

УДК 621.43

А. Б. Стефановский, к.т.н., доцент, тел. (380 619) 420442, (Украина, Мелитополь, ТГАТУ)

## **О ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ФАКТИЧЕСКИМИ И НОМИНАЛЬНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДИЗЕЛЕЙ**

*Рассмотрена взаимосвязь между фактическими и номинальными значениями показателя политропы расширения и степени повышения давления в рабочем цикле дизелей. Получены регрессионные зависимости, позволяющие приблизительно определить номинальный показатель по соответствующему фактическому, найденному по экспериментальной индикаторной диаграмме.*

*Дизель, показатель политропы расширения, степень повышения давления, зависимость.*

Для построения расчётной индикаторной диаграммы (ИД) цикла двигателя внутреннего сгорания нужно задаться рядом постоянных параметров. Так, чтобы построить кривые ИД, изображающие процессы сжатия и расширения заряда в координатах  $p - V$  (давление – объём), необходимо задать начальные параметры заряда и средние показатели политроп (СПП)  $n_1, n_2$ . В свою очередь, последние соответствуют начальным и конечным параметрам заряда для смежных крайних положений поршня – верхнего и нижнего. На СПП незначительно влияют различные факторы – частота вращения, нагрузка, давление наддува и т. п. Степень повышения давления (СПД) при сгорании  $\lambda$  определяется, как отношение максимального давления при сгорании  $p_z$  либо к давлению в начале видимого сгорания, либо к максимальному давлению при сжатии заряда  $p_c$ . Величины СПП и СПД непосредственно влияют на расчётное среднее индикаторное давление. (Ниже определяемые таким образом значения СПП и СПД названы «номинальными», что не имеет отношения к номинальному режиму двигателя.)

Номинальные значения СПП и СПД можно определить с помощью экспериментальных индикаторных диаграмм (ИД) дизеля. При этом, однако, возможны следующие затруднения. Номинальная величина СПП, найденная по параметрам заряда при смежных крайних положениях поршня, может не соответствовать «локальным» значениям показателя политропы исследуемого процесса, что приведет к неточной оценке работы. Если на экспериментальной ИД отсутствует кривая изменения давления при отсутствии сгорания, то нельзя непосредственно определить номинальную величину  $\lambda$ .

В то же время, экспериментальная ИД позволяет непосредственно, или после логарифмического преобразования координат  $p - V$ , определить значения показателей политроп ( $n_1^*, n_2^*$ ) и отношения давлений  $\lambda^*$ ,

которые далее названы «фактическими» и, вероятно, взаимосвязаны с номинальными значениями СПП и СПД. Вследствие меньшей значимости локальных особенностей процесса сжатия для рабочего процесса дизелей по сравнению с особенностями сгорания и расширения, здесь не рассматривается взаимосвязь значений  $p_1^*$  и  $p_1$ . Из всех возможных локальных значений показателя политропы расширения, довольно широко изменяющегося при расширении заряда, далее рассматривается только такое его «фактическое» значение  $p_2^*$ , которое характеризует наклон линеаризованной кривой  $p(V)$  в логарифмических координатах на самом протяжённом интервале объёма заряда. Фактическое отношение давлений  $\lambda^*$  при сгорании определяется по ИД, как отношение максимального давления  $p_z$  к давлению заряда  $p_{\phi=0}$ , соответствующему нахождению поршня в верхнем положении.

Цель данной работы – используя опубликованные экспериментальные данные для различных дизелей, установить характер взаимосвязи между фактическими и номинальными значениями указанных выше показателей:  $p_2^*$  и  $p_2$ ,  $\lambda^*$  и  $\lambda$ . В свою очередь, это позволит уточнить характер взаимосвязи номинальных значений СПП расширения и СПД, предполагавшейся Д. А. Портновым [1].

Чтобы найти соответствие между величинами  $\lambda^*$  и  $\lambda$ ,  $p_2^*$  и  $p_2$ , были обработаны экспериментальные ИД, опубликованные рядом авторов (см. табл. 1 и 2). Особенности ИД для табл. 1 было либо наличие вспомогательной кривой давления при отсутствии сгорания, либо возможность уверенного определения давления  $p_c$  по имеющейся кривой давления при сжатии заряда, предшествовавшем сгоранию. Особенностью ИД для табл. 2 было полное изображение кривых процесса расширения заряда.

На рис. 1, а изображена в логарифмических координатах регрессионная зависимость между параметрами  $\lambda$  и  $\lambda^*$ . Видно, что хотя есть заметное рассеивание точек (обусловленное различиями условий получения ИД), их совокупность можно описать квадратичным полиномом. На персональном компьютере методом наименьших квадратов (МНК) были подобраны коэффициенты регрессионного уравнения для определения номинальной СПД  $\lambda$  по известной фактической величине  $\lambda^*$ :

$$\lambda = 1,225 \lambda^{*1,547 - 0,906 \ln \lambda^*}, \quad (1)$$

где знак ^ над буквой  $\lambda$  означает регрессионное уравнение. Коэффициент корреляции между СПД  $\lambda$ , найденной по ИД, и расчетной по (1) составил 0,915 для рассмотренной выборки. Погрешности описания совокупности точек рис. 2 (кроме наиболее удаленных) уравнением (1): среднеквадратичная 0,16; относительная среднеквадратичная около 10 %; пределы относительной погрешности –21 % и +15 %. Данные из работы Пиллаи [9] использовались, как контрольная выборка, вследствие наличия нетипичного фактора - рециркуляции около 40 % выпускных газов.

Сопоставление их (различно ориентированные точки **P**) с зависимостью (1) показано на рис. 1, б.

Таблица 1

***Источники сведений о степенях повышения давления  $\lambda^*$  и  $\lambda$***

| Автор,<br>источник                                    | Дизель                                                              | Режим<br>работы                                                    | $\lambda^*$            | $\lambda$                         |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| Портнов [1,<br>фиг. 75 и 78]<br>(8 ИД)                | 12ЧН 18/20                                                          | 1800 1/мин;<br>$p_k = 139... 250$<br>кПа                           | 1,06... 1,20           | 1,32... 1,60                      |
| Вырубов и<br>др. [2, рис. 65<br>и 66] (4 ИД)          | 4ДН 10,8/12,7                                                       | 1600 1/мин;<br>различное<br>опережение<br>впрыска                  | 1,15... 1,6            | 1,88... 2,24                      |
| Ханин и др.<br>[3, рис. 2] (2<br>ИД)                  | 8Ч 13/14;<br>8ЧН 13/14                                              | 2100 1/мин;<br>1680 1/мин,<br>$p_k = 147$ кПа                      | 1,42;<br>1,13          | 1,81;<br>около 1,3                |
| Семенов и др.<br>[4, рис. 1.2,<br>1.3, 1.6] (3<br>ИД) | Ч 15/18;<br>12ЧН 15/18;<br>4Ч 8,5/11 (КС<br>ЦНИДИ)                  | 1500 1/мин;<br>1550 1/мин;<br>1500 1/мин                           | 1,19;<br>1,61;<br>1,59 | $1,66^{+0,06}$ ;<br>1,82;<br>1,88 |
| Кулешов и<br>др. [5, рис.<br>28] (3 ИД)               | 8ЧН 12/12                                                           | 2200 1/мин;<br>1400 1/мин;<br>1000 1/мин                           | 1,19;<br>1,26;<br>1,20 | 1,54;<br>1,80;<br>2,0             |
| Шароглазов и<br>др. [6, рис.<br>12.29] (2 ИД)         | 1ЧВН 15/16<br>(с автоматиче-<br>ской регулиров-<br>кой $\epsilon$ ) | Степень<br>сжатия $\epsilon$ : 14;<br>18                           | 1,06;<br>1,02          | 1,23;<br>1,11                     |
| Санчес [7, fig.<br>22a и<br>приложение<br>С4] (4 ИД)  | 1Ч 9,5/11,4<br>(специальный<br>с предкаме-<br>рой)                  | Топливо –<br>авиакеросин;<br>КИВ 1,0...<br>1,45                    | Около 1,7...<br>2,1    | 2,0... 2,45                       |
| Элкотб [8, fig.<br>1] (2 ИД)                          | нет данных                                                          | Топливо:<br>дизельное;<br>бензин                                   | 1,55;<br>2,12          | 2,3;<br>2,56                      |
| Пиллаи [9,<br>fig. 4.6-4.8]<br>(15 ИД)                | 4ЧН 7,9/8,6                                                         | 1500 1/мин;<br>РВГ 39...42%;<br>различное<br>опережение<br>впрыска | 1,45... 1,83           | 1,52... 2,03                      |

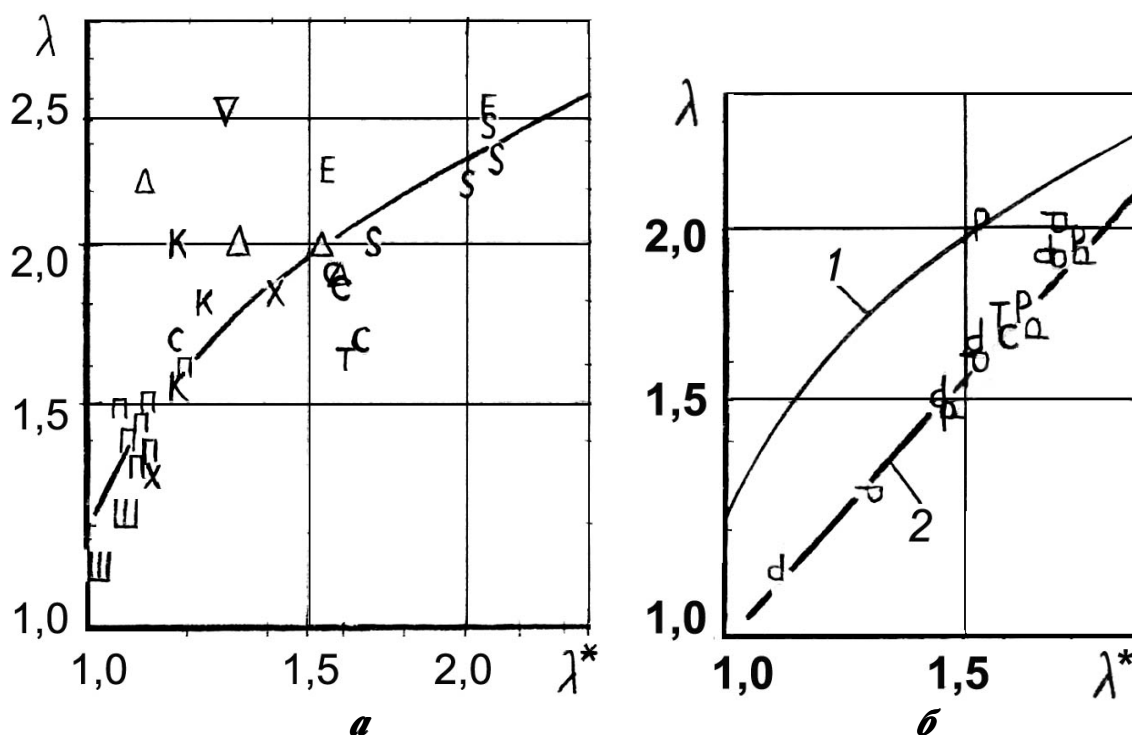
КИВ – коэффициент избытка воздуха;  
РВГ - рециркуляция выпускных газов.

Таблица 2

**Источники сведений о показателях политроны расширения  $n_2^*$  и  $n_2$** 

| Источник                             | Дизель         | Режим работы                                                                        | $n_2^*$                                               | $n_2$                             |
|--------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| [1, фиг. 75 и 108] (7 ИД)            | 12ЧН 18/20     | 1800 1/мин;<br>$p_k = 139... 250$<br>кПа                                            | 1,085... 1,19                                         | 1,21... 1,28                      |
| [6, рис. 12.23 и 12.27] (4 ИД)       | 1ЧВН 15/16     | Степень сжатия $\varepsilon$ : 10,5;<br>16,6;<br>14;<br>15,6                        | 1,49;<br>1,63;<br>1,10;<br>1,245                      | 1,54;<br>1,23;<br>1,10;<br>1,25   |
| [7, fig. 22a и приложение С4] (5 ИД) | 1Ч 9,5/11,4    | Топливо – авиакеросин;<br>КИВ 1,0...1,45                                            | 1,191... 1,222                                        | 1,165... 1,215                    |
| [9, fig. 4.6-4.8] (15 ИД)            | 4ЧН 7,9/8,6    | 1500 1/мин;<br>РВГ 39...42%;<br>различное опережение впрыска                        | 1,266... 1,328                                        | 1,21... 1,26                      |
| Такаи [10, fig. 7] (3 ИД)            | 16ЧН 16,5/18,5 | Неустановившийся режим:<br>1400 1/мин;<br>1600 1/мин;<br>1790 1/мин                 | 1,128;<br>1,053... 1,081;<br>1,129... 1,152           | 1,29... 1,34;<br>1,40;<br>1,415   |
| Гаванде и др. [11, fig. 5]           | 6ЧН 11,8/13,5  | 1500 1/мин                                                                          | 1,168                                                 | 1,14... 1,19                      |
| Али и др. [12, fig. 1 и 2] (4 ИД)    | 6ЧН 14/15,2    | Топливо – дизельное (Д) и альтернативное (А1, А2);<br>1200 1/мин;<br><br>1800 1/мин | 1,183 (Д);<br>1,199 (А1);<br>1,257 (А2);<br>1,32 (А1) | 1,24;<br>1,254;<br>1,27;<br>1,242 |
| ОАО «Туламашзавод»                   | 1Ч 8,5/8,0     | 3600 1/мин                                                                          | 1,205                                                 | 1,216                             |

Видно, что практически все они образуют отдельную совокупность, лежащую ниже кривой 1. Поэтому данная совокупность аппроксимирована более простой степенной зависимостью:  $\lambda \approx \lambda^{*1,1}$  (линия 2). Это объясняется тем, что на всех ИД из этой группы (а также на ИД дизелей ТМЗ-450Д и вихрекамерного 4Ч 8,5/11 [4]) наблюдалось заметное запаздывание пика давления заряда по отношению к верхнему положению поршня ( $\varphi = 0$ ).



**Рис.1 Регрессионная зависимость между степенями повышения давления при сгорании  $\lambda$  и  $\lambda^*$  (а) и её сопоставление с данными [9] (б):** точки п [1],  $\Delta$  [2], х [3], с [4], к [5], ш [6], s [7], Е [8]; т - дизель ТМЗ-450Д; разные положения буквы Р соответствуют различной интенсивности рециркуляции выпускных газов (39...42 %); 1 - зависимость (1); 2 - функция  $\lambda^{*1,1}$ .

Зависимость (1) непригодна для определения  $\lambda$  в двух случаях: если максимум давления при сгорании достигается, когда поршень слишком близок к верхнему положению (например, при достаточно раннем впрыске топлива); если, наоборот, интенсивное сгорание начинается уже после ухода поршня из верхнего положения.

Показатели политропы расширения  $m_2^*$  и  $m_2$  определялись по экспериментальным ИД, опубликованным в работах [1, 6, 7, 9, 10-12], а также ИД дизеля ТМЗ-450Д, предоставленной ОАО "Туламашзавод" (табл. 2), соответственно, с помощью линеаризации кривых расширения в логарифмических координатах и по значениям давлений  $p_z$ ,  $p_b$ . Видно, что

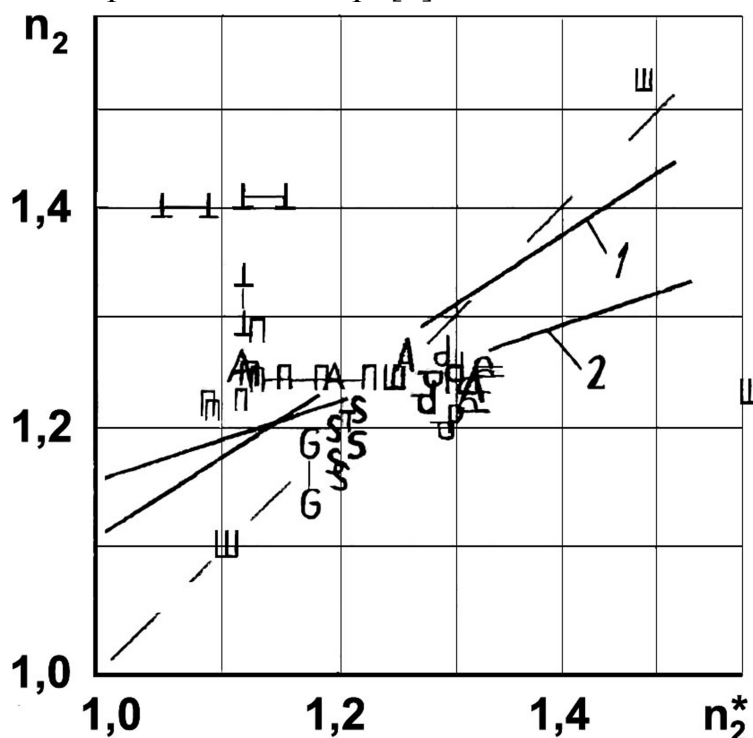
в ряде случаев [6; 10] эти показатели были значительно больше обычно рекомендуемых значений СПП  $n_2$ . Начальное угловое положение кривошипа, соответствовавшее линеаризованному участку кривой расширения, находилось в пределах 15...40 град после ВМТ.

Без учета наиболее отклоняющихся точек, соответствие между значениями  $n_2^*$  и  $n_2$  (рис. 2) с удовлетворительной точностью описывается степенной функцией 2:

$$n_2 = 1,15 n_2^{*0,35}. \quad (2)$$

Коэффициент корреляции между показателем  $n_2$ , найденным с помощью ИД, и расчетным по (2) составил 0,50 для рассмотренной выборки. Погрешности описания совокупности точек рис. 2 (кроме наиболее удаленных) уравнением (1): среднеквадратичная 0,055; относительная среднеквадратичная 4,5 %; пределы относительной погрешности -14 % и +8 %.

В отличие от расположения точек на рис. 1,  $\bar{o}$ , на рис. 2 точки, полученные по данным Пиллаи [9] и обозначенные буквой **Р** (в разных положениях), не образовали отдельной совокупности. Поэтому регрессионная зависимость (2) получена с учётом этих данных. Эта зависимость оказалась непригодна для описания данных Такаи [10] для неустановившегося режима судового дизеля, а также одной из ИД, опубликованных Шароглазовым и др. [6].

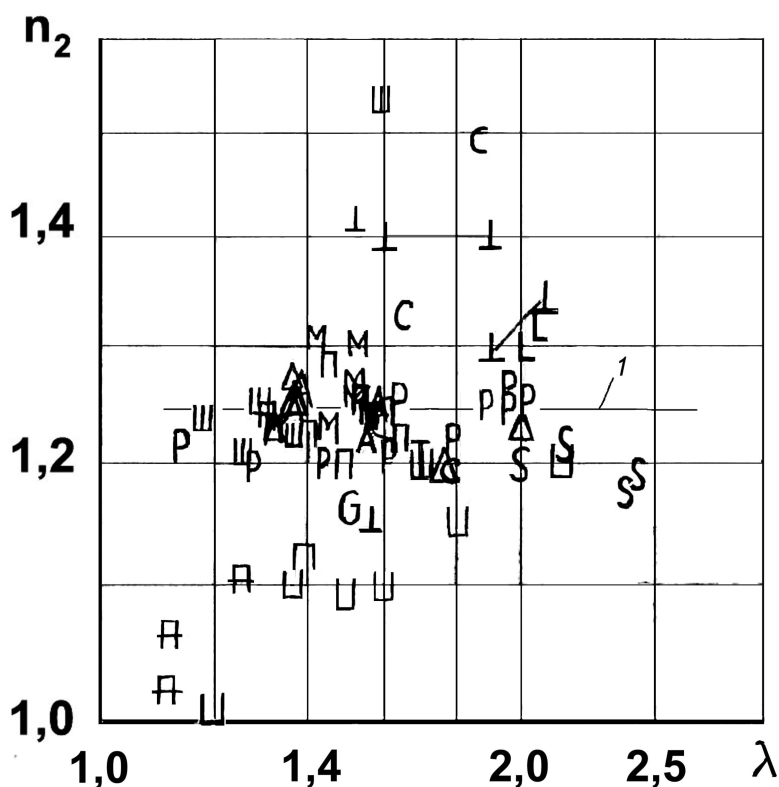


**Рис.2 Регрессионная зависимость между показателями политропы расширения  $n_2^*$  и  $n_2$ :**

обозначения, как на рис. 1, а также точки **Р** [9],  $\perp$  [10], **Г** [11], **А** [12];  
**1** – без учёта точек **Р** [9]; **2** – по формуле (2).

Значения фактического показателя политропы  $n_2^*$  были также получены из неполных ИД, опубликованных в работах Семина [13] (испытывался дизель 1Ч 8,6/7,0 со степенью сжатия 20,3 при частотах вращения 1000... 4000 1/мин; точки **М**) и Лупула [14] (двигатель 1Ч 8,0/8,9, при впрыске н-гептана во впускные каналы и частоте вращения 1000 1/мин, работал в режиме самовоспламенения рабочей смеси; точки **Л**). Взаимосвязь фактических значений показателя политропы  $n_2^*$  и отношения давлений  $\lambda^*$ , как следовало из расположения точек на построенном графике (не показан), не обнаружила определённой зависимости между ними. Так, при  $\lambda^* = 1,0...1,1$  фактический показатель  $n_2^*$  изменялся в пределах 1,05...1,6. Основное же количество точек располагалось между ординатами  $n_2^* = 1,1$  и 1,3 для исследованного интервала  $\lambda^* = 1,0...2,1$ .

Это же можно сказать о взаимосвязи номинальных значений показателя политропы расширения  $n_2$  и СПД  $\lambda$ . Хотя на рис. 3 некоторые точки показывают тенденцию к более низким и высоким значениям  $n_2$  (соответственно, при  $\lambda = 1,1...1,6$  и  $1,6...1,8$ ), всё же, значительное большинство точек группируется между ординатами  $n_2 = 1,2$  и 1,3 для исследованного интервала  $\lambda = 1,2...2,2$ . Ординаты точек **М**, **Л**, **с**, **Δ** на рис. 3 найдены расчётом по зависимости  $I$  (рис. 2), и потому немного завышены.



**Рис.3 Характер взаимосвязи между номинальными значениями показателя политропы расширения и степени повышения давления:** обозначения, как на рис. 1 и 2; точки [1] ■ при  $p_k = 130... 290$  кПа; X при  $p_k = 310... 720$  кПа;  $I$  – среднее значение  $n_2 \approx 1,24$ .

Таким образом, несмотря на предположение Д. А. Портнова [1] о наличии тренда во взаимосвязи  $n_2$  и  $\lambda$ , характеризующегося слабым возрастанием СПП расширения при увеличении СПД, эта тенденция оказалась слишком слабой по отношению к факторам, вызывающим рассеивание точек на графике рис. 3. До накопления дополнительной информации по данному вопросу (например, с помощью моделирования рабочего цикла [5]), разумнее пренебречь указанной тенденцией и выбирать СПП расширения в интервале  $n_2 = 1,2 \dots 1,3$ .

### **Библиографический список**

- 1 Портнов Д. А. Быстроходные турбопоршневые двигатели с воспламенением от сжатия. Теория, рабочий процесс и характеристики / Д. А. Портнов. – М.: Машгиз, 1963. – 640 с.
- 2 Вырубов Д. Н. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей / Д. Н. Вырубов [и др.]; под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1983. - 372 с.
- 3 Ханин Н. С. Автомобильные двигатели с турбонаддувом / Н. С. Ханин [и др.] - М.: Машиностроение, 1991. - 336 с.
- 4 Семенов Б. Н. Рабочий процесс высокооборотных дизелей малой мощности / Б. Н. Семенов [и др.] - Л.: Машиностроение, 1990. - 240 с.
- 5 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.
- 6 Шароглазов Б. А. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов / Б. А. Шароглазов [и др.] - Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2004. - 344 с.
- 7 Sanchez T. A. F. Experimental study of a kerosene fuelled internal combustion engine : Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica / T. A. F. Sanchez ; Instituto Superior Técnico. - 2008. - 68 p.
- 8 Elkotb M. M. Spray modelling for multifuel engines : First annual technical report / M. M. Elkotb ; European Research Office U.S. Army. - London, 1980. – 78 p.
- 9 Pillai R. R. Efficiency Analysis of Varying EGR Under PCI Mode of Combustion in a Light Duty Diesel Engine : Thesis... Master of Science / R. R. Pillai ; Texas A&M University.- 2008. – 152 p.
- 10 Takai M. Stroke by stroke measurements and analysis of cylinder pressure on board / M. Takai // Proceedings 7<sup>th</sup> Int. Symp. Marine Engineering, Tokyo, October 24-28, 2005. – Tokyo, 2005. – 6 p.



11 Gawande S. H. Cylinder Imbalance Detection of Six Cylinder DI Diesel Engine Using Pressure Variation / S. H. Gawande [и др.] // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2010. - Vol. 2(3). – P. 433-441.

12 Ali Y. In-Cylinder Pressure Characteristics of a CI Engine Using Blends of Diesel Fuel and Methyl Esters of Beef Tallow / Ali Y. [и др.] ; University of Nebraska-Lincoln. – S. a. - Journal Series Number 11072. – 26 p.

13 Semin A. Experimental and Computational of Engine Cylinder Pressure Investigation on the Port Injection Dedicated CNG Engine Development / Semin A. [и др.] // Journal of Applied Sciences. – 2010. – Vol.10 (2). – P. 107-115.

14 Lupul R. A. W. Steady State and Transient Characterization of a HCCI Engine with Varying Octane Fuel : Thesis... Master of Science / R. A. W. Lupul ; University of Alberta. – Edmonton, 2008. – 194 p.

*A. B. Stefanovsky*

*About interrelation of real and rated values of parameters of processes of the operating cycle of diesel engines*

*Interrelation of real and rated values of the expansion polytropic index and the rate of increase of pressure in the operating cycle of diesel engines is considered. Regression models allowing approximate assessment of the rated value on basis of the corresponding real one derived from an experimental indicator diagram are obtained.*