

УДК 621.431.74

В.В. Капустин, профессор, д-р техн. наук,

В.А. Очеретяный, доцент, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ НА ЧАСТИЧНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ

Предложена автоматизированная обучающая система, содержащая математическую модель и методику изменения параметров рабочего процесса судового дизеля по результатам сравнительной оценки работы последнего на различных режимах нагружения. Полученные соотношения позволяют исследователю путем аппроксимации ввести корректировку параметров работы дизеля на различных режимах.

Ключевые слова: модель, дизель, тренажер, режимы, экологичность.

Введение. Для контроля знаний и совершенствования оперативного мышления исследователя при решении задач, связанных с быстротекущими процессами, например, при эксплуатации судовых дизелей, разработана автоматизированная обучающая система (АОС) для тестирования обучающихся, в дальнейшем именуемая “Компьютерный тренажер” (КТ) [1].

В разработанном КТ реализованы следующие задачи, вытекающие из требований конвенции ПДНВ:

- проверка знаний и оценка процессов, происходящих в дизелях и влиянии изменяемых параметров на характеристики рабочего процесса (управляющее воздействие);
- применение вычислительной техники при решении задач, связанных с эксплуатацией судового дизеля;
- применение методов численного анализа для получения оценочных характеристик работы теплового двигателя
- отработка умений и навыков оперативной оценки изменения параметров рабочего процесса дизеля на переходных режимах (информационное воздействие)
- использование полученной информации для ее обработки с помощью вычислительной техники;
- анализа диагностических параметров и прогнозирование изменения качества рабочего процесса судового дизеля [2, 3].

Базой разработанного КТ является математическое описание физических процессов, протекающих при работе дизеля. КТ позволяет, в сравнении с существующими (например, описанным в [3]), получать не только параметры рабочего процесса дизеля в графическом и табулированном видах, но и в диалоговом режиме «исследователь – компьютер» определять дополнительные показатели работы дизеля (жесткость, экологичность и др.).

Компьютерный тренажер реализован в системе Excel+VBA [4]. Visual Basic for Application (VBA) является стандартным макро-языком написания сценариев для приложений Microsoft. Являясь базой объектов анализа данных (рабочих листов, диаграмм, сводных таблиц, сценариев, а также многочисленных математических стандартных и создаваемых функций и алгоритмов) EXCEL позволил VBA работать с этими объектами, формировать и модифицировать автоматизированные процедуры, необходимые при разработке описываемого тренажера.

Описание математической модели тренажера. Рабочий процесс дизеля представляет собой совокупность сложных физико-химических и газодинамических процессов, в результате которых тепловая энергия газов сгоревшего в цилиндре топлива преобразуется в механическую энергию. Рабочий процесс устанавливает взаимосвязь между основными технико-эксплуатационными характеристиками двигателя: конструктивными параметрами, мощностью, коэффициентом полезного действия и режимными показателями.

При реализации задачи использована математическая модель, устанавливающая связь между отдельными фазами тепломассопередачи [5]. Численное моделирование рабочего процесса дизеля представляет собой воспроизведение текущих параметров, количества и состава рабочего тела в цилиндре путем непрерывного решения на ЭВМ при заданных начальных условиях системы уравнений, описывающих рабочий процесс.

Алгоритм расчета предусматривает получение параметров как номинального, так и заданных частичных режимов работы дизеля.

В качестве базовой модели математического описания работы ДВС принята следующая система уравнений [6]:

$$(\dot{c}_v' \cdot G' + \dot{c}_v'' \cdot G'') \cdot \dot{T} + u' \cdot \dot{G}' + u'' \cdot \dot{G}'' = Q_H \cdot q \cdot \dot{x} + \dot{Q}_w + ; \quad (1)$$

$$+ i_n \cdot \dot{G}_n - \pi \cdot 180^{-1} \cdot D^2 \cdot S \cdot h \cdot p - i_m \cdot \dot{G}_m)$$

$$\dot{G}' = r_n' \cdot \dot{G}_n - r_m' \cdot \dot{G}_m - L_0 \cdot \dot{x} \cdot q ; \quad (2)$$

$$\dot{G}'' = r_n'' \cdot \dot{G}_n - r_m'' \cdot \dot{G}_m - (L_0 + 1) \cdot \dot{x} \cdot q ; \quad (3)$$

$$p = k_1 \cdot T \cdot \epsilon_x^{-1} \cdot (G' + G'') . \quad (4)$$

В уравнениях обозначено: p , T , u , i – давление (МПа), температура (К), удельная внутренняя энергия (кДж/кг), удельная энтальпия (кДж/кг) смеси в цилиндре. Значком (') – обозначены параметры чистого воздуха, значком (") – параметры чистых продуктов сгорания, значком (·) – производная параметра по углу поворота коленчатого вала (ϕ , °пкв); $\dot{c}_v'$, G' , r' и $\dot{c}_v''$, G'' , r'' – удельная теплоемкость (кДж/(кг·°C)), масса (кг), массовая доля чистого воздуха и чистых продуктов сгорания в смеси соответственно. Параметрам газа перед органами впуска присвоен индекс n , перед органами выпуска – индекс m ; D , S – диаметр цилиндра и ход поршня (м); $h = ds/d\phi$ – относительная скорость поршня; ϵ_x – текущая степень сжатия, L_0 – теоретическое количество воздуха для сгорания; $k_1 = 10^{-4} \cdot R \cdot V_C$, где R – газовая постоянная, кг·м/(кг·°C); q – цикловая подача топлива, кг/цикл; $dx/d\phi$ – относительная скорость сгорания топлива.

Левая часть уравнения (1) отражает обобщенную скорость изменения внутренней энергии рабочего тела в цилиндре за счет изменения температуры смеси, количества чистого воздуха и чистых продуктов сгорания. В правой части представлена обобщенная скорость передачи теплоты за счет сгорания топлива, теплообмена, работы перемещения поршня, приращения энтальпии и убыли ее при газообмене. Уравнение (1) выражает собой закон сохранения энергии. Уравнения (2) и (3) представляют скорость изменения количества чистого воздуха и чистых продуктов сгорания в цилиндре за счет газообмена и сгорания топлива на основании уравнений массового баланса. Уравнение (4) отражает состояние рабочего тела в цилиндре в произвольный момент времени. Система уравнений (1), (2), (3), (4) описывает рабочий процесс реального истечения газов и продувки цилиндра.

Система уравнений (1) – (4) не устанавливает явную зависимость между давлением, температурой газов и углом поворота коленчатого вала дизеля, однако позволяет определить изменение этих параметров при повороте кривошипа не более, чем на 2 °пкв.

Описание индикаторного процесса как единой совокупности взаимосвязанных процессов, протекающих в цилиндре дизеля, позволяет провести его численное моделирование на ЭВМ. Получение параметров рабочего процесса на базе реализуемого алгоритма открывает возможность более глубокого представления о процессах, протекающих в цилиндрах дизеля, а благодаря измеряемости структурных элементов модели позволяет с достаточной точностью определить взаимодействие различных факторов.

Алгоритм расчета предусматривает последовательный расчет рабочего процесса дизеля. После ввода исходных данных осуществляется контроль правильности их ввода, затем рассчитываются: объем камеры сжатия и объем, описываемый за полных ход (перемещение) поршня в цилиндре (V_C , V_S); средняя скорость поршня (v_m); количество теплоты, выделяющееся при сгорании топлива (Q_m). Далее определяются параметры рабочего тела к началу сжатия: объем V_D ; температура (T_D); давление (p_D); масса газов (G_D); коэффициент избытка воздуха (α); доля потеряннного хода поршня (ψ_D) на закрытие окон, после чего начинается сжатие. Моделирование индикаторного процесса в цилиндре начинается от угла ϕ_D , соответствующего началу сжатия при закрытых окнах (клапанах).

При этом после каждого шага определяются значения теплоемкостей $\dot{c}_v'$, $\dot{c}_v''$; объема V , коэффициент теплоотдачи от газов к стенке α_r , текущую поверхность теплообмена цилиндра F , количество теплоты, которой обменивается газовая смесь со стенками рабочего цилиндра dQ_w , долю выгоревшего топлива x , изменение доли выгоревшего топлива $dx/d\phi$, удельных энергий u' , u'' , температуры T . При достижении угла опережения впрыска топлива θ определяются значения давление в момент подачи топлива p_{en} , температура газов в момент подачи топлива T_{en} , показательная характеристика сгорания m , продолжительность тепловыделения ϕ_Z .

После открытия выпускных органов газораспределения расчет индикаторного процесса заканчивается определением основных показателей: цилиндрического индикаторного давления p_i , среднего за один цикл индикаторного давления p_m , удельного индикаторного расхода топлива b_i , индикаторного КПД η_i . В случае отклонения расчетных значений давлений (p_m , p_Z) от контрольных (Δp_m , Δp_Z) на

величины, большие чем константы сходимости $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, происходит автоматическая корректировка значения условного угла выпуска и угла опережения выпуска до выполнения условий $|\Delta p_m| \leq \varepsilon_1$ и $|\Delta p_z| \leq \varepsilon_2$.

Расчет будет повторен необходимое число раз до удовлетворения условиям сходимости. Величина констант $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ задается с отклонением (1...3) %.

Для численного интегрирования системы дифференциальных уравнений в программе использован метод Рунге-Кутты четвертого порядка [7], позволяющий по заданной начальной точке (φ_d, T_d) интегральной кривой и производной искомой функции в начальной точке определить значение температуры в следующей точке.

В результате решения системы дифференциальных уравнений первого порядка по углу п.к.в. находится интеграл функции $T = f(\varphi)$, а с учетом уравнения состояния и изменение давления $p = p(\varphi)$, имеем индикаторную диаграмму, развернутую по углу поворота коленчатого вала (рисунок 1).

Основным информационным показателем, служащим для оценки совершенства рабочего процесса, протекающего в цилиндре дизеля, является индикаторная диаграмма. По индикаторной диаграмме можно получить среднее индикаторное давление P_i , давление сжатия P_c , максимальное давление сгорания P_z , скорость нарастания давления $\omega = \Delta p / \Delta \varphi$, характеристики тепловыделения в цилиндре дизеля, продолжительность тепловыделения, температуру газов в цилиндре и другие параметры.

В ходе реализации модели могут быть получены результаты расчета как в табличном виде, так и в графическом. Анализ результатов моделирования, как правило, начинают с определения основных периодов протекания рабочего процесса, выделяя при этом: конец газообмена, сжатие, впрыск топлива и его сгорание.

Руководствуясь полученными характеристиками давления и температуры, устанавливают условные границы основных фаз сгорания и оценивают качество процесса сгорания, в частности, от начала видимого сгорания до момента достижения максимального давления цикла. Соотношение $\Delta p / \Delta \varphi$ – характеризует жесткость рабочего процесса, для оценки которого используется средняя ω_{cp} и максимальная ω_{max} скорости нарастания давления и степень повышения давления λ_p .

$$\omega_{cp} = (\Delta p / \Delta \varphi)_{cp} = (p_z - p_c) / (\varphi_z - \varphi_c) = \operatorname{tg} \alpha_c, \quad (5)$$

где Δp – приращение давления в цилиндре за угол $\Delta \varphi$, соответствующий продолжительности процесса сгорания, МПа; p_c – давление сжатия в момент воспламенения топлива, МПа; $\operatorname{tg} \alpha$ – тангенс угла наклона прямой, проходящей через точки p_z и p_c .

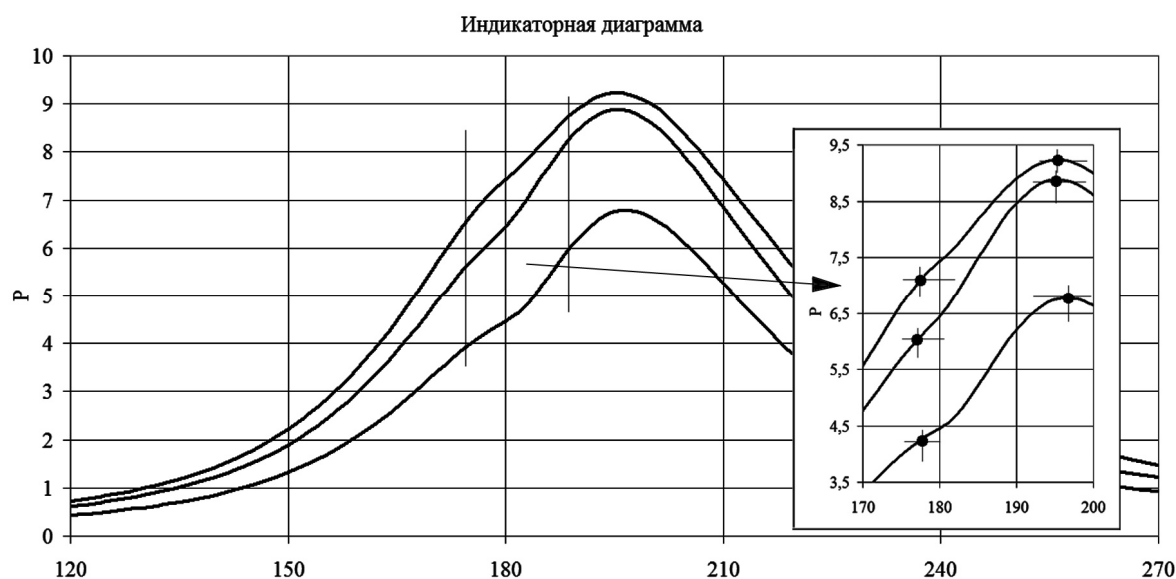


Рисунок 1 – Полученная развернутая индикаторная диаграмма работы дизеля и ее исследуемая часть для анализа скорости нарастания давления (для трех режимов нагружения)

Максимальная скорость нарастания давления при сгорании определяется как первая производная изменения давления по углу поворота вала на наиболее крутом участке повышения давления в цилиндре в процессе сгорания, что косвенно определяет надежность работы дизеля. В ходе выполнения задачи вводятся исходные данные; производится тепловой расчет дизеля при стандартных (нормальных) условиях и далее выполняются расчеты дизеля для долевых режимов.

Рассматриваемая модель позволяет также оценить экологичность путем сравнения изменений объемов образования NO_x в цилиндре.

Качественную оценку объема вредных выбросов дают области диаграммы, расположенные выше температуры 1500 К (рисунок 2), отражающей зависимость температуры цикла от угла поворота коленчатого вала. На рисунке 2 цифрами обозначены температурные зависимости для различных режимов работы. Количественную оценку можно получить путем сравнения площадей вышеуказанной диаграммы для различных режимов работы дизеля.

Для анализа объемов вредных выбросов оценивается изменение количества NO_x в сравнении с объемом вредных выбросов на номинальном режиме работы, принимаемым за 100 %. Это соответствует площади $S_{\text{ном}}$ диаграммы $f = T(\varphi)$, находящейся в области высоких температур (более 1500 К). Определять объемы выбросов NO_x предлагается по формуле (6):

$$\text{NO}_{x(i)} = (S_i / S_{\text{НОМ}}) \cdot 100\%, \quad (6),$$

где NO , NO_2 , NO_3 – окислы азота; соответственно $S_{\text{НОМ}}$ и S_i – номинальный и долевые режимы как отношение выделенных площадей диаграммы $T_i = f(\varphi)$.

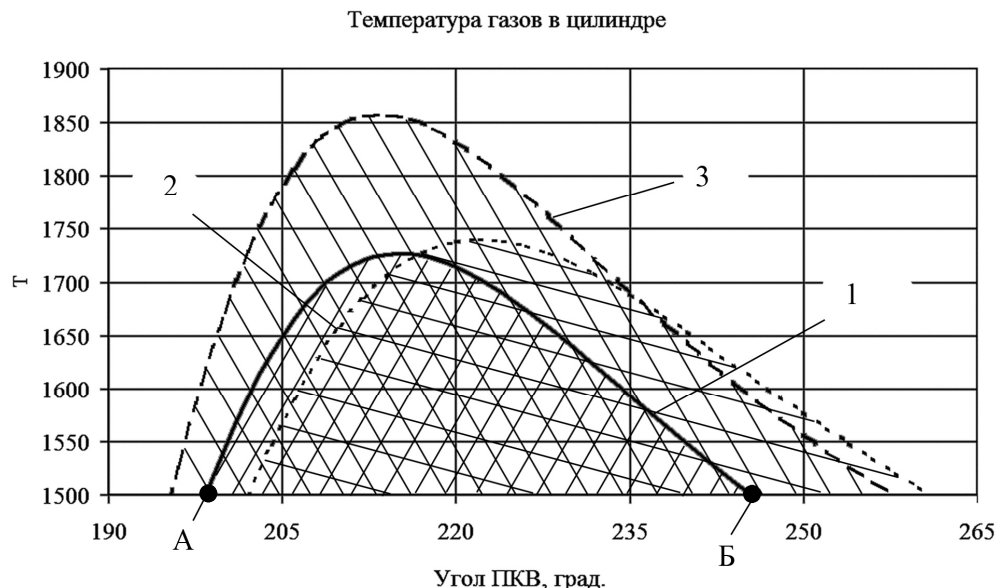


Рисунок 2 – Изменение температуры газа в цилиндре дизеля (область более 1500 К)

Выводы

Представленная модель расчета параметров рабочего процесса судового дизеля позволяет выполнить сравнительный анализ надежности его работы на различных режимах нагружения, а предложенный метод позволяет выбрать наиболее предпочтительный режим вхождения судна в особый район, контролируемый по выбросам окислов азота.

Дальнейшее развитие тренажера предполагается в расширении основной модели тренажера в сторону добавления анализа теплонапряженности основных элементов цилиндропоршневой группы дизеля.

Библиографический список использованной литературы

1. Управление рабочим процессом судового дизеля. Метод. указания к проведению тренажерного занятия / СевНТУ, сост. В.В. Капустин, В.А. Очеретяный. — Севастополь: СевНТУ, 2007. — 22 с.
2. Кудинов Д.Н. Перспективы разработки автоматизированных обучающих систем / Кудинов Д.Н. // Современные проблемы науки и образования. — 2008. — № 6 — С. 46–50 [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные (168542 bytes). — Режим доступа: www.science-education.ru/30-1136 Monday, 28 July 2011 14:07:02.

3. Лукашин В.Н. Двигатели внутреннего сгорания. В 3-х кн. Кн. 3. Компьютерный практикум. Моделирование процессов в ДВС // В.Н. Лукашин, М.Г. Шатров, Т.Ю. Кричевская. — М.: Высш. шк., 2007. — 414 с.
4. Уокенбах Д. Профессиональное программирование на VBA в Excel 2002 / Д. Уокенбах. — М.: Вильямс, 2003. — 784 с.
5. Лаханин В.В. Моделирование процессов в судовых поршневых двигателях и машинах / В.В. Лаханин, О.Н. Лебедев, В.С. Семенов. — Л.: Судостроение, 1967. — 272 с.
6. Дизели. Справочник / В.В. Ваншейдт [и др.]. — М.: Машиностроение, 1977. — 480 с.
7. Заварыкин В.М. Численные методы / В.М. Заварыкин, В.Г. Житомирский, М.П. Лапчик. — М.: Просвещение, 1990. — 176 с.

Поступила в редакцию 24.02.2012 г.

Капустін В.В., Очеретяний В.О. Чисельний аналіз параметрів робочого процесу суднового дизеля на часткових режимах навантаження

Запропоновано автоматизовану навчальну систему, яка містить математичну модель і методику зміни параметрів робочого процесу суднового дизеля за результатами порівняльного оцінювання роботи останнього на різних режимах навантаження. Отримані співвідношення дозволяють досліднику шляхом апроксимації ввести коригування параметрів роботи дизеля на різних режимах.

Ключові слова: модель, дизель, тренажер, режим, екологічність.

Kapustin V.V., Ocheretyaniy V.A. Numerical analysis of the parameters of the working process for marine engine for partial load conditions

We propose an automated learning system that contains a mathematical model and methodology for changing the parameters of the workflow based on marine diesel comparative assessment of the latter on the different load conditions. The relations obtained allow the researcher to enter a correction by setting the parameters of the diesel at different conditions.

Keywords: model, diesel, simulator, condition, environmental.