

УДК 621.436

В. Г. ИВАНОВСКИЙ, Р. А. ВАРБАНЕЦ, В. П. ГУБАНОВ, Е. И. ЖОЛТИКОВ

Одесский национальный морской университет, Украина

### РАСЧЕТ ВПРЫСКА ДИЗЕЛЬНОЙ ФОРСУНКОЙ, ПРИМЕНИМЫЙ К ЭЛЕКТРОННОМУ УПРАВЛЕНИЮ

Изложена методика гидродинамического расчета топливной системы дизеля, включающей в себя форсунку с электронным управлением. Методика расчета базируется на решении уравнений движения маловязких сортов топлива. Сформулированы граничные условия расчета в разных полостях форсунки. Показано, что расчет процессов топливоподачи в системе с электронноуправляемой форсункой, в отличие от расчета впрыскивания обычной топливной системой, начинается у форсунки, а не у насоса. Показано, что в связи с отсутствием опытных данных в первом приближении можно воспользоваться формулой Максвелла для малых зазоров. Разработанная методика топливоподачи позволит усовершенствовать процесс создания новых типов топливной аппаратуры. Данная методика может быть применена при расчете процесса подачи топлива в цилиндр дизеля, оборудованного форсунками с гидравлическим управлением иглой. Предлагаемая методика может быть применима для поршневых двигателей внутреннего сгорания, используемых в авиационной технике.

**Ключевые слова:** методика, расчет, дизель, топливная система.

Одним из перспективных направлений в совершенствовании топливной аппаратуры дизелей является развитие электрогидравлических форсунок, обеспечивающих управление процессом впрыскивания топлива. Предложено большое количество различных конструктивных решений такого типа форсунок [1] и проводятся их опытные исследования.

Известно, что процесс создания новой топливной аппаратуры резко ускоряется, если выбор оптимальных параметров топливной аппаратуры проводится теоретическим путем с использованием ПК. В связи с изложенным, в статье поставлена цель разработать методику гидродинамического расчета топливной системы с электрогидравлической форсункой.

Рассмотрим методику гидравлического расчета впрыска электронной форсункой на примере топливной системы, показанной на рисунке. Автономным насосом топливо подается в аккумулятор, где оно находится под высоким давлением. По нагнетательному трубопроводу 2 и каналу 14 топливо направляется в кольцевую камеру 13 распылителя, а через дроссель 7 и канал 8 - в полость 9 над поршнем 11, который воздействует на иглу 12. Перед впрыскиванием топлива клапан 6 закрыт при помощи пружины 5, а поэтому давление в полостях 9 и 13 одинаково.

В момент начала впрыскивания в электромагнитную катушку 3 подается электрический ток, в результате чего происходит притяжение (подъем) якоря 4, т. е. открытие клапана 6. Так как проходное

сечение клапана 6 значительно больше сечения дросселя 7, то давление в камере 9 быстро падает и игла поднимается. Следовательно, начало и скорость подъема иглы будут зависеть от закона подъема клапана 6, который управляется электронным устройством.

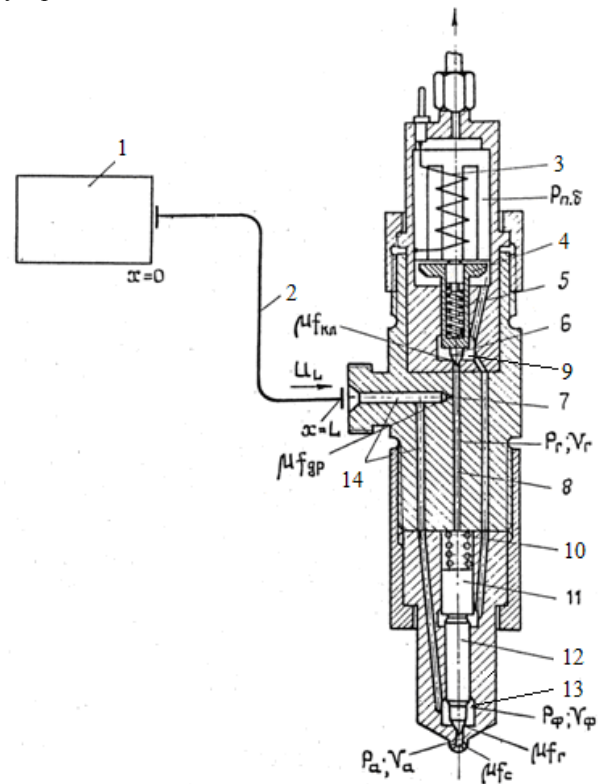


Рис. 1. Расчетная схема топливной системы с электрогидравлической форсункой

Для прекращения впрыскивания топлива электромагнитная катушка выключается, после чего под действием пружины 5 клапан 6 закрывается, что приводит к повышению давления топлива в полости 9. Площадь поршня 11 больше площади поперечного сечения иглы 12, что обеспечивает надежную ее посадку. В некоторых конструкциях электронных форсунок вместо поршня предусматривается пружина 10.

Граничные условия у форсунки с электронным управлением при впрыскивании маловязкого топлива описывается следующими дифференциальными уравнениями:

- сплошности потока топлива в полостях форсунки и распылителя перед иглой

$$\alpha V_{\Phi} \frac{dp_{\Phi}}{dt} = f_T u_L - f_{\Pi} \frac{dz}{dt} + \frac{dV_{\text{осв}}}{dt} - \xi_{\mu} f_r \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_{\Phi} - p_a|} - \varepsilon \mu f_d \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_{\Phi} - p_r|}, \quad (1)$$

- сплошности потока топлива в полости под иглой перед сопловыми отверстиями

$$\alpha V_a \frac{dp_a}{dt} = \xi_{\mu} f_r \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_{\Phi} - p_a|} - \mu f_c \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_a - p_u|} - \frac{dV_{\text{осв}}}{dt}, \quad (2)$$

- сплошности потока топлива в полости над иглой

$$\alpha V_r \frac{dp_r}{dt} = \varepsilon \mu f_d \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_{\Phi} - p_r|} - \mu f_k \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_r - p_n|} + F_{\Pi} \frac{dz}{dt}, \quad (3)$$

- движения иглы форсунки

$$M_{\Pi} \frac{d^2 z}{dt^2} = p_a f_{\Pi}'' + p_{\Phi} f_{\Pi}' - C_{\Pi} (z + z_0) - F_{\Pi} p_r. \quad (4)$$

Движения перепускного клапана

$$M_k \frac{d^2 y}{dt^2} = P_M + f_k' (p_r - p_n) + c_k (y + y_0), \quad (5)$$

к скорости движения топлива в выходном сечении нагнетательного трубопровода ( $x = L$ )

$$u_L = \frac{1}{\alpha \rho} \left[ F \left( t - \frac{L}{\alpha} \right) + W \left( t + \frac{L}{\alpha} \right) \right], \quad (6)$$

обратной волны давления

$$W \left( t + \frac{L}{\alpha} \right) = p_r - p_{\Phi} + F \left( t - \frac{L}{\alpha} \right), \quad (7)$$

где  $p_{\Phi}$ ,  $p_a$  и  $p_r$  - давление топлива в камерах перед иглой, перед сопловыми отверстиями и в камере над иглой;

$p_r$  - остаточное давление топлива в нагнетательном трубопроводе;

$p_{\Pi}$  - давление газов в цилиндре;

$p_n$  - противодействие со стороны переливного бака;

$V_{\Phi}$ ,  $V_a$  и  $V_r$  - объемы камер форсунки (см. рисунок);

$V_{\text{осв}}$  - объем, освобождаемый конусом иглы при ее подъеме;

$f_r$ ,  $f_{\Pi}$  и  $f_n$  - площадь поперечного сечения нагнетательного трубопровода, поршня и иглы форсунки;

$f_{\Pi}'$  - дифференциальная площадь иглы;

$$f_{\Pi}'' = f_{\Pi} - f_{\Pi}'$$

$f_k'$  - площадь проходного сечения подводящего канала клапана;

$\mu f_r$ ,  $\mu f_c$ ,  $\mu f_d$ ,  $\mu f_k$  - эффективные сечения в седле иглы, сопловых отверстий, дросселя и перепускного клапана;

$y$  и  $Z$  - подъем клапана и иглы;

$u_L$  - скорость топлива в выходном сечении нагнетательного трубопровода;

$M_{\Pi}$  и  $M_k$  - масса иглы и клапана (вместе с деталями, движущимися с ними);

$c_{\Pi}$  и  $z_0$  - жесткость и предварительное сжатие пружины иглы форсунки;

$c_k$  и  $y_0$  - жесткость и предварительное сжатие пружины клапана;

$P_M$  - электромагнитная сила притяжения катушки;

$F \left( t - \frac{L}{\alpha} \right)$  и  $W \left( t + \frac{L}{\alpha} \right)$  - прямая и обратная волны давления;

$L$  - длина нагнетательного трубопровода (от сечения  $x=0$  у аккумулятора до сечения  $x = L$  у форсунки, см. рисунок);

$\alpha$  - скорость распространения волн давления в нагнетательном трубопроводе;

$\alpha$  и  $\rho$  - коэффициент сжимаемости и плотность топлива;

$t$  - время;

$\xi$  и  $\varepsilon$  - ступенчатые функции, равные

$$\xi = \begin{cases} 1 & \text{при } p_{\Phi} \geq p_a; \\ 0 & \text{при } p_{\Phi} < p_a; \end{cases}$$

$$\varepsilon = \begin{cases} 1 & \text{при } p_{\Phi} \geq p_r; \\ 0 & \text{при } p_{\Phi} < p_r; \end{cases}$$

При отсутствии в форсунке пружины 10 (см. рисунок  $c_{\Pi} = 0$ , а если нет поршня 11, то  $F_{\Pi} = f_{\Pi}$ ).

Систему уравнений (1)-(7) рекомендуется решать методом Эйлера, согласно которому искомая функция определяется по формуле

$$y(x) = y(x_1) + \frac{dy(x_1)}{dt} \Delta t, \quad (8)$$

где -  $y(x_1)$  и  $\frac{dy(x_1)}{dt}$  - значение функции и ее производной в начальной точке расчетного интервала  $\Delta t$ .

Тогда, в соответствии с формулой (8), уравнения (1)-(5) записываются

$$\frac{dp_\phi}{dt} = \frac{1}{\alpha V_\phi} \left[ f_T u_L - \sigma f_{\text{и}} \frac{dz}{dt} + \frac{dV_{\text{осв}}}{dt} - \xi \mu f_r \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|p_\phi - p_a|} - \varepsilon \mu f_d \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|p_\phi - p_r|} \right], \quad (9)$$

$$\frac{dp_a}{dt} = \frac{1}{\alpha V_a} \times \left[ \xi \mu f_r \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|p_\phi - p_a|} - \mu f_c \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_a - p_u} - \frac{dV_{\text{осв}}}{dt} \right], \quad (10)$$

$$\frac{dp_r}{dt} = \frac{1}{\alpha V_r} \times \left[ \xi \mu f_d \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|p_\phi - p_r|} - \mu f_k \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_r - p_n} + \sigma f_{\text{и}} \frac{dz}{dt} \right], \quad (11)$$

$$\frac{dC_{\text{и}}}{dt} = \frac{\sigma \psi}{M_{\text{и}}}, \quad (12)$$

$$\frac{dz}{dt} = \sigma C_{\text{и}}, \quad (13)$$

$$\frac{dC_{\text{к}}}{dt} = \frac{\sigma' \psi'}{M_{\text{к}}}, \quad (14)$$

$$\frac{dy}{dt} = \sigma' C_{\text{к}} \sigma, \quad (15)$$

где  $\sigma$  и  $\sigma'$  - ступенчатые функции

$$\psi = p_a f_{\text{и}}'' + p_\phi f_{\text{и}}' - c_{\text{и}} (z + z_0) - F_{\text{и}} p_r,$$

$$\psi' = P_{\text{м}} + f_{\text{к}}' (p_r - p_n) - C_{\text{к}} (y + y_0).$$

Функция  $\sigma = 0$  при  $z = 0$  и  $\phi \leq 0$ , а также при  $z = z_{\text{max}}$  и  $\psi \geq 0$ , в остальных случаях  $\sigma = 1$ . Функция  $\sigma = 0$  при  $y = 0$  и  $\psi' \leq 0$ , а также  $y = y_{\text{max}}$  при  $\psi' \geq 0$ , в остальных случаях  $\sigma' = 1$ . Величины  $z_{\text{max}}$  и  $y_{\text{max}}$  обозначают подъем иглы и клапана, когда они достигают упора.

Объем камер форсунки

$$V_\phi = V_{\phi, \text{min}} + f_{\text{и}} z_1 - V_{\text{осв}_1}, \quad (16)$$

$$V_a = V_{a, \text{min}} + V_{\text{осв}_1}, \quad (17)$$

$$V_r = V_{r, \text{max}} - F_{\text{и}} z_1, \quad (18)$$

где  $V_{\phi, \text{min}}$ ,  $V_{a, \text{min}}$  и  $V_{r, \text{min}}$  - объемы полостей форсунки, когда игла закрыта;

$$V_{\text{осв}_1} = V_0 \left[ 1 - \left( \frac{h_{\text{к}} - z_1}{h_{\text{к}}} \right)^3 \right],$$

где  $V_0 = \frac{1}{3} \pi r_{\text{к}}^2 h_{\text{к}}$  - объем конуса иглы ниже посадочного пояска на игле;

$h_{\text{к}}$  и  $r_{\text{к}}$  - высота и радиус основания этого конуса.

Величины с индексом «1» относятся к началу расчетного интервала  $\Delta t$ . Указанное замечание относится и ко всем последующим формулам.

Эффективное сечение в седле иглы

$$\mu f_r = \frac{\mu f_\phi \mu f_c}{\sqrt{\mu f_c^2 - \mu f_\phi^2}}, \quad (19)$$

где  $\mu f_\phi$  - эффективное сечение распылителя, равное [2]

$$\mu f_\phi = \left[ 2,64 \frac{z}{z_{\text{max}}} - 2,37 \left( \frac{z}{z_{\text{max}}} \right)^2 + 0,73 \left( \frac{z}{z_{\text{max}}} \right)^3 \right] \mu f_{\phi, \text{max}}. \quad (20)$$

Здесь  $\mu f_{\phi, \text{max}}$  - эффективное сечение распылителя при полностью открытой игле.

Проходное сечение клапана игольчатого типа [2]

$$\mu f_{\text{к}} = \mu \text{л} \sin a_{\text{к}} (d_{\text{к}} - 0,5 y \sin 2 a_{\text{к}}), \quad (21)$$

где  $d_{\text{к}}$  - диаметр подводящего канала клапана;

$a_{\text{к}}$  - угол наклона посадочного пояска к оси клапана.

Производная  $\frac{dV_{\text{осв}}}{dt}$ , входящая в уравнение (9), вычисляется по формуле [2]

$$\frac{dV_{\text{осв}}}{dt} = -3 \sigma V_0 \left( \frac{h_{\text{к}} - z}{h_{\text{к}}} \right)^2. \quad (22)$$

Сила притяжения электромагнитной катушки зависит от зазора между катушкой и якорем, т. е.

$$P_{\text{м}} = f(y_{\text{max}} - y).$$

В связи с отсутствием опытных зависимостей в первом приближении можно воспользоваться формулой Максвелла, которая в случае малого зазора записывается [3] так:

$$P_{\text{м}} = b B_{\delta} S, \quad (23)$$

где  $b$  - постоянная;

$B_{\delta}$  - индукция в зазоре (зависит от величины зазора);

$S$  - площадь полюса.

Расчет процессов топливоподачи во входном сечении нагнетательного трубопровода, т. е. в аккумуля-

муляторе, проводится с учетом граничного условия

$$\alpha V_{\text{ак}} \frac{dp_{\text{ак}}}{dt} = Q_{\text{н}} - f_{\text{т}} u_0, \quad (24)$$

где  $V_{\text{ак}}$  и  $p_{\text{ак}}$  - объем аккумулятора и давление в нем;

$Q_{\text{н}}$  - секундная объемная производительность топливного насоса;

$u_0$  - скорость движения топлива во входном сечении ( $x = 0$ , см. рисунок) нагнетательного трубопровода.

Уравнение (24) для общности методики рекомендуется решать также методом Эйлера, подробно изложенным выше, при этом скорость топлива:

$$u_0 = \frac{1}{\alpha \rho} [F(t) + W(t)], \quad (25)$$

а прямая волна

$$F(t) = p_{\text{ак}} - p_{\text{т}} + W(t). \quad (26)$$

Если в аккумуляторе обеспечивается постоянное давление топлива (или оно изменяется мало), то

$$\left. \begin{aligned} p_{\text{ак}} &= p_{\text{т}} \\ F(t) &= W(t) \\ u_0 &= \frac{2}{\alpha \rho} W(t) \end{aligned} \right\}. \quad (27)$$

В данном случае расчет в аккумуляторе проводить не имеет смысла, так как прямая волна  $F\left(t - \frac{L}{\alpha}\right)$  будет равна обратной волне  $W\left(t + \frac{L}{\alpha}\right)$ , образованной у форсунки ранее (со сдвигом по времени на  $t = 2L/\alpha$ ).

Расчет процессов топливоподачи в системе с электронноуправляемой форсункой в отличие от расчета впрыскивания обычной топливной системой начинается у форсунки, а не у насоса, так как начало движения топлива в системе определяется моментом подачи электрического тока в электромагнитную катушку. Полагаем, что в этот момент топливо в системе находится в покое при остаточном давлении  $p_{\text{т}}$ .

Предлагается следующая последовательность расчета.

1. По формуле (8) с учетом выражений для производных (9)-(15) вычисляются значения  $p_{\text{ф}}$ ,  $p_{\text{а}}$ ,  $p_{\text{т}}$ ,  $z$ , и  $u$ , при этом в правые части этих выражений подставляются значения всех величин в начале расчетного участка  $\Delta t$ .

Значения величин

$$V_{\text{ф}}, V_{\text{а}}, V_{\text{т}}, \mu_{\text{ф}}, \mu_{\text{к}}, \frac{dV_{\text{осв}}}{dt} \text{ и } P_{\text{м}} \text{ определяют-}$$

ся по формулам (16)-(23), значение скорости  $u_{\text{л}}$  - по формуле (6). При этом необходимо помнить, что

для первого участка  $\Delta t$  обратная волна

$$W\left(t + \frac{L}{\alpha}\right) = 0, \text{ а прямая волна } F\left(t - \frac{L}{\alpha}\right) = 0 \text{ для}$$

всего периода расчета, пока  $t \leq 2L/\alpha$ .

По формуле (7) вычисляется значение отраженной волны  $\mu W\left(t + \frac{L}{\alpha}\right)$ .

Расчет по пунктам 1 и 2 проводится для периода времени  $t = 2L/\alpha$ , после чего необходимо выполнить расчет у аккумулятора по системе уравнений (24)-(26) или (27), при этом определяются  $p_{\text{ак}}$ ,  $F(t)$  и  $u_0$ .

Подробная методика расчета процессов топливоподачи маловязкого топлива, выполняемая по методу проф. И. В. Астахова, подробно изложена в книге [4].

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Разработанная методика топливоподачи в дизеле с электрогидравлической форсункой позволит усовершенствовать процесс создания новой топливной аппаратуры.

2. Данная методика может быть применена при расчете процесса подачи топлива в цилиндр дизеля, оборудованного форсунками с гидравлическим управлением иглой.

## Литература

1. Пинский, Ф. Л. Электрогидравлическое управление впрыском топлива: двигатели внутреннего сгорания [Текст] / Ф. Л. Пинский. - М. : НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1973. - 73 с.
2. Фомин, Ю. Я. Гидродинамический расчет топливных систем дизелей с использованием ЭЦВМ [Текст] / Ю. Я. Фомин. - М. : Машиностроение, 1997. - 194 с.
3. Новиков, Ю. К. Лабораторный практикум по электрическим аппаратам [Текст] / Ю. К. Новиков, А. Я. Новиков, В. П. Пелипей. - М. : Высшая школа, 1971. - 200 с.
4. Подача и распыливание топлива в дизелях [Текст] : учебник / под ред. И. В. Астахова. - М. : Машиностроение, 1972. - 235 с.

## References

1. Pinskiy, F. L. *Jelektrogidravlichesкое управление vpryskom topliva: dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Electro-hydraulic control of the fuel injection: internal combustion engines]. Moscow, NIINFORMTJaZhMASH Publ., 1973. 73 p.
2. Fomin, Ju. Ja. *Gidrodinamicheskij raschet toplivnyh sistem dizelej s ispol'zovaniem JeCVM* [Computer aided hydrodynamic analysis of fuel systems of diesel engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1997. 194 p.

3. Novikov, Ju. K., Novikov, A. Ja., Pelipej, V. P. *Laboratornyj praktikum po jelektricheskim apparatam* [Laboratory summary on electric devices]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1971. 200 p.

4. Astahova, I. V. *Podacha i raspylivanie topliva v dizeljah* [Gasoline and atomization of gasoline in the diesel engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 235 p.

*Поступила в редакцию 2.09.2016, рассмотрена на редколлегии 16.09.2016*

### РОЗРАХУНОК ВПОРСКУВАННЯ ДИЗЕЛЬНОЮ ФОРСУНКОЮ, ЯКИЙ ЗАСТОСОВАНО ДО ЕЛЕКТРОННОГО УПРАВЛІННЯ

**В. Г. Ивановський, Р. А. Варбанець, В. П. Губанов, Е. І. Жолтиков**

Викладено методику гідродинамічного розрахунку паливної системи дизеля, що включає в себе форсунку з електронним управлінням. Методика розрахунку базується на рішенні рівнянь руху малов'язких сортів палива. Сформульовано граничні умови розрахунку в різних порожнинах форсунки. Показано, що розрахунок процесів подачі палива в системі з електроннокерованою форсункою, на відміну від розрахунку впорскування звичайної паливної системи, починається у форсунки, а не у насоса. Показано, що в зв'язку з відсутністю досвідчених даних в першому наближенні можна скористатися формулою Максвелла для малих зазорів. Розроблена методика подачі палива дозволить удосконалити процес створення нових типів паливної апаратури. Дана методика може бути застосована при розрахунку процесу подачі палива в циліндр дизеля, обладнаного форсунками з гідравлічним управлінням голкою. Запропонована методика може бути застосована для поршневих двигунів внутрішнього згоряння, що використовуються в авіаційній техніці.

**Ключові слова:** методика, розрахунок, дизель, паливна система.

### INJECTION CALCULATION OF A DIESEL INJECTOR APPLICABLE TO ELECTRONIC CONTROL

**V. G. Ivanovsky, R. A. Varbanets, V. P. Gubanov, E. I. Zholtikov**

Presented a technique of a hydrodynamic calculation of a diesel engine's fuel system, including an electrically controlled nozzle. Method of calculation is based on a solution of low-viscosity fuel grades motion equations. Formulated boundary conditions of a calculation in different cavities of a nozzle. It is shown that a calculation process in a fuel injector system with an electronically controlled nozzle unlike conventional fuel injection starts at the nozzle, but not at the pump. It is shown that in the absence of experimental data in the first approximation, we can use Maxwell's formula for small gaps. The developed fuel supply method allows improving process of creating of new types of fuel equipment. This technique can be applied in a calculation process of a fuel supply to a cylinder of a diesel engine equipped with a hydraulically operated injector needle. The proposed method can be applied to internal combustion engines used in aviation engineering.

**Keywords:** method of calculation, the diesel engine, fuel system.

**Ивановский Валерий Георгиевич** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Судовые энергетические установки и техническая эксплуатация», Одесский национальный морской университет, Украина, e-mail: roman.varbanets@gmail.com.

**Варбанец Роман Анатолієвич** – д-р техн. наук, профессор, профессор, зав кафедрой «Судовые энергетические установки и техническая эксплуатация», e-mail: roman.varbanets@gmail.com.

**Губанов Виктор Петрович** – старший преподаватель кафедры «Судовые энергетические установки и техническая эксплуатация», Одесский национальный морской университет, e-mail: roman.varbanets@gmail.com.

**Жолтиков Евгений Иванович** – аспирант кафедры «Судовые энергетические установки и техническая эксплуатация», Одесский национальный морской университет, e-mail: jeltikov@ukr.net.

**Ivanovskiy Valeriy Georgievitch** – Odessa National Maritime University, Ukraine; Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Ship Power Plants and Technical Operation", e-mail: roman.varbanets@gmail.com.

**Varbanets Roman Anatolevich** – Odessa National Maritime University, Ukraine; Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department "Ship Power Plants and Technical Operation", e-mail: roman.varbanets@gmail.com.

**Gubanov Victor Petrovich** – Odessa National Maritime University, Ukraine; Senior Lecturer of the Department "Ship Power Plants and Technical Operation", e-mail: roman.varbanets@gmail.com.

**Zholtikov Evgeniy Ivanovich** – Odessa National Maritime University; Postgraduate of the Department "Marine Power Plants and Technical Operation", e-mail: jeltikov@ukr.net.