

УДК 621.431.74.068

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОГРАНИЧИТЕЛЬНОЙ ПО ТЕПЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Л.И. Ковальчук, И.Л. Алексеев

ФГБОУ ВПО «Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота»,
Россия, 236029, г. Калининград, ул. Молодежная, 6,
E-mail: rector@bga.gazinter.net.

Излагается методика расчета ограничительной по тепловой напряженности характеристики судовых дизелей. Сформулированы теоретические принципы, позволяющие на основе результатов стендовых испытаний двигателя рассчитать такую характеристику в каждом конкретном случае. Приведен пример расчета ограничительной характеристики определенного двигателя.

тепловая напряженность, ограничительная характеристика, алгоритм расчета, уравнение ограничительной характеристики

В зависимости от назначения и условий эксплуатации нагрузочные и скоростные режимы работы судовых дизелей изменяются в широких пределах. Однако с точки зрения тепловой напряженности длительная работа дизеля допустима не на всех возможных эксплуатационных режимах. Основная причина этого заключается в том, что в большинстве случаев переход форсированного дизеля на долевые режимы внешней скоростной характеристики номинальной мощности сопровождается ростом его теплонапряженности. Поэтому дизелестроительные заводы и фирмы в соответствии с особенностями дизеля и его назначением ограничивают область режимов, допустимых для длительной эксплуатации, установлением специальной ограниченной характеристики по тепловой напряженности. Эта характеристика соответствует режимам длительной работы двигателя при допустимых значениях всех параметров, характеризующих тепловую напряженность.

Устанавливая допустимые значения этих параметров при работе двигателя на пониженных частотах вращения коленчатого вала, обычно исходят из их уровня на номинальном режиме. Выполнение этого условия в процессе эксплуатации стало гарантией сохранения показателей надежности, заложенных в конструкцию двигателя при проектировании и изготовлении.

Наиболее достоверной ограничительной характеристикой по тепловой напряженности является постоянство и перепад температур в характерных точках деталей цилиндра. Однако непосредственное измерение возникающих в двигателе температур в эксплуатационных условиях производится крайне редко. Поэтому в процессе эксплуатации оценка тепловой напряженности двигателя осуществляется по ряду косвенных параметров, а в качестве ограничительной характеристики используются зависимости этих параметров от скоростного режима работы двигателя.

Следует отметить, что установленные таким образом ограничительные характеристики имеют практическую ценность лишь в тех случаях, если дают воз-

возможность обслуживающему персоналу осуществлять оперативную оценку уровня тепловой напряженности в эксплуатационных условиях. Поэтому указанные характеристики должны задаваться в функции таких параметров, которые доступны для контроля на работающем двигателе.

Согласно результатам экспериментальных исследований наиболее полно тепловое состояние деталей цилиндропоршневой группы характеризуется коэффициентом избытка воздуха при сгорании топлива [1, 2].

Ниже излагаются теоретические принципы расчета ограничительной по тепловой напряженности характеристики, позволяющей контролировать коэффициент избытка воздуха при сгорании, а следовательно, и уровень тепловой напряженности деталей цилиндра в судовых условиях на работающем двигателе по косвенным параметрам.

Совокупность свойств, заложенных в конструкцию двигателя в процессе проектирования и определяющих его способность с заданным качеством вырабатывать механическую энергию, будет характеризоваться полем режимов, допустимых для длительной эксплуатации. Под упомянутым полем понимается часть координатной плоскости $P_e - n$, ограниченная слева и справа вертикалями $n_{min} = const$ и $n_H = const$; сверху – верхней ограничительной характеристикой; снизу – нижней ограничительной характеристикой или координатной осью n . Очевидно, что ограниченное таким способом поле включает всю совокупность режимов, определяющих условия функционирования всех элементов цилиндропоршневой группы, т.е. компонентов, подверженных воздействию наибольших тепловых нагрузок.

Положение границ описанного поля определяется только свойствами двигателя и не зависит от особенностей потребителя энергии, т.е. оно обладает инвариантностью относительно возможных режимов работы двигателя. Следовательно, для оценки условий функционирования деталей цилиндропоршневой группы в исходном состоянии на основе входных в рабочий цилиндр и выходных из рабочего цилиндра параметров (информативные параметры) необходимо сформировать количественную структуру, которая во всех точках поля давала бы постоянное численное значение, т.е. обладала свойством инвариантности относительно возможных возмущений со стороны потребителя.

Положим, что в описанном поле контролируются параметры $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ рабочих процессов, протекающих в цилиндрах. Построим такую комбинацию этих параметров, которая во всех точках поля имела бы постоянное числовое значение:

$$f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n; x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0, \quad (1)$$

где – $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ – определяющие, или независимые, параметры; $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – определяемые параметры, или зависимые переменные.

В такой постановке задача сводится к установлению явного вида уравнения, выражающего взаимосвязь между входными и выходными информативными параметрами в поле возможных режимов работы двигателя. Поскольку эти взаимосвязи обусловлены механизмами рабочих процессов, то в общем случае они могут быть выражены разнообразными зависимостями.

Рассмотрим частный случай. Предположим, что взаимосвязь между информативными параметрами задана в виде степенного комплекса

$$a_1^{x_1} \cdot a_2^{x_2} \cdot a_3^{x_3} \dots a_n^{x_n} = Co. \quad (2)$$

Поскольку информативные параметры могут измеряться в различных единицах и меняться в различных диапазонах, с целью повышения устойчивости вычислительного процесса целесообразно их нормировать посредством деления текущих значений на номинальные, т.е. представлять в безразмерной форме:

$$\bar{a}_1 = \frac{a_1}{a_{1n}}; \bar{a}_2 = \frac{a_2}{a_{2n}}; \bar{a}_3 = \frac{a_3}{a_{3n}}; \dots \bar{a}_n = \frac{a_n}{a_{nn}}, \quad (3)$$

где индексом „н“ обозначены значения параметров, соответствующие номинальному режиму работы нового двигателя.

Применительно к (2) такое нормирование позволяет определить численное значение постоянной Co в правой части. Действительно,

$$\bar{a}_1^{x_1} \cdot \bar{a}_2^{x_2} \cdot \bar{a}_3^{x_3} \dots \bar{a}_n^{x_n} = 1,0, \quad (4)$$

поскольку номинал принадлежит полю возможных режимов работы двигателя и при любых показателях степени значение комплекса на этом режиме может быть равно только единице.

Если (4) представить в виде

$$x_1 \cdot \ln \bar{a}_1 + x_2 \cdot \ln \bar{a}_2 + x_3 \cdot \ln \bar{a}_3 + \dots + x_n \cdot \ln \bar{a}_n = 0, \quad (5)$$

то становится ясно, что комплекс (4) может быть образован из линейно зависящих функций. Только при этом условии могут существовать одновременно неравные нулю значения x_i , при которых возможно равенство (5).

Если учесть, что информационные параметры заданы с погрешностью, то в этом случае нетрудно оценить величину предельной невязки левой и правой частей (4):

$$\bar{a}_1^{x_1} \cdot \bar{a}_2^{x_2} \cdot \bar{a}_3^{x_3} \dots \bar{a}_n^{x_n} = 1,0 \pm (x_1 \delta \bar{a}_1 + x_2 \delta \bar{a}_2 + x_3 \delta \bar{a}_3 + \dots x_n \delta \bar{a}_n), \quad (6)$$

где $\delta \bar{a}_1, \delta \bar{a}_2, \delta \bar{a}_3, \dots, \delta \bar{a}_n$ – относительные погрешности измерения информативных параметров.

Непосредственно из (6) следует, что в условиях, когда информативные параметры измерены с погрешностями, стремление учесть как можно большее число определяющих факторов неизбежно сопровождается ростом величины суммарной погрешности.

Приближенное задание информативных параметров и приближенные вычисления над ними могут привести к изменению свойств отдельных функций и всей системы, которую они образуют. Другими словами, линейно зависящая система функций может стать линейно независимой и наоборот. По этой причине не-

обходимо располагать количественными признаками, позволяющими в каждом конкретном случае осуществлять контроль устойчивости вычислительного процесса и оценивать минимальное количество параметров, на основе которых возможно сформировать инвариантную количественную структуру типа (1).

Решение задачи упрощается в тех случаях, когда необходимо сформировать уравнения, описывающие поверхности, образованные последовательным смещением отрезка прямой линии или смещением отрезка монотонной кривой. В этих случаях минимальное количество параметров (координат), посредством которых может быть задано их положение, равно трем.

С учетом изложенных выше теоретических предпосылок расчет ограничительной по тепловой напряженности характеристики производится по нижеследующему алгоритму.

1. Наиболее подходящими исходными данными для расчета являются результаты стендовых испытаний нового двигателя по серии нагрузочных характеристик.

2. По соотношениям (3) осуществляется переход от абсолютных значений определяющих информативных параметров к относительным.

3. На основе графических представлений результатов стендовых испытаний двигателя для каждого скоростного режима устанавливается наличие закономерных взаимосвязей между входными и выходными определяющими параметрами, отобранными для построения ограничительной характеристики.

4. Выбирается явный вид функции, которой могут быть аппроксимированы взаимосвязи между определяющими параметрами по каждой нагрузочной характеристике, т.е. полиномами первого порядка $x_1 + x_2 \bar{a}_1 = \bar{a}_2$ - для поверхностей, образованных смещением отрезка прямой линии, и полиномом второго порядка $x_1 + x_2 \bar{a}_1 + x_3 \bar{a}_1^2 = \bar{a}_2$ - для поверхностей, образованных смещением отрезка монотонной кривой.

5. На основе явного вида зависимостей между входными и выходными определяющими параметрами для скоростного режима посредством графического представления устанавливаются закономерности изменения определяемых параметров в зависимости от частоты вращения коленчатого вала.

6. Производится выбор функций, которыми могут быть аппроксимированы закономерности изменения определяемых параметров в зависимости от частоты вращения $x_i = f(\bar{n})$.

7. Подстановкой $x_i = f(\bar{n})$ в зависимости для определения определяющих параметров заканчивается процесс формирования уравнения поверхности, которое используется для расчета ограничительной характеристики.

Практическую реализацию описанного алгоритма рассмотрим на конкретном примере.

В качестве исходной информации используем результаты стендовых испытаний двигателя ДРН 45/75 по серии нагрузочных характеристик. Для определения выражения ограничительной по тепловой напряженности характеристики принимаем следующие параметры: G_m – часовой расход топлива, кг/ч; t_g – температура отработавших газов на выходе из первого цилиндра, °C; n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹.

В последующих вычислениях будем использовать относительные значения параметров:

$$\bar{G}_m = \frac{G_m}{G_{mn}}; \bar{t}_g = \frac{t_g}{t_{gn}}; \bar{n} = \frac{n}{n_n} \quad (7)$$

На рис.1 дано графическое представление зависимостей $\bar{t}_g = f(\bar{G}_m)$ для каждого скоростного режима. В данном случае характер зависимостей $\bar{t}_g = f(\bar{G}_m)$ можно безошибочно определить по рис.1.

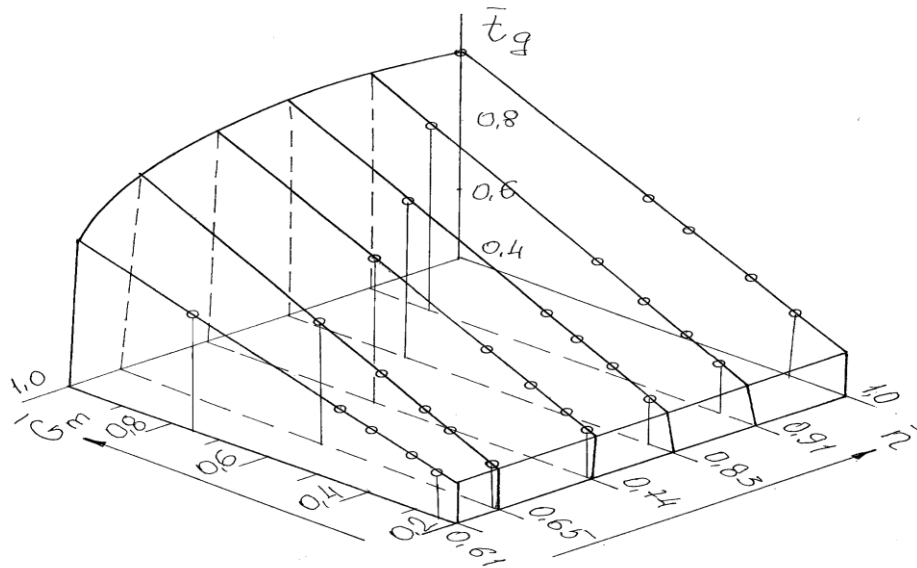


Рис. 1. Поверхность, образованная смещением зависимости $\bar{t}_g = f(\bar{G}_m)$

Fig. 1. The surface formed by the displacement depends $\bar{t}_g = f(\bar{G}_m)$

Каждая из них может быть аппроксимирована полиномом первого порядка

$$\bar{t}_g = x_1 \cdot \bar{G}_m + x_2, \quad (8)$$

а вся серия нагрузочных характеристик – системой следующих полиномов:

1. $\bar{t}_g = 0,6055 \cdot \bar{G}_m + 0,3925$ при $\bar{n} = 1,0$;
 2. $\bar{t}_g = 0,638 \cdot \bar{G}_m + 0,3742$ при $\bar{n} = 0,913$;
 3. $\bar{t}_g = 0,6732 \cdot \bar{G}_m + 0,3593$ при $\bar{n} = 0,826$;
 4. $\bar{t}_g = 0,713 \cdot \bar{G}_m + 0,3469$ при $\bar{n} = 0,739$;
 5. $\bar{t}_g = 0,7625 \cdot \bar{G}_m + 0,3319$ при $\bar{n} = 0,652$;
 6. $\bar{t}_g = 0,7714 \cdot \bar{G}_m + 0,3307$ при $\bar{n} = 0,609$.
- (9)

Система полиномов (9) позволяет выявить закономерности изменения определяемых параметров x_1 и x_2 в зависимости от частоты вращения - $x_1 = f(\bar{n})$ и $x_2 = f(\bar{n})$.

На рис. 2 дано графическое представление зависимостей $x_1 = f(\bar{n})$ и $x_2 = f(\bar{n})$. В данном случае они с высокой степенью достоверности могут быть аппроксимированы полиномами первого порядка

$$x_1 = 1,0422 - 0,4409 \cdot \bar{n} (R^2 = 0,9946); \quad x_2 = 0,2295 + 0,16 \cdot \bar{n} (R^2 = 0,9882). \quad (10)$$

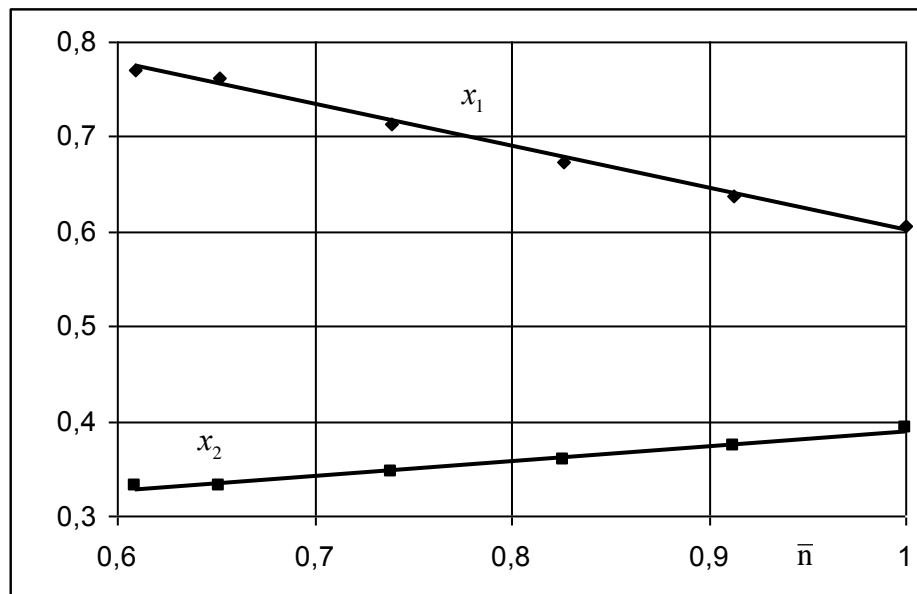


Рис. 2. Закономерности изменения параметров $x_1 = f(\bar{n})$ и $x_2 = f(\bar{n})$ в диапазоне от $\bar{n} = 1,0$ до $\bar{n} = 0,609$

Fig. 2. Parameters and patterns of change $x_1 = f(\bar{n}), x_2 = f(\bar{n})$ in the range of up $\bar{n} = 1.0$ to $\bar{n} = 0.609$

После подстановки (10) в (9) получим уравнение поверхности, образованной смещением отрезка прямой $\bar{t}_g = f(\bar{G}_m)$:

$$\bar{t}_{gp} = (-0,4409 \cdot \bar{n} + 1,0422) \cdot \bar{G}_m + (0,16 \cdot \bar{n} + 0,2295). \quad (11)$$

На рис. 3 представлено сопоставление опытных $\bar{t}_{g\text{э}}$ и расчетных значений \bar{t}_{gp} температуры обработавших газов, а на рис. 4 приведена гистограмма распределения погрешностей расчета по всему массиву исходных данных. Видно, что уравнение (11) воспроизводит опытные данные с погрешностью, не превышающей $\pm 1,5\%$.

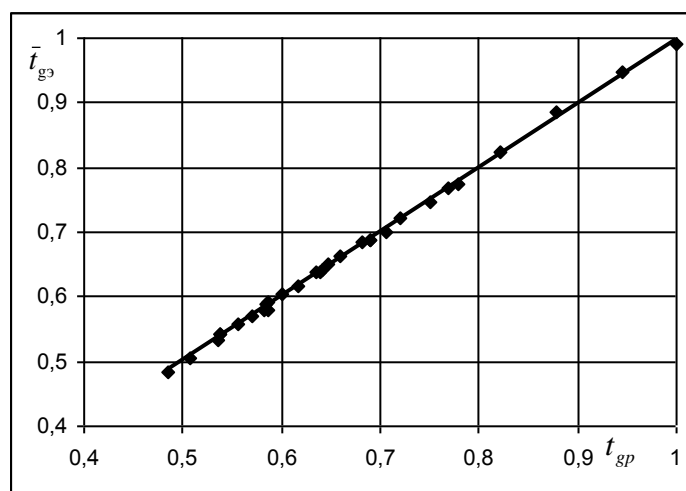


Рис. 3. Сопоставление опытных $\bar{t}_{gэ}$ и расчетных значений \bar{t}_{gp} температуры отработавших газов по всему массиву исходных данных
 Fig. 3. Comparison of experimental $\bar{t}_{gэ}$ and calculated values \bar{t}_{gp} of the temperature of the exhaust gas, the entire set of input data

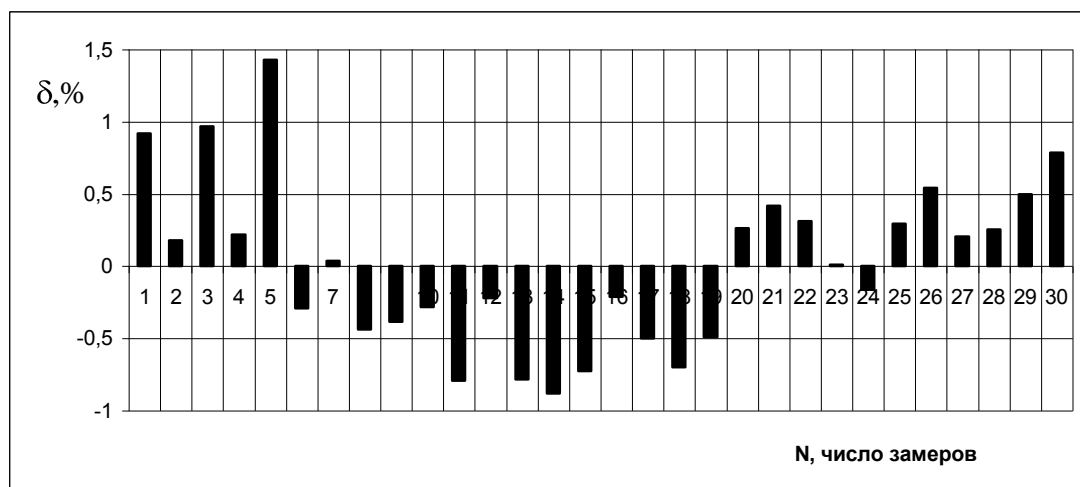


Рис. 4. Гистограмма распределения погрешностей расчета по всему массиву исходных данных
 Fig. 4. Frequency distribution of error in the calculation for the entire set initial data

Используя возможные тождественные соотношения

$$\bar{G}_m = \bar{g}_u \cdot \bar{n} = \frac{\bar{P}_{int}}{\bar{T}_{int}} \cdot \frac{\bar{\eta}_v}{\bar{\alpha}} \cdot \bar{n}, \quad (12)$$

уравнение (10) представим в виде

$$\bar{t}_{gp} = (-0,4409 \cdot \bar{n}^2 + 1,0422 \cdot \bar{n}) \cdot \frac{\bar{P}_{int}}{\bar{T}_{int}} \cdot \frac{\bar{\eta}_v}{\bar{\alpha}} + (0,16 \cdot \bar{n} + 0,2295). \quad (13)$$

Полагая в (13) $\frac{\bar{\eta}_v}{\bar{\alpha}} = 1,0$, получим уравнение ограничительной по тепловой напряженности характеристики

$$[\bar{t}_{gp}] = (-0,4409 \cdot \bar{n}^2 + 1,0422 \cdot \bar{n}) \cdot \frac{\bar{P}_{int}}{\bar{T}_{int}} + (0,16 \cdot \bar{n} + 0,2295). \quad (14)$$

По описанной выше методике уравнения типа (14) могут быть получены для каждого цилиндра конкретного двигателя и, следовательно, определены предельно допустимые величины температуры отработавших газов по цилиндрам, исключаяющие их тепловую перегрузку при наблюдаемых значениях параметров \bar{n} , \bar{P}_{int} и \bar{T}_{int} .

При практическом использовании уравнений типа (14) следует учитывать, что условием отсутствия тепловой перегрузки цилиндра является выполнение неравенства:

$$\bar{t}_{g3} \leq [\bar{t}_{gp}], \quad (15)$$

где \bar{t}_{g3} - замеренная относительная величина температуры отработанных газов на контролируемом режиме работы двигателя при тех же значениях параметров \bar{n} , \bar{P}_{int} , \bar{T}_{int} .

В заключение следует отметить, что при наличии технических средств оперативного контроля ограничительная по тепловой напряженности характеристика может быть определена на основании других информативных параметров. Например, на основании зависимости $P_{mi} = f(\bar{G}_m)$, где P_{mi} - относительное значение среднего индикаторного давления.

Ясно также, что характер зависимостей $P_{mi} = f(\bar{G}_m)$ и $x_i = f(\bar{n})$ не вносит принципиальных усложнений в методику расчета ограничительной характеристики и её практического использования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Методика выбора эксплуатационных режимов работы главных судовых дизелей с учетом характеристики гребного винта и условий плавания. - М.: В/О «Мортехинформреклама», 1985. - 16 с.

2. Иванов, Л.А. Теплонапряженность и эксплуатационная надежность цилиндропоршневой группы судового дизеля / Л.А. Иванов. – Мурманск: Мурманское книжное издательство, 1974. - 228с.

CALCULATION OF HEAT RESTRICTIVE STRENGTH CHARACTERISTICS MARINE DIESELS

L.I. Kovalchuk, I.L. Alekseev

The article describes the method of calculation of the restrictive characteristics of thermal stress on the components of diesel engines indirect parameters. Formulated theoretical principles to, based on the engine test bench to calculate the bounding response in each case. The example of calculation restrictive characteristics of the particular engine.

thermal tensions, restrictive characterization algorithm, the equation restrictive characteristics