая (обеспечение возможности определения положения ВМТ на ИД с погрешностью $\pm 2,0^\circ$ п. к. в., т. е. при $\alpha = 4^\circ$ п. к. в.) отношение допустимых погрешностей измерений положения поршня составило

$$\frac{\delta'}{\delta} = \frac{\left[1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right]}{2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\left[1 - \cos\left(\frac{4}{2}\right)\right]}{2 \sin\left(\frac{4}{2}\right)} = \frac{(1 - 0,999)}{2 \cdot 0,035} = 0,0087.$$

Выполненный расчет позволяет сделать вывод о том, что предложенная методика определения положения ВМТ на индикаторной диаграмме на основе регистрации двух симметрично расположенных относительно ВМТ поршня угловых положений коленчатого вала имеет явное преимущество по сравнению с традиционным способом фиксирования положения коленчатого вала, соответствующего положению ВМТ. Для уменьшения погрешности определения ВМТ на ИД наряду с использованием решения методического характера, а именно описанной в данной работе методики определения ВМТ посредством регистрации двух симметрично расположенных относительно ВМТ поршня угловых положений коленчатого вала, необходимо применить некоторые инструментальные средства. Широко известные отметчики ВМТ, основанные на использовании индуктивных датчиков, обладают недостаточно высокой точностью преобразования сигнала. В связи с этим могут быть предложены иные современные средства, например, вихретоковые преобразователи [15] или энкодеры [16], [17], обеспечивающие высокую точность измерений.

Рассмотрим методику практического определения ВМТ на основе предложенного в работе принципа регистрации двух симметрично расположенных относительно ВМТ поршня угловых положений коленчатого вала. Для выполнения регистрации двигатель должен быть предварительно оснащен некоторыми элементами измерительной системы (рис. 5).

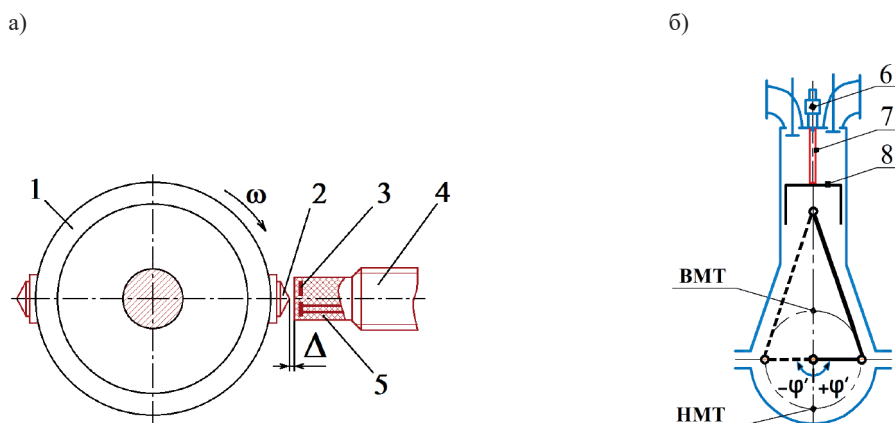


Рис. 5. Элементы измерительной системы для регистрации углового положения ВМТ поршня:

- а — расположение элементов измерительной системы для определения положения ВМТ;
б — способ определения симметричных положений коленчатого вала относительно ВМТ поршня;
1 — маховик коленчатого вала; 2 — сигнальный буртик; 3 — плоская катушка индуктивности;
4 — корпус вихретокового преобразователя; 5 — диэлектрический наполнитель; 6 — корпус форсунки;
7 — штанга-шаблон (закреплена в корпусе форсунки); 8 — поршень

Fig. 5. Elements of the measuring system for recording the angular position of the piston upper dead center:

- а — arrangement of measuring system elements to determine the upper dead center position;
б — method for determining the symmetrical positions of the crankshaft relative to the piston upper dead center;
1 — crankshaft flywheel; 2 — signal collar; 3 — flat inductor; 4 — eddy current probe housing;
5 — dielectric filler; 6 — injector body; 7 — rod-template (it is fixed in the injector body); 8 — piston

На маховике коленчатого вала 1 закреплены два сигнальных буртика 2 (с возможностью изменения их положения в окружном направлении по цилиндрической поверхности маховика). Вихретоковый преобразователь, содержащий корпус 4, плоскую катушку 3 и диэлектрический наполнитель 5, закреплен неподвижно на остоле двигателя с образованием измеряемого зазора Δ . Буртики 2 размещены на маховике 1 так, что при их движении мимо вихретокового преобразователя в измерительной системе вырабатывается пара сигналов, симметрично расположенных относительно положения ВМТ поршня на расстояниях $+\varphi$ и $-\varphi$, °п. к. в. На рис. 5 показан частный случай, в котором $\varphi = \pm 90$ °п. к. в.

Очевидно, что необходимо решить вопрос о размещении буртиков 2 на маховике 1 так, чтобы при работе двигателя (при измерениях) они давали пару сигналов, симметрично расположенных относительно ВМТ поршня. Для этого можно использовать способ, приведенный на рис. 5, б, который заключается в следующем. В корпусе форсунки 6 закрепляют неподвижно штангу-шаблон 7. Вручную проворачивают коленчатый вал двигателя в направлении от НМТ на угол $+\varphi'$ до упора поршня 8 в штангу-шаблон. На маховике двигателя закрепляют первый (из двух) сигнальный буртик 2 (см. рис. 5, а) в положении, соответствующем оси вихретокового преобразователя 4. Далее проворачивают коленчатый вал в обратном направлении от НМТ на угол $-\varphi'$ также до упора поршня в штангу-шаблон. Закрепляют на маховике двигателя второй сигнальный буртик на оси вихретокового преобразователя 4. Следует отметить, что на рисунке показан частный случай, в котором $\pm\varphi' = |90|$ °п. к. в. Указанный угол следует принять несколько меньшим указанного значения 90°, чтобы на осциллограмме работы измерительной системы можно было проще выделить ту пару сигналов, между которыми размещена искомая ВМТ поршня.

Предложенная методика определения положения ВМТ поршня предназначена для использования преимущественно на стадии доводочных испытаний дизеля. При этом испытывают дизель, оснащая его различными вариантами сочетаний опытных деталей, принципиально важные параметры которых предварительно выбраны зачастую расчетным способом. Наиболее существенное влияние на показатели рабочего процесса судового дизеля оказывают сочетания конструктивных и регулировочных параметров топливной аппаратуры и камеры сгорания.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для обеспечения высоких технико-экономических и экологических показателей судового дизеля в процессе его создания и эксплуатации необходимо располагать характеристиками тепловыделения при сгорании топлива. Указанные характеристики получают путем регистрации и анализа индикаторных диаграмм. Проведенный эксперимент показал, что вид и параметры характеристик в весьма существенной степени зависят от точности определения положения ВМТ поршня на диаграмме.

2. Известные современные технические средства и аналитические методы не обеспечивают получения необходимой точности определения ВМТ. В целях повышения указанной точности в работе предложена методика, в соответствии с которой в измерительной системе вместо повсеместно принятого формирования сигнала, соответствующего ВМТ поршня, формируется пара сигналов, соответствующих некоторому промежуточному положению поршня при движении до и после ВМТ. Положение ВМТ на индикаторной диаграмме определяется путем «программного» деления пополам отрезка между указанными сигналами.

3. Разработан способ реализации указанной методики с использованием измерительной системы, построенной с применением вихретокового преобразователя. Способ заключается в настраивании измерительной системы при двух фиксированных положениях кривошипно-шатунного механизма двигателя, соответствующих одному положению поршня относительно крышки цилиндра до и после ВМТ, регистрации двух сигналов, соответствующих указанным положениям, и делении пополам отрезка осциллограммы между этими двумя сигналами.

4. Применение предложенной методики и технического средства ее реализации позволит за счет обеспечения необходимой точности определения положения ВМТ на индикаторной диаграмме повысить качество расчетно-экспериментального построения характеристик выделения теплоты при сгорании топлива, что в свою очередь повысит качество доводки рабочего процесса дизеля при его создании и качество его диагностирования в процессе эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гаврилов В. В.* Анализ процесса горения в судовом дизеле по индикаторным диаграммам / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко. — СПб.: СПбГМТУ, 2015. — 62 с.
2. *Гаврилов В. В.* Принципы построения иерархического комплекса систем диагностирования судового дизеля / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 155–166. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-155-166.
3. *Гаврилов В. В.* Теоретические основы и методика анализа процесса горения в судовом ДВС по индикаторным диаграммам / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 154–164. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-154-164.
4. *Ларионов Л. Б.* Расчет процесса сгорания биогаза в газовом двигателе с искровым зажиганием, конвертированном из дизеля с наддувом / Л. Б. Ларионов, М. К. Бураев // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. — 2015. — Т. 12. — № 1. — С. 52–28.
5. *Смоленская Н. М.* Зависимость характеристики тепловыделения от состава смеси на холостом ходу в двигателе, работающем на газовом топливе / Н. М. Смоленская // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. — 2017. — Т. 17. — № 4. — С. 26–37. DOI: 10.14529/engn170403.
6. *Гаврилов В. В.* Влияние основных факторов на качество анализа тепловыделения в дизеле по индикаторным диаграммам / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко, А. А. Матикайнен // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — СПб.: СПбГМТУ, 2021. — № 1–1. — № 94.
7. *Лашко В. А.* Метод идентификации технического состояния дизеля по результатам расчетно-экспериментального исследования индикаторной диаграммы в условиях рядовой эксплуатации / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков, А. А. Маркелов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. — 2007. — № 1 (4). — С. 57–68.
8. *Обозов А. А.* Разработка теоретических основ и средств повышения эффективности систем технического диагностирования малооборотных дизелей: дис. ... канд. техн. наук / А. А. Обозов. — Брянск: ЗАО «УК «БМЗ», 2010. — 425 с.
9. *Лашко В. А.* Расчетный метод коррекции действительного положения ВМТ при индицировании ДВС / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков // Двигателестроение. — 2007. — № 3 (229). — С. 34–38.
10. *Wibe I. I.* Brennvtrlauf und Kreisprozesse von Verbrennungsmotoren / I. I. Wibe. — Berlin: VEB Verlag Technik, 1970. — 280 p.
11. *Кавтарадзе Р. З.* Теория поршневых двигателей. Специальные главы / Р. З. Кавтарадзе. — М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Бауман, 2016. — 589 с.
12. *Luo Q.* Experimental investigation of combustion characteristics and NOx emission of a turbocharged hydrogen internal combustion engine / Q. H. Luo, J. B. Hu, B. G. Sun, F. S. Liu, X. Wang, C. Li, L. Z. Bao // International journal of hydrogen energy. — 2019. — Vol. 44. — Is. 11. — Pp. 5573–5584. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.08.184.
13. *Cao J.* Establishment of an improved heat transfer model based on an enhanced thermal wall function for internal combustion engines operated under different combustion modes / J. Cao, M. Jia, B. Niu, Y. Chang, Z. Xu, H. Liu // Energy conversion and management. — 2019. — Vol. 195. — Pp. 748–759. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.05.046.
14. *Dahham R. Y.* Improving thermal efficiency of internal combustion engines: recent progress and remaining challenges / R. Y. Dahham, H. Wei, J. Pan // Energies. — 2022. — Vol. 15. — Is. 17. — Pp. 6222. DOI: 10.3390/en15176222.

15. Куличенков В. П. Системы и устройства контроля механических параметров турбоагрегатов / В. П. Куличенков, В. В. Саранцев, А. А. Чепуркин. — Минск: БНТУ, 2015. — 133 с.
16. Энкодеры — принцип работы, виды и основное применение [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://masterservisnsk.ru/elektronika/enkoder-princip-raboty.html> (дата обращения: 09.08.2023).
17. К вопросу о точности угловых энкодеров [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-933.pdf> (дата обращения 09.08.2023).

REFERENCES

1. Gavrilov, V. V., and V. Yu. Mashchenko. *Analiz protsessa goreniya v sudovom dizele po indikatornym diagrammam*. SPb.: SPbGMTU, 2015.
2. Gavrilov, V. V., and V. Yu. Mashchenko. "Principles of hierarchical complex systems of diagnosing marine diesel engine." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(37) (2016): 155–166. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-155-166.
3. Gavrilov, V. V., and V. Yu. Mashchenko. "Theoretical foundations and procedure of the analysis of process of combustion of ship internal combustion engines according to indicator diagrams." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(35) (2016): 154–164. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-154-164.
4. Larionov, L. B., and M. K. Burayev. "Calculation of process of combustion of biogaz in the gas engine with spark ignition converted from the diesel with pressurization." *Vestnik of the North-Eastern Federal University* 12.1 (2015): 52–28.
5. Smolenskaya, N. M. "Dependence of characteristics of heat exchange from mixture of mixture on dry walk in engine working on gas fuel." *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry* 17.4 (2017): 26–37. DOI: 10.14529/engin170403.
6. Gavrilov, V. V., V. Y. Mashenko, and A. A. Mitikainen. "The influence of the main factors on the quality of the analysis of heat release in diesel according to indicator diagrams." *Nedelya nauki Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta*. № 1–1. SPb.: SPbGMTU, 2021.
7. Lashko, V. A., A. Y. Konkov, and A. A. Markelov. "The method of technical condition identification for a diesel engine by the display diagram analysis under the condition of ordinary operation." *Bulletin of PNU* 1(4) (2007): 57–68.
8. Obozov, A. A. *Razrabotka teoreticheskikh osnov i sredstv povysheniya effektivnosti sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya malooborotnykh dizelei*. PhD diss. Bryansk: ZAO «UK «BMZ», 2010.
9. Lashko, V. A., and A. Yu. Konkov. "Analytical correction of actual TDC position as defined from engine indicator diagram." *Dvigatelaye stroeniye* 3(229) (2007): 34–38.
10. Wibe, I. I. *Brennvtlauf und Kreisprozesse von Verbrennungsmotoren*. Berlin: VEB Verlag Technik, 1970.
11. Kavtaradze, R. Z. *Teoriya porshnevykh dvigatelei. Spetsial'nye glavy*. M.: Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Bauman, 2016.
12. Luo, Qing-he, Ji-Bin Hu, Bai-gang Sun, Fu-shui Liu, Xi Wang, Chao Li, and Ling-zhi Bao. "Experimental investigation of combustion characteristics and NOx emission of a turbocharged hydrogen internal combustion engine." *International journal of hydrogen energy* 44.11 (2019): 5573–5584. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.08.184.
13. Cao, Jingjie, Ming Jia, Bo Niu, Yachao Chang, Zhen Xu, and Hong Liu. "Establishment of an improved heat transfer model based on an enhanced thermal wall function for internal combustion engines operated under different combustion modes." *Energy conversion and management* 195 (2019): 748–759. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.05.046.
14. Dahham, Rami Y., Haiqiao Wei, and Jiaying Pan. "Improving thermal efficiency of internal combustion engines: recent progress and remaining challenges." *Energies* 15.17 (2022): 6222. DOI: 10.3390/en15176222
15. Kulichenkov, V. P., V. V. Sarantsev, and A. A. Chepurkin. *Sistemy i ustroystva kontrolya mekhanicheskikh parametrov turboagregatov*. Minsk: BNTU, 2015.
16. Enkodery — printsip raboty, vidy i osnovnoe primenenie. Web. 9 Aug. 2023 <<https://masterservisnsk.ru/elektronika/enkoder-princip-raboty.html>>.
17. K voprosu o tochnosti uglovykh enkoderov. Web. 9 Aug. 2023 <<https://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-933.pdf>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гаврилов Владимир Васильевич —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: vgavrilov47@yandex.ru, kaf_sdvs@gumrf.ru

Машенко Владимир Юрьевич —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «СПбГМТУ»

190121, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Лоцманская, 3

e-mail: masvladimir@yandex.ru

Жуков Владимир Анатольевич —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: zhukov_vla@mail.ru, zhukovva@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gavrilov, Vladimir V. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: vgavrilov47@yandex.ru, kaf_sdvs@gumrf.ru

Mashchenko, Vladimir Yu. —

PhD, associate professor
State Marine Technical University of Saint-Petersburg

3 Lotsmanskaya Str., St. Petersburg, 190121,
Russian Federation

e-mail: masvladimir@yandex.ru

Zhukov, Vladimir A. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: zhukov_vla@mail.ru, zhukovva@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 1 апреля 2024 г.

Received: April 1, 2024.