

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ В СУДОВОМ ДВС ПО ИНДИКАТОРНЫМ ДИАГРАММАМ

В статье изложены термодинамические основы и методика уточненного расчета характеристик выделения теплоты при горении по экспериментальным индикаторным диаграммам, введен термин «располагаемая теплота». Предложено оценивать продолжительность сгорания по положению «квази-адиабатной точки» на характеристике располагаемой теплоты. Исследованы некоторые причины погрешностей в исходных данных для анализа индикаторных диаграмм, в частности, описаны неточности в определении цикловой подачи топлива и измерении текущего давления в цилиндре двигателя при регистрации индикаторной диаграммы. С целью учёта указанных погрешностей предложены и обоснованы способы корректировки указанных исходных данных. Утверждается, что использование на практике предложенной методики и соответствующей программы анализа индикаторных диаграмм обеспечивает требуемое качество результатов исследования влияния различных факторов на процесс горения топлива в дизеле и способствует высокому качеству его диагностирования.

Ключевые слова: рабочий процесс дизеля, выделение теплоты при горении, характеристики тепло-выделения, погрешности регистрации индикаторных диаграмм, учёт погрешностей.

Введение

Развитие судовых двигателей внутреннего сгорания и эффективность их использования в значительной мере определяются возможностями получения достоверной информации о процессе горения топлива в дизелях и выполнения анализа указанного процесса. Для этого создаются диагностические системы, использующиеся на стадиях создания и технического использования двигателей [1] – [3]. Успехам в решении указанных задач способствуют достижения современной микроэлектроники и вычислительной техники. Актуальной проблемой является развитие алгоритмического обеспечения работы диагностических систем.

С учётом ранее изложенного, цель данного исследования состоит в уточнении теоретических основ исследования процесса горения в судовом дизеле по индикаторным диаграммам и разработке усовершенствованной методики расчета характеристик тепловыделения при горении.

Характеристики выделения теплоты при горении топлива в дизеле.

Уточнение понятий

Существующие и по настоящее время модернизируемые упрощенные модели рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания (ДВС) обладают весьма ограниченными возможностями в части описания процесса горения топлива [4]. Известно, что важнейшим средством исследования горения в дизеле является анализ индикаторной диаграммы (ИД) на выделение теплоты (или на так называемое тепловыделение) [5]. ИД — это зависимость давления в цилиндре p , МПа, от текущего объема цилиндра V , м³ (свернутая ИД) или от угла поворота коленчатого вала φ , °п.к.в. (развернутая ИД). Фрагмент развернутой ИД приведен на рис. 1.

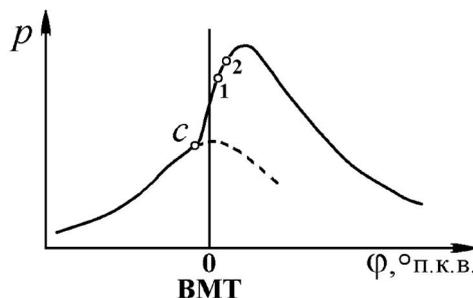


Рис. 1. Развернутая индикаторная диаграмма:

c — точка «отрыва» линии сгорания от линии сжатия; 1, 2 — текущие точки на линии сгорания

Анализируя форму ИД, можно получить информацию о процессе выделения теплоты от сгорания топлива. Характеристикой тепловыделения называют функцию количества теплоты, выделившейся в цилиндре, от угла поворота коленчатого вала $Q = f(\varphi)$ или времени $Q = f(\tau)$ (ранее были введены в употребление не вполне корректные термины «закон сгорания», «закон тепловыделения» [6]).

Характеристики тепловыделения выражают по-разному: в виде зависимости абсолютного количества теплоты Q , выделившейся к текущему углу п.к.в., — интегральной характеристики $Q = f(\varphi)$ либо в виде зависимости, так называемой скорости тепловыделения $dQ/d\varphi = f(\varphi)$ — дифференциальной характеристики. В большинстве случаев используют характеристики не абсолютного, а относительного тепловыделения, которые обычно получают делением текущих значений $Q(\varphi)$ на теплоту $Q_{ц}$, выделившуюся при сгорании цикловой дозы $g_{ц}$ 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 характеристику относительной скорости тепловыделения (интенсивности выделения теплоты при сгорании топлива) можно представить в виде $dx/d\varphi = f(\varphi)$. Указанные характеристики в упрощенном виде приведены на рис. 2.

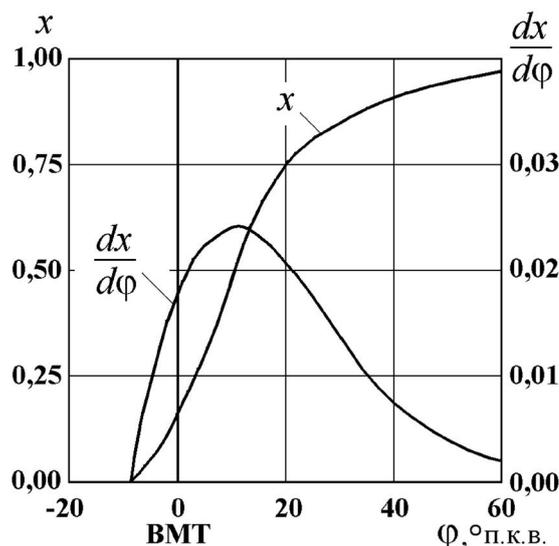


Рис. 2. Характеристики тепловыделения

При сгорании одна часть выделившейся теплоты Q_i подводится к рабочему телу и может быть использована для повышения его внутренней энергии и совершения механической работы, а другая ее часть: $Q_w = Q - Q_i$, представляет собой преимущественно потери теплоты через стенки цилиндра. Теплоту Q_i иногда называют *активной*, или *полезно используемой* [7]. Предложим, на наш взгляд, более точное её название — *располагаемая теплота*, т. е. теплота, которой можно располагать для того, чтобы некоторую её часть (желательно максимально возможную) преобразовать в полезную работу. Характеристики относительной выделившейся теплоты x , относительной располагаемой теплоты x_i и относительной теплоты потерь x_w приведены на рис. 3.

В момент окончания горения относительное количество выделившейся теплоты теоретически должно быть равно единице. Фактически горение («догорание») при малой скорости тепловыделения продолжается в течение значительной части такта расширения рабочего тела в цилиндре, иногда даже после открытия выпускных органов (клапанов, окон). Условно принимают за момент окончания горения точку достижения $x = 0,98 \dots 0,99$. По нашему мнению, этот вопрос можно решить более строго. Для этого за момент окончания горения целесообразно принять точку z

(см. рис. 3), которая соответствует квазиadiaбатной точке e на кривой $x_i(\varphi)$, в которой $dx_i/d\varphi = 0$. Эта точка является квазиadiaбатной, так как она соответствует моменту времени, в который интенсивность выделения теплоты от догорания полностью компенсируется интенсивностью потерь теплоты в стенки цилиндра, т. е. $dx_i/d\varphi = -dx_w/d\varphi$.

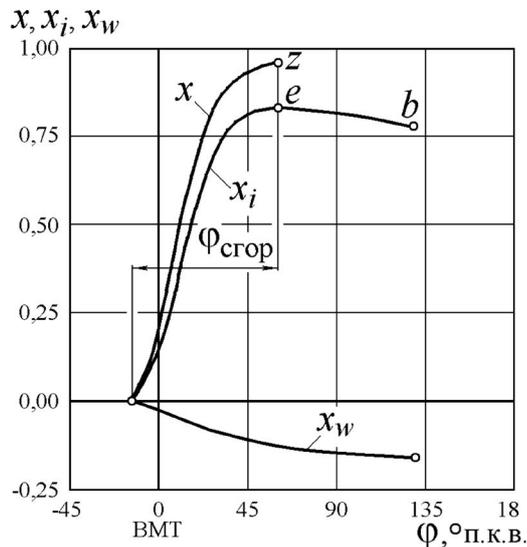


Рис. 3. Характеристики выделившейся, располагаемой теплоты и тепловых потерь

Ввиду наличия этого равенства, можно считать, что в итоге рабочее тело в рассматриваемой квазиadiaбатной точке не получает теплоту и не отдает её стенкам цилиндра. Другими словами, можно формально считать, что в указанной точке имеет место «мгновенная aдиабата». Как видно, на рис. 3 в этой точке кривая относительной располагаемой теплоты $x_i(\varphi)$ достигает максимума. По окончании горения (после точки z) в процессе расширения рабочего тела x_i уменьшается, так как одна часть этой располагаемой теплоты преобразуется в полезную работу, а другая ее часть отводится в стенки цилиндра.

Предпочтительность использования квазиadiaбатной точки на кривой $x_i(\varphi)$ для определения момента окончания горения объясняется следующим образом. Составляющая x_i выделившейся теплоты обычно определяется с меньшей погрешностью, чем x_w , ввиду того, что первая оценивается по экспериментальной ИД, а вторая — по обобщенной эмпирической зависимости, которая может не вполне точно отражать условия конкретного эксперимента. Поэтому по рассмотренной квазиadiaбатной точке на кривой $x_i(\varphi)$ можно с большей определенностью, чем по кривой $x(\varphi)$, судить о моменте окончания горения и, соответственно, делать выводы о влиянии того или иного фактора на продолжительность горения. Это позволит повысить качество идентификации параметров математической модели рабочего процесса [8] и принимаемых технических решений по результатам диагностирования двигателя [9] – [11].

Зарегистрировав в эксперименте индикаторную диаграмму и выполнив её расчетный анализ, можно получить рассмотренные характеристики тепловыделения, что позволяет оценить качество процесса сгорания топлива.

Термодинамические основы методики анализа индикаторных диаграмм

Очевидно, что представляемая индикаторной диаграммой (см. рис. 1) зависимость давления в цилиндре от угла п.к.в. — $p(\varphi)$, некоторым образом отражает подведенную к рабочему телу располагаемую теплоту $Q_i(\varphi)$. Кратко изложим термодинамические основы анализа ИД на тепловыделение.

Можно достаточно просто определить давление p и объем рабочего тела V для любой точки ИД. Считаем эти величины известными. Пренебрегаем необратимостью изменения состояния ра-

бочего тела в процессе горения и принимаем допущение о неизменности массы рабочего тела M . Тогда для описания связи между p , V и Q_i можно использовать уравнение первого закона термодинамики:

$$dQ_i = dU + pdV, \quad (1)$$

где U — внутренняя энергия рабочего тела.

Выразим изменение внутренней энергии через изменение температуры и запишем:

$$dQ_i = Mc_v dT + pdV,$$

где c_v — удельная изохорная теплоемкость смеси воздуха и продуктов сгорания; T — температура рабочего тела.

Используем уравнение состояния газа $MRT = pV$, записанное в дифференциальной форме:

$$MRdT = d(pV), \quad (2)$$

где R — газовая постоянная.

Умножив члены уравнения (2) на c_v и разделив на R , получим

$$Mc_v dT = \frac{c_v d(pV)}{R}. \quad (3)$$

С учетом уравнения Майера $R = c_p - c_v$ можно записать:

$$\frac{R}{c_v} = \frac{c_p - c_v}{c_v} = k - 1,$$

где k — показатель адиабаты.

Тогда уравнение состояния (3) примет вид

$$Mc_v dT = \frac{d(pV)}{k - 1}. \quad (4)$$

Отметим, что при анализе ИД уравнение (4) может быть использовано для вычисления текущей температуры рабочего тела.

С учетом выражения (4) перепишем уравнение (1) первого закона термодинамики в виде:

$$dQ_i = \frac{d(pV)}{k - 1} + pdV. \quad (5)$$

Зная изменение определяемых по ИД текущих значений p и V , по уравнению (5) можно вычислить подводимую к рабочему телу теплоту dQ_i . Рассмотрим, как это выполняется на практике. Для участка ИД 1 – 2 конечной длины (см. рис. 1) с учетом уравнения (5) можно записать

$$Q_{i(1-2)} = \int_1^2 \frac{d(pV)}{k - 1} + \int_1^2 pdV. \quad (6)$$

Члены правой части уравнения (6) запишем в конечных разностях. Первый интеграл

$$\int_1^2 \frac{d(pV)}{k - 1} = \frac{p_2 V_2}{k_2 - 1} - \frac{p_1 V_1}{k_1 - 1},$$

где k_1 , k_2 — показатели текущей адиабаты.

Заменив k_1 и k_2 на средний показатель адиабаты k_{1-2} , запишем

$$\int_1^2 \frac{d(pV)}{k - 1} = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{k_{1-2} - 1}. \quad (7)$$

Второй интеграл

$$\int_1^2 pdV = \frac{p_1 + p_2}{2} (V_2 - V_1). \quad (8)$$

Подставив выражения (7) и (8) в уравнение (6), получим

$$Q_{i(1-2)} = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{k_{1-2} - 1} + \frac{p_2 + p_1}{2} (V_2 - V_1). \quad (9)$$

Итоговое уравнение (9) может быть использовано при анализе ИД на тепловыделение, т. е. при анализе текущей интенсивности процесса горения топлива в двигателе.

Необходимо дополнительно пояснить некоторые допущения, положенные в основу описываемой методики анализа ИД. При оценке теплоемкости c_p , указанной в уравнении (4), принимают, что в каждый момент времени рабочего цикла рабочее тело состоит из воздуха и «чистых» (конечных) продуктов сгорания. При этом не учитываются наличие и свойства промежуточных продуктов реакций горения.

Показатель адиабаты k_{1-2} , так же как c_p , невозможно определить точно. Так, значения k для продуктов сгорания и воздуха находятся пределах $k \approx 1,3 \dots 1,4$, а для большинства углеводородов, содержащихся в промежуточных продуктах горения, k близок к единице. Ввиду отсутствия сведений о составе и свойствах промежуточных продуктов, невозможно точно определить k для рабочего тела в процессе горения.

Ввиду указанных причин, допущение о том, что в каждый момент времени рабочее тело рассматривается как смесь воздуха и конечных продуктов сгорания при использовании любой из известных методик анализа ИД на тепловыделение не позволяет получить высокоточный результат. Поэтому все известные методики, включая рассматриваемую в данной статье, могут быть использованы главным образом в сравнительных исследованиях.

Методика анализа индикаторных диаграмм: основные положения методики, принятые допущения и основные операции, выполняемые в соответствии с методикой

Рассмотрим основные положения методики анализа ИД. Количество выделившейся при сгорании топлива теплоты dQ может быть определено как сумма количеств располагаемой теплоты dQ_i и потерь теплоты $dQ_{\text{пот}}$. Количество теплоты dQ_i , в соответствии с изложенными ранее термодинамическими основами, вычисляется в результате анализа ИД. Потери теплоты в общем виде можно записать в виде

$$dQ_{\text{пот}} = dQ_w + dQ_{\text{н.с}} + dQ_{\text{дис}} + dQ_{\text{ут}}, \quad (10)$$

где dQ_w — потери вследствие передачи теплоты стенкам цилиндра; $dQ_{\text{н.с}}$ — потери теплоты из-за неполноты сгорания топлива; $dQ_{\text{дис}}$ — потери теплоты на диссоциацию молекул продуктов сгорания; $dQ_{\text{ут}}$ — потери теплоты, связанные с утечками газа из надпоршневой полости цилиндра;

Ввиду малости трех последних составляющих потерь в выражении (10), ими обычно пренебрегают. Поэтому в соответствии с данной методикой количество теплоты, выделившейся при сгорании топлива

$$dQ = dQ_i + dQ_w. \quad (11)$$

Учитывая уравнения (11) и (9), количество выделившейся теплоты может быть выражено в конечных разностях:

$$Q_{(1-2)} = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{k_{1-2} - 1} + \frac{p_2 + p_1}{2} (V_2 - V_1) + Q_{w(1-2)}. \quad (12)$$

Данная методика построена на основе использования уравнения (12).

В порядке обобщения изложенных термодинамических основ и положений методики приведем перечень принятых допущений:

- 1) рабочее тело рассматривается как смесь воздуха и конечных продуктов сгорания топлива, промежуточные продукты сгорания не учитываются;
- 2) потери теплоты на диссоциацию продуктов сгорания, неполноту сгорания не учитываются;

- 3) утечки рабочего тела из цилиндра в процессе горения топлива отсутствуют;
- 4) мольная масса рабочего тела считается постоянной и равной мольной массе воздуха (≈ 29 кг/кмоль);
- 5) удельная изохорная теплоемкость рабочего тела считается величиной квазипостоянной, определяемой для каждого расчетного момента времени (расчетного угла φ , °п.к.в), а ее производная по углу φ принимается равной нулю.

Основные операции, выполняемые при реализации методики, заключаются в следующем. Обработка ИД при анализе тепловыделения состоит в том, что, начиная с некоторой точки диаграммы (обычно принимают точку c «отрыва» линии сгорания от линии сжатия (см. рис. 1)), для каждого малого участка диаграммы по формуле (9) вычисляют количество подведенной к рабочему телу располагаемой теплоты Q_i . По одной из известных методик (например, с использованием эмпирической зависимости Эйхельберга для коэффициента теплоотдачи) также для каждого участка определяют количество теплоты Q_w , отведенной в стенки цилиндра. Далее, суммируя Q_i и Q_w , вычисляют количество выделившейся при сгорании теплоты Q .

Выполнив указанные операции для всех участков ИД, нарастающим итогом строят интегральную характеристику тепловыделения в дизеле $Q(\varphi)$ или аналогичную характеристику в относительном виде $x(\varphi) = Q(\varphi)/Q_c$, рассмотренную выше.

Учет погрешности измерения цикловой подачи топлива при анализе индикаторной диаграммы

Достоверность результатов анализа ИД определяет качество исследования рабочего процесса дизеля и идентификации его технического состояния [9], [10]. Большинство исследователей традиционно используется методика анализа ИД и соответствующая программа расчёта, разработанные в ЦНИДИ авторами В. П. Лазурко и В. А. Кудрявцевым. Нами эта методика усовершенствована. Новая программа издана под именем InDiagExpert [12]. Рассмотрим особенности предлагаемой методики по сравнению с традиционной.

В существующих методиках по-разному учтены возможные погрешности измерений величин, входящих в состав исходных данных расчета. Источников погрешностей, в частности случайных погрешностей, может быть много. Погрешности могут быть связаны, например, с отсутствием одновременности регистрации ИД и измерения расхода топлива на дизель (следовательно, цикловой подачи топлива). Причиной отмеченного несоответствия результата измерения расхода топлива индикаторной диаграмме может явиться недостаточно установившийся режим работы дизеля, межцикловая нестабильность подачи топлива в цилиндр, а также наличие других источников погрешностей измерений. В итоге погрешности расчета характеристик тепловыделения могут оказаться весьма значительными. Так, например, интегральная характеристика относительной выделившейся теплоты $x(\varphi)$ к моменту окончания горения может выйти на значения $x \gg 1,0$ (что, разумеется, не соответствует действительности) или, наоборот, на значения $x \ll 1,0$.

В традиционной методике рассматриваемая проблема решена методом корректировки положения верхней мертвой точки (ВМТ) поршня на диаграмме. Метод заключается в формальном смещении ВМТ относительно начала расчета на некоторый угол корректировки, который определяется путем последовательных приближений к значению, обеспечивающему достижение заранее заданного x (например, $x = 0,99$, что в соответствии с методикой принимается за условие окончания горения). Практика показывает, что указанный угол корректировки, как правило, мал. Тем не менее, рассматриваемый метод имеет существенные недостатки, которые принципиально важно рассмотреть.

Во-первых, этот метод не вполне корректен по существу. Дело в том, что реальное положение ВМТ поршня неизменно, оно измерено с некоторой постоянной для испытательного стенда инструментальной (систематической) погрешностью. Поэтому нет оснований для ввода указанной переменной поправки. Во-вторых, корректировка ВМТ на диаграмме является исключительно искусственной процедурой, которая может значительно исказить фактическую характеристику

тепловыделения как по значениям описываемых ею величин, так и по ее форме. Следует признать, что в некоторых случаях корректировка ВМТ может быть оправдана [13], [14]. Однако возникающее при этом искажение формы характеристики может существенно затруднить и снизить качество исследования влияния факторов на процесс горения топлива.

Во избежание вышеописанных недостатков в программе InDiagExpert применен предложенный нами метод нейтрализации рассматриваемых погрешностей расчета характеристик тепловыделения по ИД — метод корректировки цикловой подачи топлива. Для этого имеются достаточно веские основания, поскольку такая корректировка позволяет привести в соответствие индикаторную диаграмму действительной цикловой подачи. Возможные причины их несоответствия описаны выше. При предлагаемом методе корректировки выполняется пропорциональное изменение ординат характеристики тепловыделения, но ее форма (характер процесса горения) не изменяется. По сути, описанная процедура представляет собой приведение ИД к безразмерному виду, что позволяет вполне корректно сравнивать различные диаграммы по характеру описываемого ими процесса горения.

Опыт работы с нашей программой InDiagExpert показал, что применение предложенного метода в сравнительном анализе динамики тепловыделения вполне оправдано. Особенно это касается тех случаев, когда условия теплоотдачи от газов к стенкам цилиндра можно считать неизменными. Для иллюстрации преимуществ предложенного способа корректировки приведем результаты обработки трех многоцикловых ИД, записанных подряд в эксперименте на одном режиме работы дизеля. Полученные при этом интегральные характеристики тепловыделения приведены на рис. 4. Расчеты выполнены по традиционной программе с корректировкой ВМТ (см. рис. 4, а) и по нашей программе InDiagExpert с приведением диаграммы к безразмерному виду (см. рис. 4, б). Оказалось, что разброс значений угла поворота коленчатого вала, при котором выгорает, например, 80 % массы топлива, в первом случае составляет 9 °п.к.в., а во втором — 3 °п.к.в., т. е. в 3 раза меньше. Это означает, что с использованием программы InDiagExpert можно проводить более точные исследования влияния тех или иных факторов на процесс сгорания.

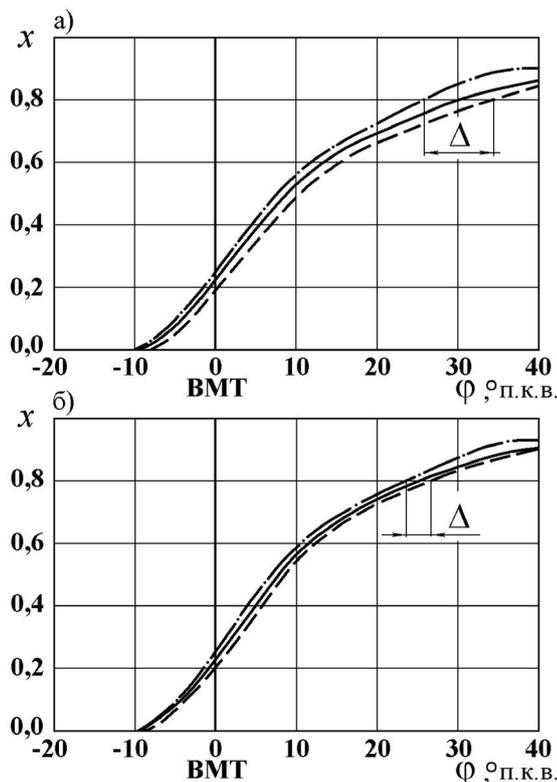


Рис. 4. Интегральные характеристики тепловыделения, полученные обработкой индикаторных диаграмм: а — по традиционной программе; б — по программе InDiagExpert

Учет погрешности измерения давления в цилиндре при анализе индикаторной диаграммы

Наряду с рассмотренными ранее погрешностями качество исследования процесса сгорания по ИД и диагностирования работы двигателя [15] определяется также погрешностями измерения текущего давления в цилиндре. На ИД часто обнаруживаются «волны», вызванные не характером процесса горения, а распространением прямых и обратных волн давления в канале, соединяющем датчик давления с полостью камеры сгорания (в измерительном канале). С иным объяснением природы указанных волн вряд ли можно согласиться. В самом деле, снижение давления в течение периода волны невозможно объяснить, например, отводом теплоты от заряда цилиндра или расширением заряда. В результате действия указанных погрешностей рассчитываемые характеристики $dx_i(\varphi)$ и, соответственно, $dx(\varphi)$ на завершающих стадиях горения (догорания) могут принимать отрицательные значения, что, разумеется, не соответствует действительности. Между тем, точность анализа догорания, происходящего в условиях недостатка кислорода воздуха, существенно определяет уровень качества исследования и диагностирования рабочего процесса двигателя.

Исследователям приходится решать задачу нейтрализации влияния рассматриваемых погрешностей измерений [16], [17]. По предложенной нами методике характеристика $dx(\varphi)$ подвергается «сглаживанию» на участке догорания. При этом осуществляется «фильтрация» сигнала давления, освобождение его от «шума», вызванного волнами давления в измерительном канале. Сглаживание производится, начиная с шага счета, на котором происходит первое изменение знака $dx(\varphi)$ так, чтобы в результате для каждого угла φ расчетного интервала оказалось

$$dx/d\varphi \geq 0. \quad (13)$$

Критерием корректности применения предложенного сглаживания является выполнение равенства:

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_{окг}} (dx/d\varphi)_{сглаж} d\varphi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_{окг}} (dx/d\varphi)_{исх} d\varphi, \quad (14)$$

где φ_1 — угол первого изменения знака величины $dx/d\varphi$; $\varphi_{окг}$ — угол окончания горения; $(dx/d\varphi)_{исх}$, $(dx/d\varphi)_{сглаж}$ — соответственно исходная и сглаженная характеристики относительной скорости тепловыделения.

Сглаживание осуществляется по методу средних. При этом характеристика разбивается на участки по углу п.к.в. с шагом $\Delta\varphi$. Значение $dx/d\varphi$ на середине некоторого участка заменяется значением, «лежащим» на прямой, соединяющей $dx/d\varphi$ на серединах соседних участков. Процедура может быть выражена следующим образом:

$$\left(\frac{dx}{d\varphi}\right)_{сглаж}(\varphi) = 0,25 \left[\frac{dx}{d\varphi}(\varphi - \Delta\varphi) + 2 \frac{dx}{d\varphi}(\varphi) + \frac{dx}{d\varphi}(\varphi + \Delta\varphi) \right]. \quad (15)$$

Многokратное сглаживание производится от последнего участка «волны» характеристики, на котором имеет место положительное значение $dx/d\varphi = f(\varphi_1)$ до аналогичного последнего участка следующей «волны» с положительным значением $dx/d\varphi = f(\varphi_2)$. Сглаживания выполняют либо до тех пор, пока для каждого угла, лежащего в интервале (φ_1, φ_2) , ни выполнится условие (13), либо до достижения заданного числа сглаживаний. Пример результата сглаживания приведен на рис. 5.

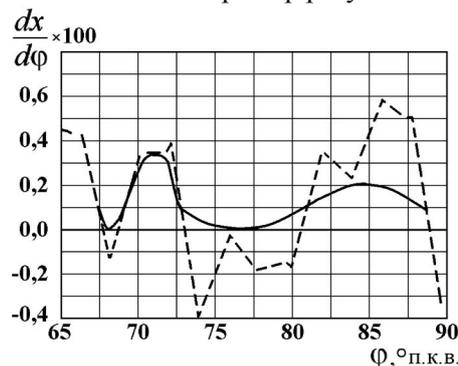


Рис. 5. Пример сглаживания характеристики скорости тепловыделения в период догорания топлива

В выполненных ранее работах [18], а также в последних версиях нашей программы использован описанный способ «сглаживания» индикаторной диаграммы, позволяющий учесть погрешности измерения текущего давления в цилиндре двигателя на стадии догорания топлива.

Заключение

Высокие показатели судового дизеля в значительной мере определяются характером и параметрами процесса выделения теплоты при сгорании топлива. Рациональная организация этого процесса требуется как при создании дизеля, так и в течение всего срока его эксплуатации. Используемые при этом диагностические системы нуждаются в совершенствовании, в частности, методик анализа индикаторных диаграмм. Для этого авторами данной статьи изложены теоретические основы анализа процесса горения топлива в судовом дизеле по экспериментальным индикаторным диаграммам и разработана методика уточненного расчета характеристик тепловыделения при горении по указанным диаграммам.

Вполне строго, в соответствии с положениями термодинамики показано, как располагая экспериментально полученной зависимостью давления в цилиндре двигателя от угла поворота коленчатого вала, можно получить характеристики процесса выделения теплоты при сгорании топлива. При этом предложен и обоснован термин «располагаемая теплота», предложено оценивать продолжительность сгорания по положению квазиadiaбатной точки на характеристике располагаемой теплоты.

Рассмотрены некоторые причины погрешностей в исходных данных для анализа индикаторных диаграмм, предложены и обоснованы способы корректировки указанных данных. В частности, предложены способ корректировки цикловой подачи топлива и способ «фильтрации» сигнала давления, освобождение его от «шума», вызванного волнами давления в измерительном канале, возникающими при регистрации индикаторной диаграммы рабочего процесса двигателя.

Практика показывает, что использование предложенной методики и соответствующей программы анализа индикаторных диаграмм обеспечивают требуемое качество результатов исследования влияния различных факторов на процесс горения топлива в дизеле и способствуют высокому качеству его диагностирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тузов Л. В. Определение параметров тепловыделения по экспериментальной индикаторной диаграмме дизельного двигателя / Л. В. Тузов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2 (21). — С. 62–69.
2. Обозов А. А. Алгоритм поиска корректного положения отметки ВМТ в системах диагностики судовых дизелей / А. А. Обозов // Двигателестроение. — 2006. — № 1. — С. 27–30.
3. Лашко В. А. Средства и методы диагностирования дизелей по индикаторной диаграмме рабочего процесса / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков. — Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2007. — 147 с.
4. Гусаков С. В. Простая модель действительного рабочего цикла ДВС, учитывающая характер тепловыделения / С. В. Гусаков, А. М. Довольнов // Труды международной конференции «Двигатель-2007», 19–21 сентября 2007 г. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. — С. 53–57.
5. Коньков А. Ю. Диагностирование технического состояния тепловозного дизеля по индикаторной диаграмме на основе теории идентификации / А. Ю. Коньков, В. А. Лашко // Двигателестроение. — 2009. — № 3. — С. 19–23.
6. Грехов Л. В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей / Л. В. Грехов, Н. А. Иващенко, В. А. Марков. — М.: Легион-Автодата, 2004. — 344 с.
7. Луканин В. Н. Двигатели внутреннего сгорания: в 3 кн. Кн 1. Теория рабочих процессов / В. Н. Луканин, К. А. Морозов, А. С. Хачиян [и др.]; под ред. В. Н. Луканина, М. Г. Шатрова. — М.: Высш. шк., 2007. — 479 с.
8. Лашко В. А. Применение методов имитационного моделирования рабочих процессов дизеля при интерпретации результатов диагностического эксперимента / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2007. — № 6. — С. 46–53.

9. Лашко В. А. Метод идентификации технического состояния дизеля по результатам расчётно-экспериментального исследования индикаторной диаграммы в условиях рядовой эксплуатации / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков, А. А. Маркелов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. — 2007. — № 1. — С. 57–68.

10. Лашко В. А. Идентификация технического состояния дизеля по индикаторной диаграмме с учётом особенностей эксперимента в условиях эксплуатации / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков // Труды международной конференции «Двигатель-2007», 19–21 сентября 2007 г. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. — С. 547–551.

11. Коньков А. Ю. Количественное оценивание износов и разрегулировок тепловозного дизеля по данным индицирования рабочих процессов / А. Ю. Коньков, В. А. Лашко, В. Г. Кочерга // Вестник СамГУПС. — 2009. — Вып. 5(17). — С. 102–109.

12. Гаврилов В. В. Программа InDiagExpert расчета характеристик тепловыделения в дизеле по индикаторным диаграммам / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко // Четвёртая Всероссийская межотраслевая научно-техническая конференция «Актуальные проблемы морской энергетики». Санкт-Петербург, 12–13 февраля 2015 г.: материалы конф. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2015. — С. 45–46.

13. Лашко В. А. Расчётный метод коррекции действительного положения ВМТ при индицировании ДВС / В. А. Лашко // Двигателестроение. — 2007. — № 3. — С. 34–38.

14. Лашко В. А. Получение индикаторной диаграммы при асинхронном измерении сигнала давления / В. А. Лашко, А. Ю. Коньков // Двигателестроение. — 2007. — № 4. — С. 33–37.

15. Маркелов А. А. Диагностирование дизеля по результатам расчётно-экспериментального исследования индикаторной диаграммы в условиях рядовой эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук / А. А. Маркелов. — Хабаровск: Тихоокеанский гос. ун-т, 2007. — 175 с.

16. Обозов А. А. Алгоритмы сглаживания индикаторных диаграмм / А. А. Обозов // Судостроение. — 2006. — № 4. — С. 38–41.

17. Приходько В. М. Цифровая фильтрация вариационных рядов на ПЭВМ в отрасли водного транспорта / В. М. Приходько, А. М. Приходько // XII Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2010)». Санкт-Петербург, 20–22 октября 2010 г.: материалы конф. — СПб.: РАН, 2010. — С. 213–214.

18. Гаврилов В. В. Методы повышения качества смесеобразования и сгорания в судовом дизеле на основе математического и физического моделирования локальных внутрицилиндровых процессов: автореф. ... д-ра техн. наук / В. В. Гаврилов. — СПб.: СПбГМТУ, 2004. — 43 с.

THEORETICAL FOUNDATIONS AND PROCEDURE OF THE ANALYSIS OF PROCESS OF COMBUSTION OF SHIP INTERNAL COMBUSTION ENGINES ACCORDING TO INDICATOR DIAGRAMS

The accurate information about fuel combustion process in engines is required for improvement of ship diesel engines and systems of their diagnostics. The article deals with thermodynamic foundations and a procedure of more precise calculation of characteristics of heat release from combustion according to experimental indicator diagrams. The term “effective heat” is suggested estimating the duration of combustion by a position of “quasiadiabatic point” of the characteristic of effective heat. Some reasons of errors in the initial data are researched for the analysis of indicator diagrams. In particular, inaccuracies are described in specifying of cyclic supply of fuel and measurement of current pressure in an engine cylinder while recording the indicator diagram. The ways of correcting the specified initial data are suggested and justified for the purpose of recording the specified errors. The practical application of the suggested procedure and relevant program of indicator diagrams analysis are maintained to provide the required quality of research results of various factors in fuel combustion process in a diesel engine and contribute to the high quality of its diagnostics.

Keywords: operation process of a diesel engine, heat release from combustion, characteristics of heat release, errors of recording the indicator diagrams, record of errors.

REFERENCES

1. Tuzov, L. V. “Definition of parameters of the thermal emission under the experimental display diagram of the diesel engine.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(21) (2013): 62–69.

2. Obozov, A. A. "Algorithm of Correct Determination of TDC Position in Diagnostic Systems of Marine Diesel Engines." *Dvigatestroyeniye* 1 (2006): 27–30.
3. Lashko, V. A., and A. Ju. Konkov. *Sredstva i metody diagnostirovaniya dizelej po indikatornoj diagramme rabocheho processa*. Habarovsk: Izd-vo DVGUPS, 2007.
4. Gusakov, S. V., and A. M. Dovolnov. "Prostaya model dejstvitel'nogo rabocheho cikla DVS, uchityvajushhaja karakter teplovydelenija." *Trudy mezhdunarodnoj konferencii «Dvigatel-2007»*, 19–21 sentjabrja 2007 g. M.: MGTU im. N.Je. Baumana, 2007: 53–57.
5. Konkov, A. Yu., and V. A. Lashko. "Diagnosis of a Locomotive Engine by Means of Indicator Diagram Based on Identification Theory." *Dvigatestroyeniye* 3 (2009): 19–23.
6. Grehov, L. V., N. A. Ivashhenko, and V. A. Markov. *Toplivnaja apparatura i sistemy upravlenija dizelej*. M.: Legion-Avtodata, 2004.
7. Lukanin, V. N., K. A. Morozov, A. S. Hachijan, et al. *Dvigateli vnutrennego sgoranija*. V 3 kn. Kn 1. *Teoriya raboчих processov*. M.: Vysshaja shkola, 2007.
8. Lashko, V. A., and A. Yu. Konkov. "Primenenie metodov imitacionnogo modelirovaniya raboчих processov dizelja pri interpretacii rezultatov diagnosticheskogo jeksperimenta." *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building* 6 (2007): 46–53.
9. Lashko, V.A., A. Y. Konkov, 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 (2007): 57–68.
10. Lashko, V. A., and A. Ju. Konkov. "Identifikacija tehničeskogo sostojanija dizelja po indikatornoj diagramme s uchjotom osobennostej jeksperimenta v uslovijah jekspluatacii." *Trudy mezhdunarodnoj konferencii «Dvigatel-2007»*, 19–21 sentjabrja 2007 g. M.: MGTU im. N.Je. Baumana, 2007: 547–551.
11. Konkov, A.Yu., V. A. Lashko, and V. G. Kocherga. "Quantitative evaluation of wears and disarrangements in a diesel engine on the basis of work process indexing." *Bulletin of SamGUPS* 5-1 (2009): 102–109.
12. Gavrilov, V. V., and V. Ju. Mashhenko. "Programma InDiagExpert rascheta karakteristik teplovydelenija v dizele po indikatornym diagrammam." *Chetvjortaja Vserossijskaja mezhotraslevaja nauchno-tehničeskaja konferencija «Aktualnye problemy morskoy jenergetiki»*. Sankt-Peterburg, 12-13 fevralja 2015 g.: Materialy konferencii. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2015: 45–46.
13. Lashko, V. A., and A. Yu. Konkov. "Analytical Correction of Actual TDC Position as Defined from Engine Indicator Diagram." *Dvigatestroyeniye* 3 (2007): 34–38.
14. Lashko, V. A., and A. Yu Konkov. "Indicator Test Based on Asynchronous Pressure Measurement." *Dvigatestroyeniye* 4 (2007): 33–37.
15. Markelov, A. A. *Diagnostirovanie dizelja po rezultatam raschjotno-jeksperimentalnogo issledovanija indikatornoj diagrammy v uslovijah rjadovoj jekspluatacii*: PhD diss. (Tech.). Habarovsk: TGU, 2007.
16. Obozov, A. A. "Smoothing algorithms of indicator diagrams." *Sudostroenie* 4 (2006): 38–41.
17. Prihodko, V. M., and A. M. Prihodko. "Cifrovaja filtracija variacionnyh rjadov na PJeVM v otrasli vodnogo transporta." XII Sankt-Peterburgskaja mezhduna-rodnoj konferencija «Regionalnaja informatika (RI – 2010)». Sankt-Peterburg, 20–22 oktjabrja 2010 g.: *Trudy konferencii / SPOISU*. SPb.: RAN, 2010: 213–214.
18. Gavrilov, V. V. *Metody povyshenija kachestva smeseobrazovanija i sgoranija v sudovom dizele na osnove matematicheskogo i fizicheskogo modelirovaniya lokal'nyh vnutricilindrovych processov*: Abstract of dr. diss. (Tech.). SPb.: SPbGMTU, 2004

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гаврилов Владимир Васильевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
gavrilov@VG5647.spb.edu
Мащенко Владимир Юрьевич —
кандидат технических наук,
старший преподаватель.
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный морской технический
университет»
masvladimir@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Gavrilov Vladimir Vasilyevich —
Dr. of Technical Science, professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
gavrilov@VG5647.spb.edu
Mashchenko Vladimir Yurievich —
PhD, senior lecturer.
Saint-Petersburg State Marine Technical
University
masvladimir@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 3 декабря 2015 г.