

## ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 621.436:629.5:658.511.3.001.57

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В СИСТЕМЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ D4.0H

*Ивановский В.Г., Варбанец Р.А.,  
Одесский национальный морской университет*

*Расчетный модуль диагностической системы DEPAS D4.0H позволяет моделировать рабочий процесс в цилиндре судового дизеля на основном и частичных эксплуатационных режимах. Целью моделирования рабочего процесса является оценка резерва нагрузки двигателя и оценки тепловой и механической напряженностей. Важной задачей моделирования рабочего процесса является уточнение расхода топлива на текущем эксплуатационном режиме и его прогнозирование при изменении настроек топливной аппаратуры и механизма газораспределения. В статье рассматриваются некоторые возможности расчетного модуля: изменение закона тепловыделения в цилиндре, анализ удельной работы цикла, вариации коэффициента теплоотдачи и энергетический баланс, согласно 1-му закону термодинамики.*

*Ключевые слова: судовой двигатель внутреннего сгорания (СДВС), рабочий процесс, топливная аппаратура (ТА), механизм газораспределения (МГР), тепловыделение, внутренняя энергия газа, коэффициент теплоотдачи.*

**Введение.** Целями моделирования рабочего процесса являются: оценка резерва нагрузки двигателя, путем контроля среднего индикаторного давления (индикаторной мощности) и оценка тепловой и механической нагрузок, путем контроля ряда параметров рабочего процесса. Важной задачей моделирования рабочего процесса является уточнение расхода топлива на текущем эксплуатационном режиме и его прогнозирование при изменении настроек топливной аппаратуры и механизма газораспределения. Сравнение расчетных и фактических значений параметров рабочего процесса на эксплуатационном режиме позволяет диагностировать основные узлы цилиндропоршневой группы (ЦПГ), ТА и МГР.

**Актуальность проблемы** эксплуатационного мониторинга рабочего процесса и его моделирования диктуется все более жесткими экономическими и экологическими требованиями эксплуатации судовых ДВС [1].

Существующие модели рабочего процесса ДВС позволяют осуществлять многофакторный анализ эксплуатационных режимов и решать оптимизационные задачи [2]. Тем не менее, можно утверждать, что в условиях эксплуатации математическая модель рабочего процесса на базе выбранного закона тепловыделения может быть адекватна лишь в том случае, если имеется возможность уточнения ряда входящих в нее эмпирических коэффициентов. Это касается коэффициентов теплоотдачи,

коэффициента остаточных газов, средних условных температур стенок цилиндров, крышек и поршней.

### 1. Коррекция эмпирических коэффициентов.

Разумеется, непосредственная оценка многих, задаваемых при моделировании рабочего процесса эмпирических коэффициентов, во время эксплуатации невозможна. Однако всегда есть возможность их коррекции исходя из того, что на эксплуатационном режиме можно с достаточной точностью определить несколько основных параметров: максимальные давления сгорания (в некоторых случаях – сжатия) в цилиндре, температуры выпускных газов, давление надувочного воздуха, частоту вращения ротора турбонагнетателя.

С помощью методов оптимизации можно подобрать такие значения эмпирических коэффициентов, чтобы добиться совпадения экспериментальных и расчетных данных в основных контрольных точках. В этом случае минимизируется функционал, составленный согласно требованиям МНК, а в качестве свободных переменных выбирается один или несколько искомым эмпирических коэффициентов [3].

Часто во время эксплуатации СДВС осложнено непосредственное измерение максимального давления сжатия либо давления наддува (одно из них должно быть известно с достаточной точностью). В этом случае удобно пользоваться следующими соотношениями:

$$Pa = Pc / \varepsilon^{n1}, \quad (1)$$

где  $Pa = (1.0 + P_s) \xi_a$ ;  $Pc$  – максимальное давление сжатия;  $\varepsilon$  – степень сжатия;  $n1$  – показатель политропы сжатия (выбирается для МОД, СОД и ВОД согласно рекомендациям [4 Ваншейдт];  $P_s$  – избыточное (манометрическое) давление в надувочном ресивере;  $\xi_a$  – коэффициент потерь давления на впускных органах ( $\xi_a \approx 1$  для 4-тактных СДВС,  $\xi_a = 0.93 \div 0.98$  для 2-тактных МОД с впуском через окна).

С помощью (1) можно с инженерной точностью определять один из трех базовых параметров  $Pc$ ,  $P_s$ ,  $\varepsilon$ , при известных двух других.

### 2. Выбор закона тепловыделения.

Математическая модель рабочего процесса в цилиндре СДВС базируется на 1-м законе термодинамики:

$$dQx = dU + pdV + dQw, \quad (1)$$

где  $dQx$  – теплота, выделенная при сгорании топлива;  $pdV$  – работа цикла;  $dU$  – изменение внутренней энергии рабочего тела;  $dQw$  – энергия, переданная в виде тепла через стенки цилиндра.

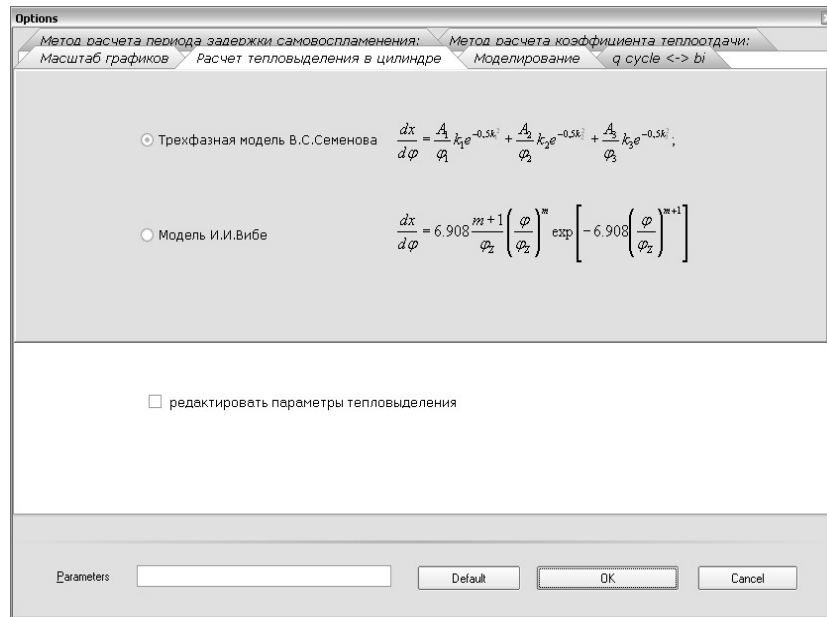


Рисунок 1. Выбор закона тепловыделения при моделировании рабочего процесса

Для оценки скорости тепловыделения при сгорании топлива в цилиндре используется трехфазная модель Семенова – Квятковского [5], либо известная модель И.И. Вибе [6] (рис. 1).

Расчет тепловыделения с использованием формулы И.И. Вибе обеспечивает достоверность при точной оценке показателя характера сгорания  $m$  и продолжительности тепловыделения  $\varphi_Z$ . Определение  $m$  и  $\varphi_Z$  для конкретного эксплуатационного режима удобно производить, имея запись индикаторной диаграммы рабочего процесса в координатах  $P(\varphi)$ .

В отличие от метода И.И. Вибе, метод В.С. Семенова – В.И. Квятковского базируется на предположении о том, что наиболее общим видом тепловыделения является трехфазное тепловыделение. Метод реализован с помощью нагрузочных критериев, которые непосредственно связаны с цикловой подачей топлива. С помощью метода В.С. Семенова – В.И. Квятковского можно произвести более точное моделирование тепловыделения и рабочего процесса, в том числе можно моделировать многофазный впрыск топлива, реализованный в современных СДВС [3].

### 3. Расчетные зависимости коэффициента теплоотдачи от газов к стенке.

Потеря теплоты в стенке цилиндра, выраженная в виде конечной разности на каждом расчетном интервале  $\varphi_j \div \varphi_{j+1}$ , рассчитывается так:

$$\Delta Q_w = 0.5 \left[ \alpha_{rj} (T_j - T_{cyl}) F_j + \alpha_{rj+1} (T_j - T_{cyl}) F_{j+1} \right] \frac{\Delta \varphi}{6n}$$

где  $\alpha_r$  – коэффициента теплоотдачи от газов к стенке;  $T_{cyl}$  – средняя температура стенок цилиндра;  $F$  – поверхность охлаждения цилиндра;  $\Delta\varphi$  – расчетный интервал – элементарный участок метода конечных разностей;  $n$  – частота вращения коленчатого вала.

Если средняя условная температура стенок цилиндра задается на основании опыта и может быть уточнена по экспериментальным данным, то коэффициент теплоотдачи от газов к стенке рассчитывается по нескольким авторским зависимостям [4, 5]:

В.С.Семенова –

$$\alpha_r = 0.00081 * Cm^{0.5} P^{1/3} T^{0.75} / D^{0.25},$$

Г.Хохенберга –

$$\alpha_r = 0.8201 * (Cm + 1.4)^{0.8} P^{0.8} / (V_s^{0.06} T^{0.4}),$$

Г.Эйхельберга –

$$\alpha_r = 0.779 * 10^{-2} * Cm^{1/3} * \sqrt{PT},$$

Х.Цапфа –

$$\alpha_r = 3.277 * Cm^{0.78} P^{0.78} / (D^{0.22} T^{0.52}),$$

Г.Вошни –

$$\alpha_r = 0.820 * (P * v_z)^{0.8} / (D^{0.2} T^{0.55}).$$

Как видно из представленных зависимостей, коэффициент теплоотдачи в основном зависит от текущего давления, температуры и средней скорости поршня  $Cm = Sn / 30$ . Сравнительные графики изменения  $\alpha_r$  для эксплуатационного режима СОД 6ЧН25/34 показаны на рисунке 2, где видно, что при равных условиях расчетные по разным методам значения  $\alpha_r$  значительно отличаются друг от друга. Тем не менее, влияние их отличий на результаты расчета рабочего процесса оказалось не очень значительным. При использовании разных методов расчета  $\alpha_r$ , максимальное отклонение расчетной мощности не превышает 3%, максимальное давление сгорания  $P_{z_3}$  сжатия  $P_C$ , начала воспламенения  $P_{C'}$  и  $P_{36}$  не превышает 2,5% для большинства МОД и СОД. Для теплонапряженных СОД и ВОД с относительно высокими средними температурами деталей ЦПГ можно рекомендовать расчет  $\alpha_r$  по формуле Х.Цапфа, для остальных СДВС расчет коэффициента теплоотдачи по разным формулам дает различия не более 2 ÷ 2,5% для основных параметров рабочего процесса.

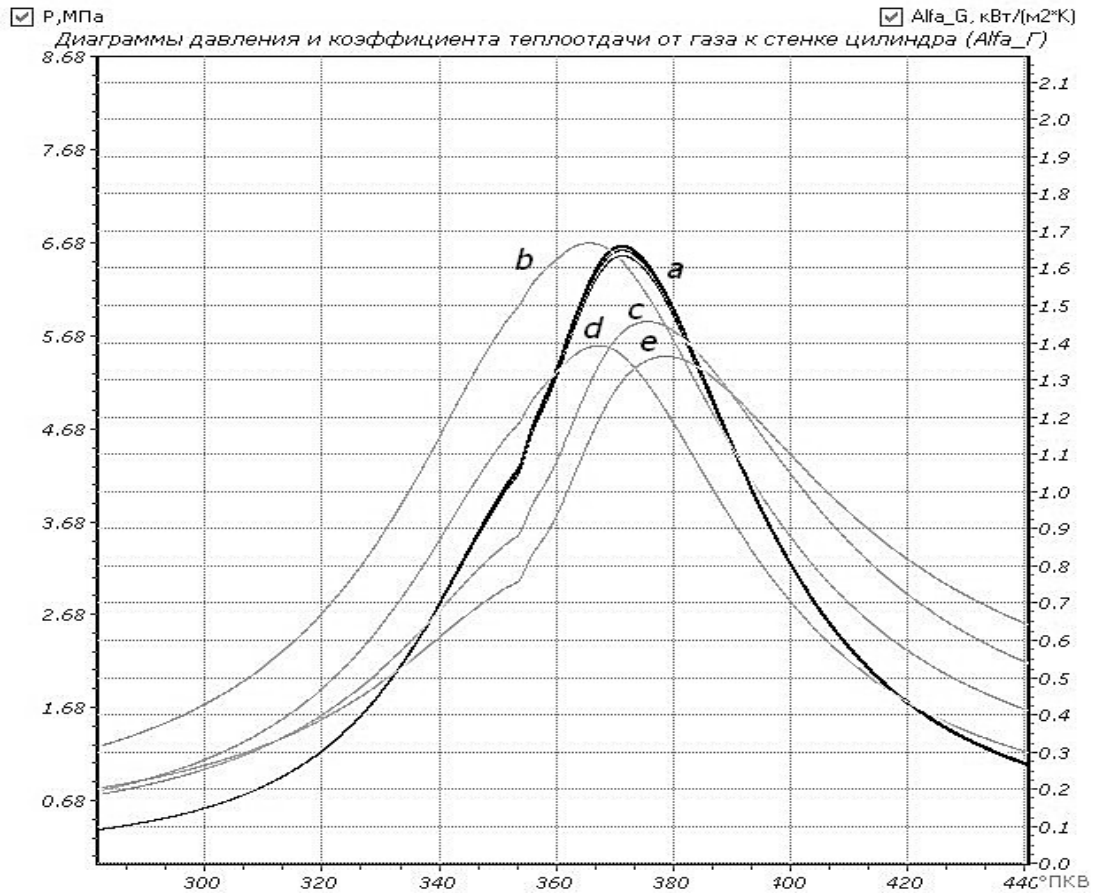


Рисунок 2. Графики: а –  $P(\varphi)$  и значений коэффициента теплоотдачи от газов к стенке, рассчитанные по зависимостям: б – Х. Цаффа; с – Г. Эйхельберга; d – Г. Хохенберга; е – В.С. Семенова

#### 4. Удельная работа цикла.

Во всех современных системах мониторинга рабочего процесса СДВС используется величина давления газов на линии расширения  $P_{exp}(P_{36})$  (давление на  $36^\circ$  ПКВ за ВМТ), как один из основных диагностических параметров, характеризующих догорание топлива и тепловую напряженность цилиндра.

После анализа суммарной удельной работы цикла (график приведен на рис. 3, б) становится понятным, почему был выбран угол ПКВ именно  $36^\circ$ . Для большинства исследованных двигателей суммарная удельная работа цикла в точке  $36^\circ$  за ВМТ становится близкой к нулю и меняет знак с «-» на «+». С физической точки зрения это означает, что до этой фазы поворота коленчатого вала приходится затратная часть рабочего цикла, и лишь после нее – прибыльная часть, т.е. отдача энергии двигателем.

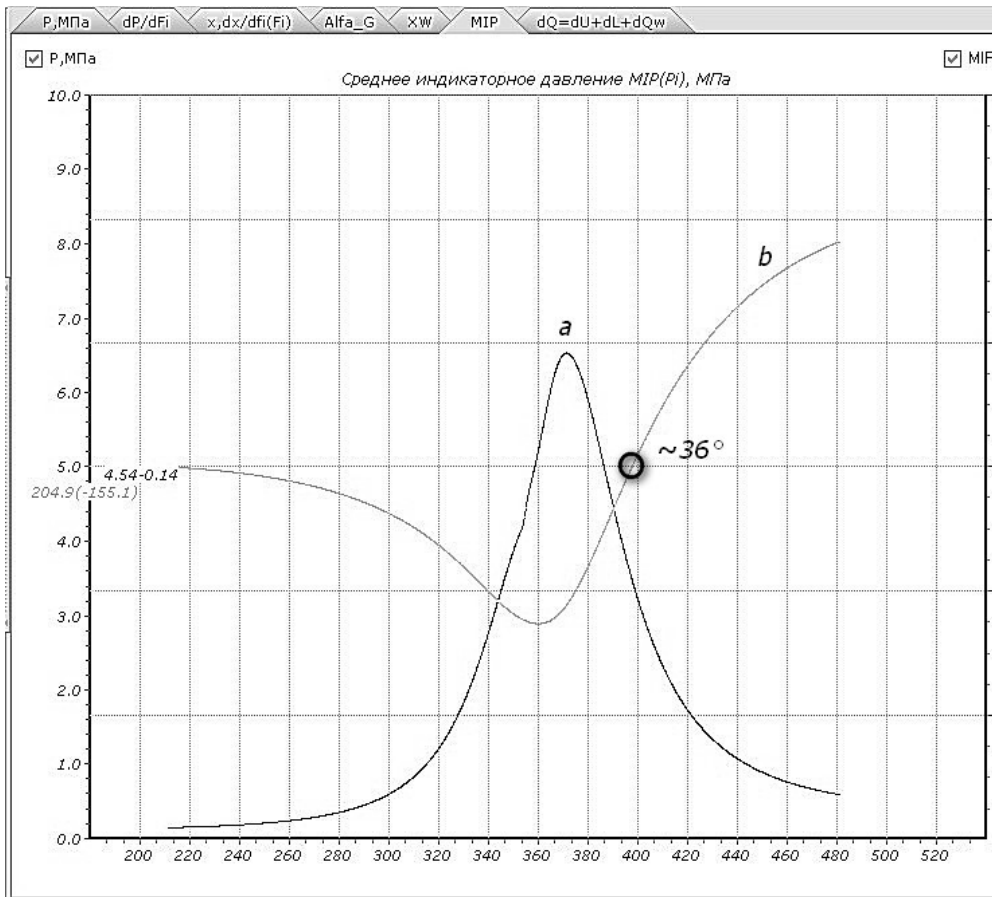


Рисунок 3. Диаграмма  $P(\varphi)$  (a) и удельная работа цикла (b)

На рисунке 3 показан график удельной работы цикла для СОД 6ЧН25/34. Для других типов СДВС, которые не являются длинноходовыми машинами, такая закономерность повторяется с большой точностью. Для МОД и некоторых СОД с повышенным отношением  $S/D$  точка нулевого баланса немного смещается вправо, однако в существующих системах мониторинга диагностический параметр  $P_{exp} = P_{36}$  используется до сих пор для всех типов СДВС.

### 5. Баланс I закона термодинамики.

Общий баланс энергии, согласно I закону термодинамики (1) проиллюстрирован на рисунке 4: энергия, выделившаяся при сгорании топлива, расходуется на совершение полезной работы, изменение внутренней энергии газа и отдачу теплоты в систему охлаждения. Диаграммы  $b, c, d, e$  отражают тепловой баланс на каждой фазе рабочего процесса. Иллюстрация изменения индикаторной работы цикла и внутренней энергии газа в течение 2-х основных тактов наглядно демонстрирует распределение затрат энергии, выделившейся при сгорании топлива. До момента начала сгорания топлива (фаза  $\varphi P c'$ ) внутренняя энергия газов  $U(\varphi)$  и работа цикла  $L(\varphi)$  (с отрицательным знаком) почти полностью компенсируют друг друга. Доля теплоты, отданной в стенки цилиндра  $Q_w(\varphi)$  на этом участке, относительно мала. На этом участке сгорания нет  $Q_x(\varphi)=0$ .

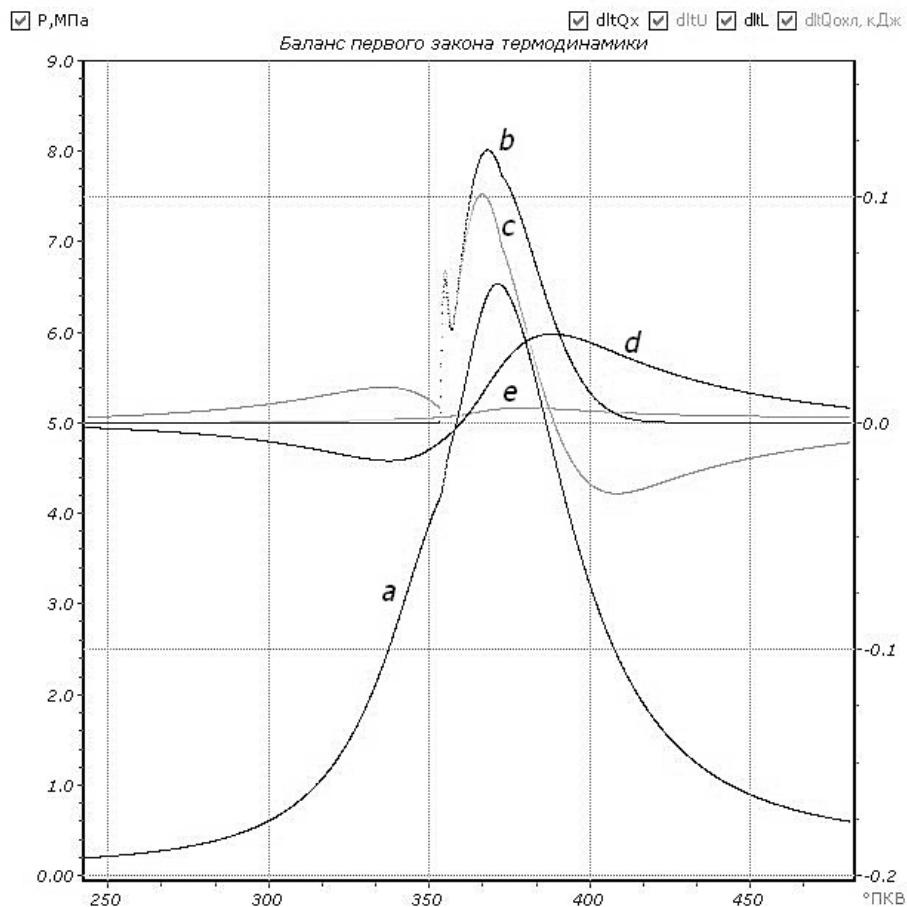


Рисунок 4. Диаграммы:  $P(\varphi)$  (a) и энергии:  
 $Q_x(\varphi)$  (b) – выделенной при сгорании топлива;  
 $Q_w(\varphi)$  (e) – переданной через стенки цилиндра;  
 $U(\varphi)$  (c) – внутренней энергии газа;  
 $L(\varphi)$  (d) – индикаторной работы цикла

После ВМТ работа  $L(\varphi)$  становится положительной (поршень движется вниз), возрастает внутренняя энергия газов и  $Q_w(\varphi)$ . В сумме все три составляющие равны количеству энергии, полученному при сгорании топлива  $Q_x(\varphi) > 0$ .

График  $L(\varphi)$  ассиметричен относительно ВМТ, что и характеризует выполнение двигателем полезной работы.

**Заключение.** Основной задачей моделирования рабочего процесса в режиме реальной эксплуатации является уточнение расхода топлива и диагностика состояния узлов ЦПГ, ТА и МГР. С помощью математической модели можно анализировать последствия изменения настроек ТА и МГР. Расчет среднего индикаторного давления и индикаторной мощности позволяет оценить резерв нагрузки двигателя.

Возможность вариации законов тепловыделения и других, входящих в математическую модель алгоритмов, позволяет глубже анализировать физику рабочего процесса.

Реализованная в расчетном модуле визуализация 1-го закона термодинамики наглядно демонстрирует энергетические взаимосвязи рабочего процесса в цилиндре ДВС.

Подробная визуализация всех основных составляющих рабочего процесса в целом способствует лучшему осмыслению действий технического персонала, обслуживающего СДВС.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приложение VI к МАРПОЛ 73/78. Правила предотвращения загрязнения атмосферы с судов. – СПб.: ЦНИИМФ, 2004. – 80 с.
2. 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.
3. Варбанец Р.А. Моделирование рабочего процесса в задачах повышения эффективности эксплуатации судовой дизельной энергетической установки / Р.А. Варбанец // Двигатели внутреннего сгорания. Всеукраинский научно-технический журнал. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2008. – № 2. – С. 18–22.
4. Ваншейдт В.А. Судовые двигатели внутреннего сгорания / В.А. Ваншейдт. – Л.: «Судостроение», 1977. – 392 с.
5. Семенов В.С. Современные проблемы теории судовых дизелей / В.С. Семенов. – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1991. – 112 с.
6. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателей / И.И. Вибе. – М.: МАШГИЗ, 1962. – 271 с.

### **Івановський В.Г., Варбанець Р.А. МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ В СИСТЕМІ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ D4.0H**

*Розрахунковий модуль діагностичної системи DEPAS D4.0H дозволяє моделювати робочий процес у циліндрі суднового дизеля на основному і часткових експлуатаційних режимах. Метою моделювання робочого процесу є оцінка резерву навантаження двигуна і оцінки теплової і механічної напруженостей. Важливим завданням моделювання робочого процесу є уточнення витрати палива на поточному експлуатаційному режимі і його прогнозування при зміні налаштувань паливної апаратури і механізму газорозподілу. У статті розглядаються деякі можливості розрахункового модуля: зміна закону тепловиділення в циліндрі, аналіз питомої роботи циклу, варіації коефіцієнта тепловіддачі та енергетичний баланс, згідно з 1-м законом термодинаміки.*

*Ключові слова: судновий двигун внутрішнього згорання (СДВЗ), робочий процес, паливна апаратура (ПА), механізм газорозподілу (МГР), тепловиділення, внутрішня енергія газу, коефіцієнт тепловіддачі.*



**Ivanovskiy V.G., Varbanets R.A.** MODELLING AND ANALYSIS OF WORKING PROCESS IN THE SYSTEM OF PARAMETRIC DIAGNOSIS OF SHIP'S DIESELS D4.OH

*A designed module of diagnostic system DEPAS D4.OH permits to model a working process in the cylinder of ship's diesel engine under main and partial operating modes. The aim of modeling a working process is the estimation of engine loaded reserve and estimation of thermal and mechanical stresses. The important task of modeling a working process is a redetermination of fuel consumption under current operating mode and its prognosis in case of changes in the adjustments of fuel equipment and mechanism of gas distribution. Some possibilities of the designed module are considered in this paper: a change of the law of heat release in the cylinder, analysis of specific operation of cycle, variations in coefficient of convective heat transfer and energy balance according to the 1<sup>st</sup> law of thermodynamics.*

*Key words: ship's internal combustion engine, working process, fuel equipment, mechanism of gas distribution, heat release, internal energy of gas, coefficient of convective heat transfer.*