

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.436.12

А. А. Иванченко,
д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

В. А. Макуров,
аспирант,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

И. А. Щенников,
аспирант,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

ВЫБОР МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА ПРИ ДОВОДКЕ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ С АККУМУЛЯТОРНОЙ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМОЙ

SELECTING A MATHEMATICAL MODEL FOR DESCRIBING CHARACTERISTICS OF THE FUEL BURNUP AT OPERATIONAL DEVELOPMENT MARINE DIESEL ENGINE WITH COMMON RAIL SYSTEM

В статье рассматривается описание моделей выгорания топлива, предложенное профессорами И. И. Вибе и Е. В. Лазаревым, на примере обработки индикаторной диаграммы судового дизеля 12ЧН18/20 с аккумуляторной топливной системой. На основе результатов обработки производится выбор модели выгорания топлива для настройки математической модели с целью дальнейших исследований и доводки рабочего процесса дизеля.

In the article they consider the description of fuel burning-out models, suggested prof. I. I. Wiebe and E. V. Lazarev, consideration of these model is happening on the example processing of 12ЧН18/20 marine diesel with Common Rail. The results of indicator diagram are used for selection of fuel burning-out model for mathematical model adjustment with a concern of further research and diesel engine operation development.

Ключевые слова: судовый дизель, модель выгорания топлива, индикаторная диаграмма, логарифмическая анаморфоза.

Key words: marine diesel, mode of the fuel burn, indicator diagram, logarithmic anamorphosis.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ моделирование рабочего процесса дизелей применяется на всех стадиях их жизненного цикла и позволяет значительно сократить трудоемкость процесса их разработки и доводки. При этом одним из наиболее сложных и недостаточно изученных процессов, протекающих в цилиндре, является процесс выгорания топлива в камере сгорания (КС) дизеля, что значительно усложняет решение задач моделирования.

Наиболее сложные математические модели сгорания включают детальное описание множества различных процессов, протекающих в КС. Так в работах [3; 7] рассматриваются движение струй топлива и воздушного заряда, их взаимное перемешивание, гидродинамические явления, процессы тепломассообмена, испарения, химической кинетики сгорания топлива и др. Раскрывая новые пути эффективной организации физических процессов, они остаются очень сложными в использовании. Настройка этих моделей на реальные объекты остается весьма трудоемкой задачей, для решения которой необходим большой объем экспериментальных данных, их тщательная обработка с последующим уточнением большого количества эмпирических коэффициентов и расчетных зависимостей.

$$\ln(1-x) = c \left(\frac{\varphi - \varphi_{\text{HC}}}{\varphi_\tau} \right)^{m+1} \quad (3)$$

и после преобразования и вторичного логарифмирования получают выражение

$$\lg \varphi = \frac{1}{(m+1)} \cdot \{ \lg [-2,303 \cdot \lg(1-x)] - \lg(-c) \} + \lg \varphi_z. \quad (4)$$

Уравнение (4) представляет собой уравнение прямой линии:

$$Y = \frac{1}{m+1} \cdot X + A, \quad (5)$$

где $Y = \lg \varphi$, $A = \lg \varphi_z$, $X = \lg \left[-2,303 \cdot \lg \left(\frac{1-x}{x_{\max}} \right) \right] - \lg(-c)$.

Уравнение (5) является интегральной характеристикой выгорания в логарифмических координатах, называемой также логарифмической анаморфозой процесса сгорания (см. рис. 2).

Зависимость (5) используется для непосредственного определения основных показателей характера сгорания m и φ_z при помощи уравнений:

$$m = \operatorname{ctg} \beta - 1 = \frac{B}{A} - 1, \quad (6)$$

$$\varphi_z = \exp(2,303 A). \quad (7)$$

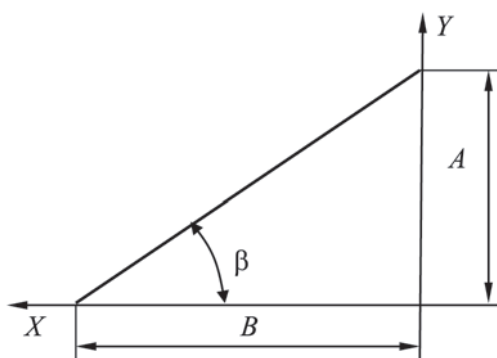


Рис. 2. Вид логарифмической анаморфозы для определения показателей процесса сгорания по формуле И. И. Вибе

Для достижения требуемой точности определения рассматриваемых параметров процесса сгорания применяется метод наименьших квадратов:

$$m = \frac{n \sum_{k=1}^n X^2 - \left(\sum_{k=1}^n X \right)^2}{n \sum_{k=1}^n XY - \sum_{k=1}^n X \sum_{k=1}^n Y} - 1, \quad (8)$$

$$A = \frac{n \sum_{k=1}^n Y - \frac{1}{m+1} \sum_{k=1}^n X}{n}, \quad (9)$$

где X , Y — координаты опытных точек логарифмической анаморфозы; n — число опытных точек.

Дифференциальная характеристика выгорания топлива во многих случаях, в частности в дизелях с объемно-пленочным смесеобразованием, имеет два максимума скорости выгорания. Природ первого максимума объясняется классическим механизмом сгорания подготовленной за период задержки самовоспламенения топливовоздушной смеси, позволяет применить для описа-

ния выгорания расслоенной топливоздушнoй смеси механизм формальной кинетики. Второй максимум скорости сгорания объясняется сгоранием испарившихся во фронте капель топлива, когда скорость кинетических реакций ограничивается скоростью диффузии реагирующих веществ. Для математического описания подобного процесса сгорания профессором Е. А. Лазаревым [4; 5] было предложено уравнение вида в интегральной форме:

$$x = \left(1 - \exp \left[c \left(\frac{\varphi}{\varphi_n} \right)^{(m_n - m_0)} \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^{(m_0 + 1)} \right] \right) \quad (10)$$

или в дифференциальной форме:

$$\frac{dx}{d\varphi} = \frac{-c \cdot (m + 1)}{\varphi_z} \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_n} \right)^{(m_n - m_0)} \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^{m_0} \cdot \exp \left[c \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_n} \right)^{(m_n - m_0)} \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^{m_0 + 1} \right]. \quad (11)$$

В выражениях (10), (11) характеристика выгорания описана с использованием четырех параметров: m_n и m_0 — показатели характера сгорания в начальном и основном периодах; φ_n , φ_z — продолжительность начального периода сгорания и процесса сгорания в целом.

При этом показатели процесса сгорания рекомендуют находить также с использованием логарифмической анаморфозы, выделяя на ней два участка, соответствующих кинетической и диффузионной фазам сгорания (см. рис. 3).

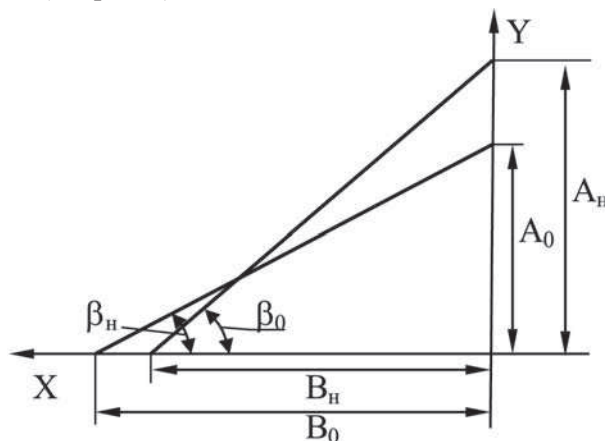


Рис. 3. Вид логарифмической анаморфозы для определения показателей процесса сгорания по формуле Е. А. Лазарева

Показатели характера процесса сгорания определяются из выражений:

$$m_n = \operatorname{ctg} \beta_n - 1 = \frac{B_n}{A_n} - 1, \quad (12)$$

$$m_0 = \operatorname{ctg} \beta_0 - 1 = \frac{B_0}{A_0} - 1 \quad (13)$$

или методом наименьших квадратов по формулам (8) и (9) с учетом числа опытных точек для кинетического и диффузионного участков логарифмической анаморфозы. Условная продолжительность начального периода определяется из выражения $\varphi_{zn} = \exp(2,303A_n)$, общая продолжительность процесса сгорания — $\varphi_z = \exp(2,303A_0)$. Действительная продолжительность начального периода φ_n составит

$$\varphi_n = \left(\frac{\varphi_{zn}^{m_n + 1}}{\varphi_z^{m_0 + 1}} \right)^{\frac{1}{m_n - m_0}}. \quad (14)$$

Рассмотренные закономерности описания характеристики выгорания топлива были проанализированы с точки зрения оценки возможности их использования в математической модели рабочего цикла опытного судового дизеля 12ЧН18/20 с аккумуляторной топливной системой.

Расчетно-теоретическим исследованиям предшествовали испытания опытного дизеля 12ЧН18/20 на стенде завода-изготовителя ОАО «Звезда» с индицированием его рабочего процесса. На первом этапе исследования проводились на номинальном режиме при угле опережения впрыска топлива $\varphi_{оп} = -23^\circ$ ПКВ и давлении в топливном аккумуляторе $p_{\phi} = 950$ кг/см². Для получения реальных характеристик выгорания топлива использовалась хорошо всем известная методика обработки индикаторных диаграмм ЦНИДИ. Точность индицирования рабочего процесса составляла $0,186^\circ$ ПКВ на одно измерение. Колебания давления газа в цилиндре, полученные в результате установки датчика в индикаторном канале, устранялись усреднением по 10 ближайшим точкам с последующим математическим сглаживанием полиномами 2-й или 3-й степени. Снятию индикаторных диаграмм предшествовала во всех случаях корректировка положения ВМТ и тарировка датчиков. Пример снятой индикаторной диаграммы представлен на рис. 4.

Экспериментальные и расчетные характеристики выгорания на основе обработки индикаторной диаграммы представлены на рис. 5. При построении расчетных характеристик учитывались рекомендации работы [4], направленные на повышение точности расчетов. На рисунке прерывистой линией обозначены значения, непосредственно полученные при обработке индикаторной диаграммы.

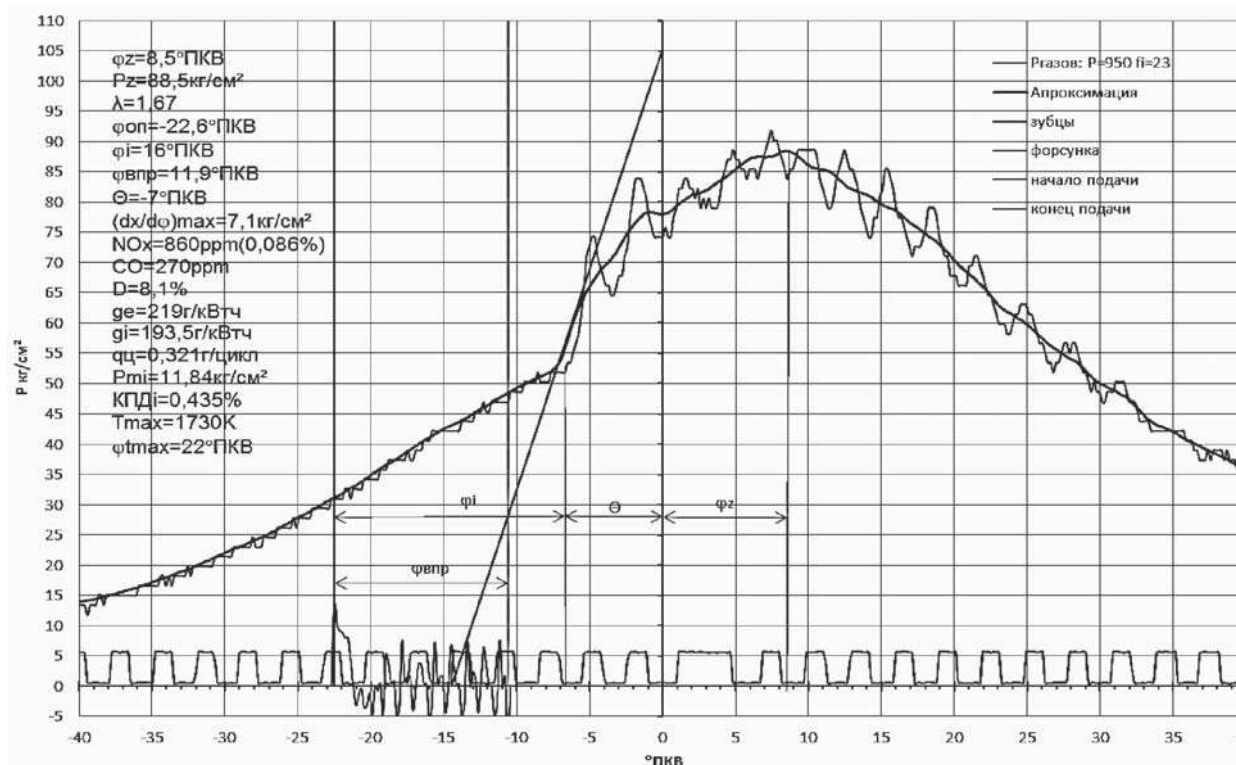


Рис. 4. Пример полученной индикаторной диаграммы

Анализ результатов обработки индикаторных диаграмм и расчетных данных позволяет сделать вывод, что полуэмпирическая характеристика выгорания топлива с двумя максимумами тепловыделения более качественно описывает процессы, происходящие в цилиндре дизеля в случае применения аккумуляторной топливной системы.

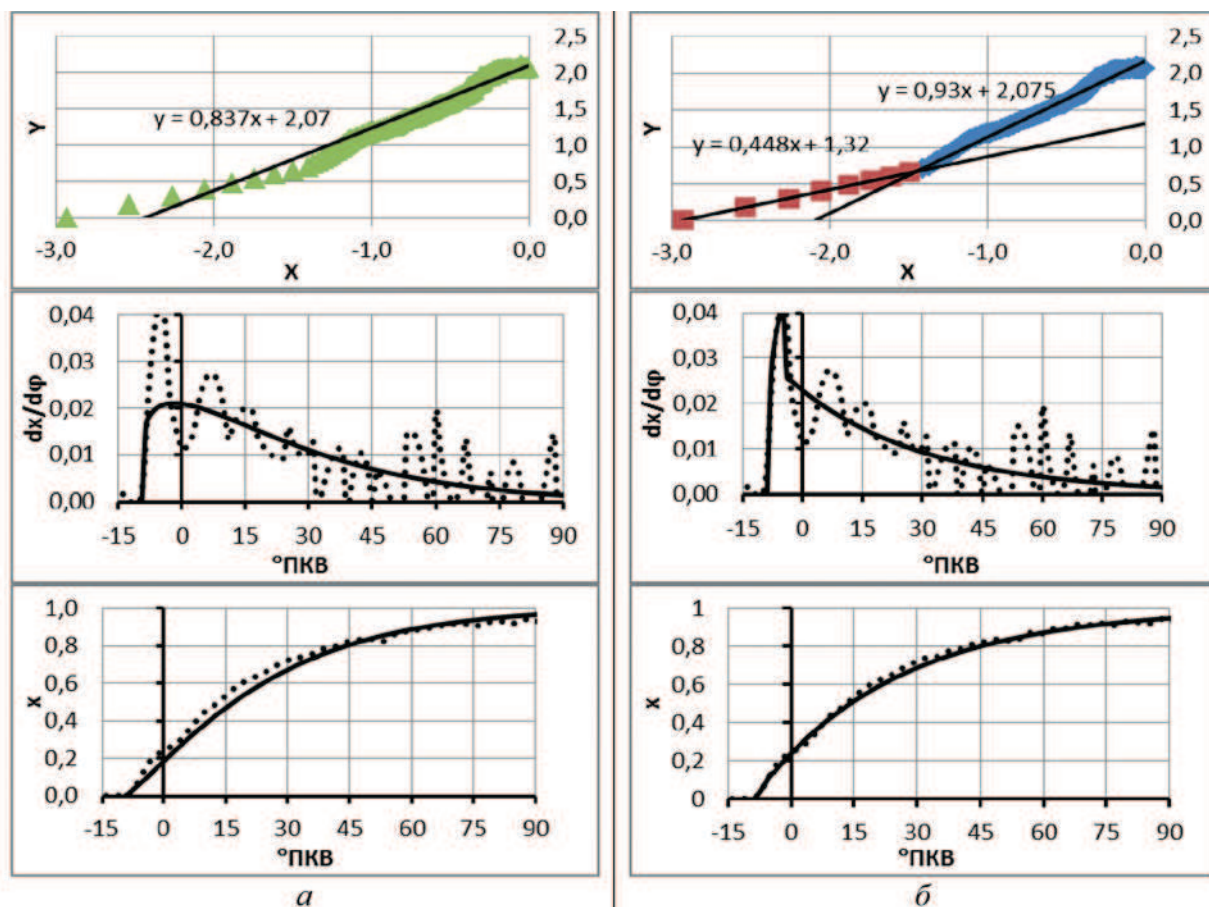


Рис. 5. Результаты расчетно-экспериментальных исследований выгорания топлива:

- a* — описание выгорания топлива по уравнениям (1), (2);
б — описание выгорания топлива по уравнениям (10), (11)

Однако модели такого типа пока не позволяют проводить весь комплекс исследования характеристик опытного двигателя, так как это требует определенного объема экспериментальных данных. Построение моделей в случае недостаточной выборки влечет за собой погрешности превышающие погрешности, вносимые моделью, предложенной в работе [1]. Поэтому, несмотря на неточности в описании характеристики выгорания топлива и присутствующей погрешности, при последующем расчете рабочего процесса, полуэмпирическая модель выгорания топлива, предложенная профессором И. И. Вибе, позволяет с приемлемой точностью моделировать эксплуатационные режимы дизеля, в том числе с целью его доводки. Вносимые при этом погрешности будут компенсироваться простотой модели и доступностью данных для ее настройки. Показатели описания процесса сгорания с использованием зависимостей И. И. Вибе для решения указанных задач применительно к опытному судовому дизелю во всем диапазоне режимов работы и прогнозирование его параметров при модернизации могут быть найдены по зависимостям Г. Воши [8].

Таким образом, использование рассмотренных в настоящей работе аспектов математического моделирования рабочего процесса позволяет с достаточной для практики точностью прогнозировать эксплуатационные характеристики судовых дизелей. Выбранная модель выгорания топлива адаптирована для исследований и доводки опытного судового дизеля 12ЧН18/20 с аккумуляторной топливной системой.

Список литературы

1. Вибе И. И. Новое о рабочем цикле двигателей / И. И. Вибе. — М.; Свердловск: Машгиз, 1962. — 272 с.
2. Дьяченко Н. Х. Теория двигателей внутреннего сгорания / Н. Х. Дьяченко, А. К. Костин, Г. П. Пугачев — Л.: Машиностроение, 1974. — 552 с.
3. Кулешов А. С. Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания / А. С. Кулешов, Л. В. Грехов. — М.: МГТУ, 2000. — 64 с.
4. Лазарев Е. А. Определение параметров процесса сгорания топлива по результатам анализа индикаторной диаграммы давления газов в цилиндре дизеля / Е. А. Лазарев, В. Е. Лазарев // Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. — Челябинск, 2006.
5. Лазарев Е. А. Совершенствование моделирования закономерностей выгорания топлива в дизеле / Е. А. Лазарев // Двигателестроение. — 1985. — № 12.
6. Разлейцев Н. Ф. Моделирование и оптимизации процесса сгорания в дизелях / Н. Ф. Разлейцев. — Харьков: Высш. шк.: Изд-во при Харьков. ун-те, 1980. — 169 с.
7. Tabulated Chemical Kinetics for Efficient and Detailed Simulations of Diesel Engine Combustion PROEFSCHRIFT / С. Bekdemir. — Amsterdam: Technische Universiteit Eindhoven, 2012. — 113 p.
8. Woschi G. Eine Methode zur Vorausberechnung der Anderung des Brennverlaufes mittel schnelllaufender Diesel motor Betriebsbedingungen / G. Woschi, F. Anisits // MTZ. — 1973. — № 34.

УДК 621.311:629.12

С. Е. Кузнецов,
д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

О. О. Башкирев,
аспирант,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СУДНА “PRINS DER NEDERLANDEN” С ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

RELIABILITY OF ELECTRIC POWER SUPPLY IN DIFFERENT OPERATION MODES OF THE VESSEL “PRINS DER NEDERLANDEN” WITH HIGH-VOLTAGE ELECTRIC POWER INSTALLATION

В статье рассматриваются вопросы анализа показателей безотказности электроснабжения в характерных режимах работы судна с высоковольтной СЭЭС (6,6 кВ) применительно к электроснабжению АРЦ, рассматриваются два возможных вида нарушения электроснабжения: обесточивание при отказе и невозможность питания за установленное время при отказе. На основе справочных данных по интенсивностям отказов элементов судовой электростанции выполняется расчет вероятности безотказной работы P (1000 ч), интенсивности отказов (λ) и средней наработки на отказ T методом гипотез о возможных состояниях цепей электроснабжения АРЦ. Производится сравнительный анализ показателей надежности в рассматриваемых режимах.