

В. А. Рожанский, Г. М. Кухаренок, В. Е. Фрадин

ОБРАБОТКА ИНДИКАТОРНЫХ ДИАГРАММ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ ЭЦВМ

Мощностные и экономические показатели двигателей внутреннего сгорания зависят от качества протекания их рабочего процесса. Для оценки степени совершенства рабочего процесса двигателей применяются индикаторные диаграммы, снятые при их испытаниях.

Значительный интерес при обработке индикаторных диаграмм представляет определение среднего индикаторного давления p_i , текущей температуры газов в цилиндре, кривой активного тепловыделения, закона сгорания и относительной скорости сгорания. По этим показателям можно установить продолжительность сгорания, распределение тепла в процессах сжатия, сгорания и расширения и другие величины, которые позволяют наиболее полно оценить степень превращения химической энергии топлива в работу.

Эти параметры можно получить только в результате математической обработки данных индикаторной диаграммы, используя результаты непосредственных измерений, полученные при испытании двигателей. Такая обработка индикаторной диаграммы является трудоемкой и требует много времени. Использование ЭЦВМ позволяет значительно облегчить процесс обработки индикаторных диаграмм.

Рассмотрим методику и программу обработки индикаторной диаграммы дизельного двигателя при помощи ЭЦВМ «Минск-22».

При расчете процесса сгорание — расширение тепло, выделившееся в результате сгорания, определяется на основании первого закона термодинамики:

$$dQ = dU + AdL + dQ_w + dQ_a, \quad (1)$$

где dU — бесконечно малое приращение внутренней энергии; AdL — теплота, эквивалентная работе расширения газов; dQ_w — потери тепла вследствие теплопередачи; dQ_a — потери тепла вследствие диссоциации продуктов сгорания.

Для дизельных двигателей потери тепла вследствие диссоциации не превышают 2%, поэтому при расчетах ими можно пренебречь.

Для решения уравнения (1) индикаторная диаграмма разбивается на равные небольшие участки $\Delta\varphi$, для каждого из которых уравнение первого закона термодинамики запишется так:

$$\Delta Q_n = \Delta U_n + A\Delta L_n + \Delta Q_w, \quad (2)$$

где n — номер расчетного участка.

После расчета каждого участка определяется общее количество тепла, выделившегося в конце рассматриваемого участка:

$$Q_n = Q_{n-1} + \Delta Q_n = U_n + AL_n + Q_{w_n}, \quad (3)$$

где $U_n = U_{n-1} + \Delta U_n$ — изменение внутренней энергии в конце рассматриваемого участка; $L_n = L_{n-1} + \Delta L_n$ — работа газовых сил в конце участка; $Q_{w_n} = Q_{w_{n-1}} + \Delta Q_{w_n}$ — потери тепла вследствие теплопередачи в конце участка.

Относительное количество выделившегося тепла:

$$x_n = \frac{Q_n}{\beta_0 H_u} = \frac{U_n + AL_n}{\beta_0 H_u} + \frac{Q_{w_n}}{\beta_0 H_u} \quad (4)$$

или

$$x_n = x_{i_n} + x_{w_n}, \quad (4')$$

где β_0 — цикловая подача топлива; H_u — низшая теплотворная способность топлива; x_n — доля топлива, сгоревшего в конце рассматриваемого участка; x_{i_n} — относительное количество тепла, затраченного на изменение внутренней энергии и совершение работы, — коэффициент активного тепловыделения; x_{w_n} — относительное количество тепла, потерянного вследствие теплопередачи.

Зависимость доли сгоревшего топлива от времени или угла поворота коленчатого вала представляет собой закон сгорания $x = f(\varphi)$. Скорость сгорания $\frac{dx}{d\varphi}$ определяется путем численного дифференцирования закона сгорания.

Величина работы газовых сил на отдельных участках находится непосредственно по индикаторной диаграмме с помощью метода трапеций:

$$\Delta L_n = \frac{p_{n-1} + p_n}{2} (V_n - V_{n-1}), \quad (5)$$

где p_{n-1} , p_n — соответственно давление в начале и конце рассматриваемого участка;

V_{n-1} , V_n — соответственно объемы в начале и конце рассматриваемого участка.

Изменение внутренней энергии газа на участке находится по формуле

$$\Delta U_n = \frac{A}{k_{n-1}} (p_n V_n - p_{n-1} V_{n-1}), \quad (6)$$

где $k = \frac{c_p}{c_v}$ — среднее значение отношения теплоемкостей на участке; c_p , c_v — соответственно теплоемкости рабочего тела при постоянном давлении и объеме.

При расчете процесса сгорания значение k для продуктов сгорания дизельного топлива и воздуха определяется по эмпирическому уравнению, предложенному И. И. Виббе [2]:

$$k_n = 1,259 + \frac{76,7}{T_{n\text{cp}}} - \left(0,005 + \frac{0,0372}{\alpha}\right) x_{n\text{cp}}, \quad (7)$$

где $T_{n\text{cp}}$ — средняя температура газов на участке; α — коэффициент избытка воздуха; $x_{n\text{cp}} = x_{n-1} + \frac{\Delta x_n}{2}$ — относительное количество тепла, выделившегося от начала сгорания до середины рассматриваемого участка.

Точность определения k по этому уравнению составляет в пределах температур 250—2800°K величину порядка $\pm 0,05\%$, а в пределах температур 750—850°K — около $\pm 0,2\%$.

Температура газов определяется из характеристического уравнения

$$T_n = \frac{p_n V_n}{848 M_n \mu_{x_n}}, \quad (8)$$

где M_n — количество молей газа в начале сгорания; μ_{x_n} — текущий коэффициент молекулярного изменения,

$$\mu_{x_n} = 1 + (\mu - 1)x_n, \quad (9)$$

где μ — действительный коэффициент молекулярного изменения.

При определении μ_x и k за величину x_n на рассматриваемом участке принимается ее значение, вычисленное на предыдущем участке x_{n-1} . Ошибка, вносимая при таком допущении, будет незначительна в связи с малыми расчетными участками и малым влиянием величины x на значение коэффициента молекулярного изменения и отношение теплоемкостей.

При определении внутренней энергии в процессе сжатия значения k и μ_x находятся следующим образом [2].

Для воздуха в пределах температур 300—1000°K (процесс сжатия)

$$k_n = 1,438 - 1,05 \cdot 10^{-4} T_n \quad (10)$$

и соответственно коэффициент молекулярного изменения $\mu_x = 1$.

Потери тепла от газа к стенкам на расчетном участке находятся из выражения

$$\Delta Q_{w_n} = \frac{\Delta\varphi}{6n \cdot 3600} \sum_{i=1}^{i=z} [\alpha_{r_n} (T_n - T_{w_i}) F_{x_i}]_{\text{ср}}, \quad (11)$$

где i — номер поверхности охлаждения (поршень, головка, гильза и др.); z — количество поверхностей охлаждения; α_r — коэффициент теплоотдачи от газа к стенкам; T_w — средняя температура стенки со стороны газа; $\Delta\varphi$ — величина участка в градусах; F_x — поверхность теплообмена между газом и стенками цилиндра; n — число оборотов коленчатого вала.

В расчете учитывается изменение поверхности гильзы с изменением угла поворота коленчатого вала, а также изменение температуры гильзы по ее длине. Для остальных теплоотводящих поверхностей задается площадь охлаждения и ее температура.

Для определения коэффициента теплоотдачи имеется ряд формул. В расчетах для его приближенного нахождения принята формула Эйхельберга [1, 3]:

$$\alpha_{r_n} = 2,1 \sqrt[3]{c_m} \sqrt{p_n T_n}, \quad (12)$$

где c_m — средняя скорость поршня.

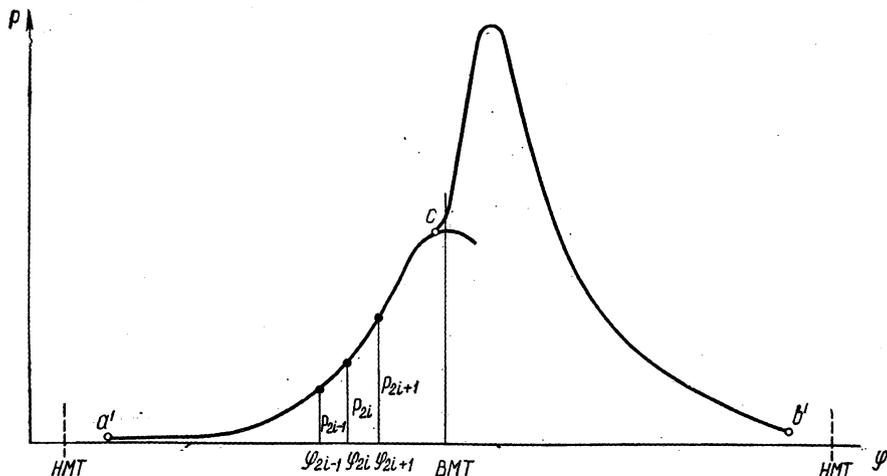


Рис. 1. Расчетная схема индикаторной диаграммы.

Обработка диаграммы ведется отдельно для периода сжатия (от момента закрытия впускного клапана a' до начала сгорания c) и периода сгорание — расширение (от начала сгорания c до момента открытия выпускного клапана b' (рис. 1).

После расчета последнего участка индикаторной диаграммы производится повторный расчет части индикаторной диаграммы, соответствующий периоду сгорания — расширение. При определении текущего значения коэффициента молекулярного изменения по формуле (9) и отношения теплостоекостей по формуле (7) в расчетные формулы вместо значений x_{n-1} подставляют найденные ранее значения x_n .

Обрабатываемая индикаторная диаграмма разбивается на отдельные отрезки и задается в машину в виде таблицы, в которую заносятся углы и давления, соответствующие началу, середине и концу отрезка (см. рис. 1). Внутри отрезка индикаторная диаграмма заменяется кривой второго порядка и интерполируется машиной через заданный расчетный интервал $\Delta\varphi$ град поворота коленчатого вала (град п. к. в.). Для этого сперва определяются коэффициенты a , b и c из системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} p_{2i-1} &= a\varphi_{2i-1}^2 + b\varphi_{2i-1} + c, \\ p_{2i} &= a\varphi_{2i}^2 + b\varphi_{2i} + c, \\ p_{2i+1} &= a\varphi_{2i+1}^2 + b\varphi_{2i+1} + c, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где i — номер отрезка индикаторной диаграммы.

Далее находятся текущие значения давлений газа через заданный интервал угла поворота коленчатого вала

$$p = a(\varphi_{2i-1} + \Delta\varphi k)^2 + b(\varphi_{2i-1} + \Delta\varphi k) + c, \quad (14)$$

где k — целое число, изменяющееся от 1 до $\frac{\varphi_{2i+1} - \varphi_{2i-1}}{\Delta\varphi}$.

Количество отрезков индикаторной диаграммы, задаваемых в машину, и их длина (в град п. к. в.) выбирается в зависимости от характера кривой давления индикаторной диаграммы.

Программой предусмотрена возможность разбивки каждого периода индикаторной диаграммы на 40 отрезков. Практически это позволяет задавать значения давлений через 4—5 град п. к. в.

Блок-схема программы расчета основных показателей рабочего процесса дизельного двигателя приведена на рис. 2.

Исходными данными для расчета, кроме давлений и соответствующих им углов поворота коленчатого вала, служат величины геометрических соотношений двигателя, данные, характеризующие режим работы, параметры начала сжатия и значения постоянных поверхности охлаждения и их температуры.

Исходные данные наносятся на перфоленты, результаты расчетов печатаются через два град п. к. в. на бумажной ленте. Для каждого расчетного участка находятся значения следующих величин:

$$p_n; V_n; T_n; L_n; U_n; Q_n; x_n; \left(\frac{dx_i}{d\varphi}\right)_n; Q_{w_n}; x_{w_n}; Q_n; x_n; \left(\frac{dx}{d\varphi}\right)_n; p_i.$$

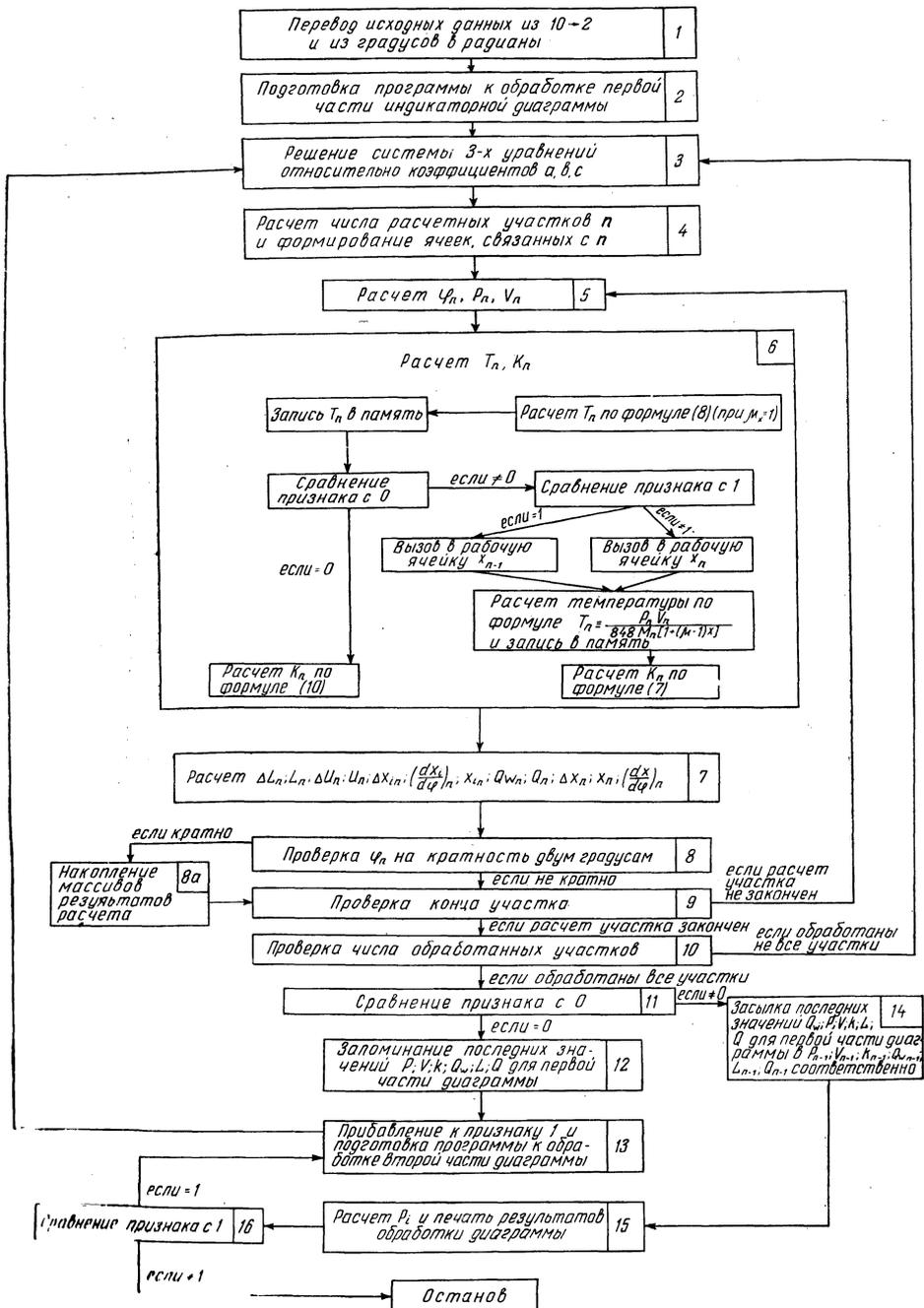


Рис. 2. Блок-схема программы обработки индикаторной диаграммы.

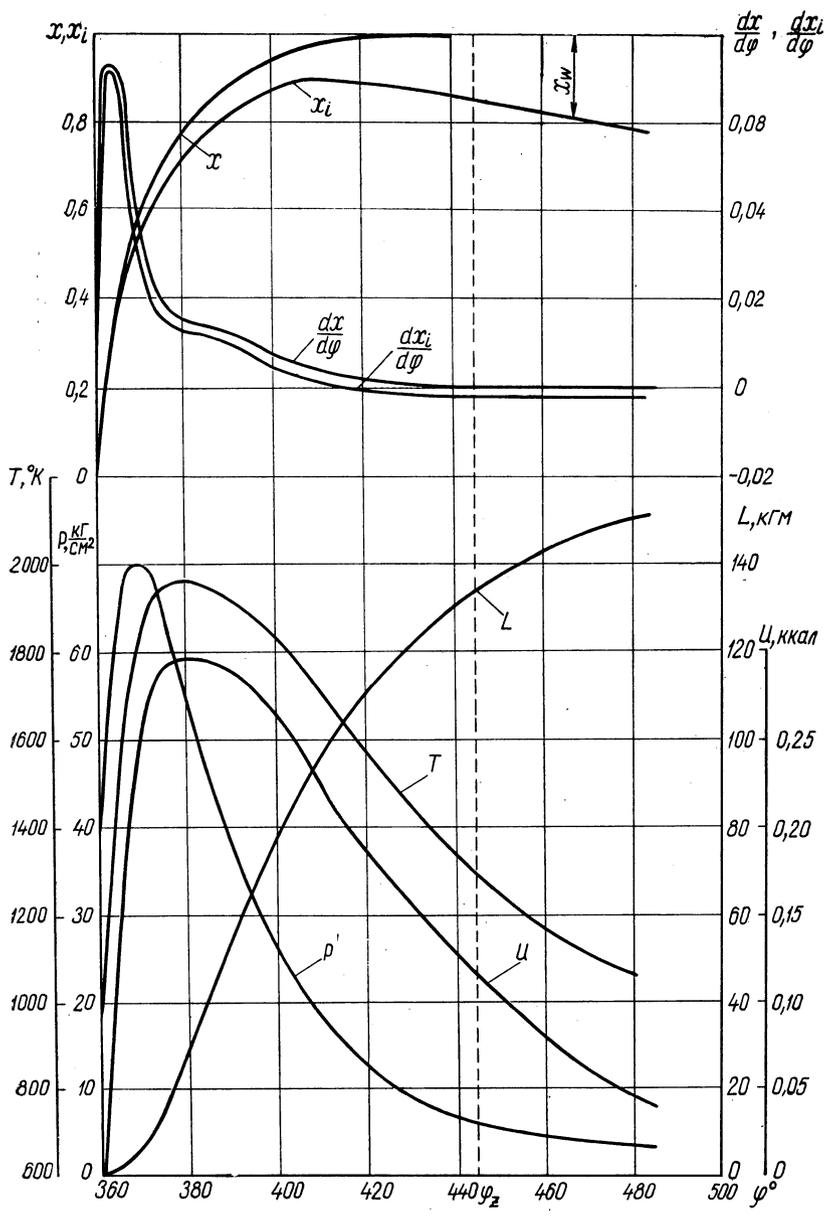


Рис. 3. Результаты обработки процесса сгорание — расширение индикаторной диаграммы дизельного двигателя.

По результатам расчета процесса сгорание — расширение определяется продолжительность сгорания φ_z как расстояние в град п. к. в. от начала сгорания до момента, при котором скорость сгорания $\frac{dx}{d\varphi}$ становится равной нулю.

Данные, полученные в результате обработки индикаторной диаграммы, достаточно полно характеризуют протекание рабочего процесса двигателя на исследуемом режиме.

Результаты обработки на ЭЦВМ «Минск-22» части индикаторной диаграммы дизельного двигателя, соответствующей периоду сгорание — расширение, представлены на рис. 3.

Л и т е р а т у р а

1. *Адамов В. М., Кухаренок Г. М.* Исследование теплопередачи в быстроходном дизеле. В сб.: «Машиностроение и металлообработка». Минск, 1966. 2. *Вибе И. И.* Новое о рабочем цикле двигателей. М., 1962. 3. *Самсонов Е. П.* Определение относительной скорости сгорания по индикаторной диаграмме. Тр. ЦНИДИ, вып. 42, 1961.