

**ПРОДОВЖЕННЯ РЕСУРСУ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ УСТАНОВКОЮ ПОРШНІВ  
З КОРУНДОВИМ ШАРОМ**

*В.В. Шпаковський*

У статті приводиться аналіз результатів випробувань літака Z-37 Chemelak з авіаційним двигуном AI-14M з корундовим шаром на робочих поверхнях поршнів. Установка поршнів з корундовим шаром дозволила поліпшити експлуатаційні характеристики літака: на 20% збільшилася швидкість обертання гвинта на номінальному режимі, на 15°C – 22 °C знизилася температура масла у всіх циліндрах, на 18 м зменшилася довжина пробігу при зльоті.

**PROLONGATION OF THE RESOURCE OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE BY INSTALLATION  
OF PISTONS WITH CORUNDUM LAYER**

*Shpakovskyy V. V.*

In a paper the analysis of results of trials Z-37 Chemelak with corundum a layer on working surfaces pistons aviation engine AI-14M is presented. Installation of pistons with corundum layer has allowed to improve operating performances of the plane: speed of rotation of the screw increased more than by 20 % on a nominal regime, on 15°C - 22 °C the oil temperature in all cylinders has decreased, the run-length was decreased more than by 18 m at flight.

УДК 006:536.7

*В.Д. Зонов*

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КРИТЕРИЯ ПРИРАБОТКИ  
ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ ПРИ  
ЗАВОДСКИХ ОБКАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЯХ**

*Приведена математическая модель критерия стабилизации расхода топлива, оценивающего качество приработки цилиндропоршневой группы (ЦПГ) в реальном времени обкаточных испытаний тепловозных дизелей на раме тепловоза. Дана оценка влияния на критерий стабилизации расхода топлива внезапности включения-отключения вспомогательного оборудования, соединённого с коленчатым валом двигателя через клиноременную передачу и редуктор с компрессором и вентиляторами водяного и воздушного охлаждения. Отмечено, что математическое моделирование внезапности включения-отключения, проведенное на основе закона нормального распределения, не выявило существенного влияния на критерий стабилизации расхода топлива, с помощью которого производилась оценка качества приработки ЦПГ.*

**Введение**

При проведении заводских обкаточных испытаний дизель-генераторов на раме тепловозов возникает проблема выбора критерия качества приработки пары трения поршневое кольцо-гильза цилиндра на каждом обкаточном режиме испытаний в реальном масштабе времени. Проблема выбора осложняется тем, что режимы, на которых происходит основная приработка цилиндропоршневой группы (ЦПГ), – ненормальные ( $n=300\text{min}^{-1}$  -  $n=450\text{min}^{-1}$ ), отличаются низкими индикаторными показателями рабочего процесса. Причиной низких индикаторных показателей принято считать неустойчивый процесс топливоподачи, характеризующийся пропусками впрыска топлива и неравномерностью впрыскиваемого топлива по циклам и цилиндрам. В результате, в работающих цилиндрах на ненормальных режимах постоянно происходят перераспределения мощности при установленной нагрузке обкаточного режима. Учитывая данный фактор, становится понятным стремление к выбору критерия качества приработки пары трения поршневое кольцо-гильза цилиндра ЦПГ в реальном времени обкаточных испытаний.

Выбор критерия должен обеспечить методологию неразрушающего контроля качества приработки ЦПГ в реальном времени на всех обкаточных режимах испытаний тепловозных дизелей на раме тепловоза. Применение критерия, обеспечивающего методологию неразрушающего контроля качества приработки ЦПГ, является основой создания сокращённой энергосберегающей технологии заводских обкаточных испытаний.

**Анализ ранее проведенных исследований и постановка задачи.**

Анализ качества приработки пары трения поршневое кольцо-гильза цилиндра ЦПГ тепловозных дизелей на основных, ненормальных обкаточных режимах показал, что основное влияние на приработку оказывает процесс топливоподачи, характеризующийся пропусками впрыска и неравномерностью впрыскиваемого топлива по циклам и цилиндрам. Дополнительно, оказывает влияние и фактор внезапного включения – отключения вспомогательного оборудования: компрессора, вентиляторов основного и дополнительного контуров водяного охлаждения дизель-генератора, вентиляторов охлаждения тяговых двигателей.

Из литературных источников известно, что приведенные факторы весьма негативны и их влияние (на протяжении всего жизненного цикла), до настоящего времени недостаточно полно изучено.

Существующая практика оценки качества приработки ЦПГ тепловозных дизелей в заводских и деповских условиях основана на методах разрушающего контроля, который сам по себе не только малоэффективен, но требует больших материальных затрат.

Использовался рядом исследователей и метод контроля качества на базе выборочных измерений расхода топлива. Однако, в этом случае учёт влияния включения-выключения вспомогательного оборудования, на величину расхода топлива не производился.

Как показала практика, применяемые методы не позволяют дать точную оценку качества приработки зеркала ЦПГ по характеру изменения величин расхода топлива в реальном масштабе времени.

#### Результаты проведенных исследований.

Математическая модель критерия качества приработки ЦПГ создавалась на основе работ [1, 2, 3, 4, 5], позволивших обосновать теорию устойчивого процесса топливоподачи во всём диапазоне частот вращения и нагрузки тепловозных дизелей. Дальнейшее развитие теории подтверждено патентом на форсунку специальной конструкции [6], которая на практике обеспечила устойчивый закон топливоподачи на всех режимах работы тепловозных дизелей.

Устойчивый закон топливоподачи, реализованный форсунками специальной конструкции, позволил обосновано подойти к математическому моделированию критерия, оценивающего качественную сторону приработки ЦПГ дизеля, как на станции испытания дизелей, так и раме тепловоза, в реальном времени.

Программное обеспечение математической модели реализовано в сертифицированном приборе измерения расхода топлива АК-ДТ 0,5, который позволяет фиксировать момент стабилизации расхода топлива, выбранного нами в качестве критерия стабилизации расхода топлива ( $K_{ge}^{ct}$ ), в реальном времени на каждом обкаточном режиме.

Выбранный критерий позволил обеспечить и метод неразрушающего контроля качества приработки ЦПГ в реальном масштабе времени на каждом обкаточном режиме испытаний.

Выбранный критерий, подтвердив свою эффективность на станции испытания дизелей, потребовал дополнительного математического моделирования и доработки программного обеспечения, учитывающего внезапность и периодичность

включения-отключения вспомогательного оборудования дизелей на раме тепловоза, которое ранее никогда не рассматривалось.

Математическое моделирование включения-отключения вспомогательного оборудования и их влияния на критерий ( $K_{ge}^{ct}$ ) стабилизации расхода топлива производилось на основе закона нормального распределения.

При этом математическая модель оптимизировалась с учётом выбора режимов сокращённых обкаточных испытаний. Программное обеспечение разработанной математической модели реализовано в рамках неразрушающего контроля качества приработки ЦПГ в реальном времени испытаний.

При разработке математической модели особую трудность создавал аппарат контроля и учёта внезапных по продолжительности ( $t_{пр}$ ) включения-отключения вентилятора охлаждения воды основного контура ( $t_{в.о.к}$ ) и тормозного компрессора ( $t_{тк}$ ).

Для этого случая влияние на критерий стабилизации расхода топлива имеет вид:

$$K_{ge}^{ct} = t_{и} + \frac{\kappa \cdot r}{r - f_{реж}} (t_{в.о.к} + t_{т.к} + t_{пр}), \quad (1)$$

где  $t_{и}$  – время проведения обкаточных испытаний;  $\kappa$  – плотность режимов обкаточных испытаний;  $r$  – время обкаточного режима;  $f_{реж}$  – часть времени работы дизеля при внезапном включении-выключении вспомогательного оборудования.

Увеличение длительности включения-выключения во время полезного использования  $t_{и}$  нежелательно, так как длительность  $t_{в.о.к}$  и  $t_{т.к}$  влияет на  $K_{ge}^{ct}$ .

В процессе исследований было принято, что закон распределения определяющего параметра (ОП) внезапного включения-выключения различного вспомогательного оборудования является функцией внезапной периодичности ОП. При увеличении длительности испытаний увеличивается объём информации о ходе влияния ОП, а, следовательно, уменьшается степень случайности процесса. Для выявления зависимости ( $K_{ge}^{ct}$ ) стойкости ОП от длительности внезапного включения-выключения аппроксимирована гиперболическая зависимость

$$\sigma_V = \varphi(t_{пр}) = \frac{1}{p + q_{tm.к}}, \quad (2)$$

где  $q$  – коэффициент, характеризующий скорость убывания дисперсии

$$p = \frac{1}{\sigma(0)}. \quad (3)$$

В этом случае зависимость  $K_{ge}^{ct}$  от длительности включения-выключения вспомогательного оборудования принимает вид:

$$K_{ge}[\varphi(t_{np})] = \frac{S_0 - S_{кр}}{V_2[\varphi(t_{т.к})]}, \quad (4)$$

где  $S_0$  и  $S_{кр}$  – соответственно, начальное и критическое значения ОП;  $V_2$  – верхняя граница скорости изменения ОП.

Таким образом, задача сводится к отысканию зависимости внезапного включения-выключения вспомогательного оборудования применительно к различным законам плотности разделения скорости изменения ОП.

В случае равномерного закона плотности распределения скорости изменения ОП математическое ожидание и дисперсия имеют вид:

$$m_V = \frac{1}{2}(V_1 + V_2), \quad (5)$$

$$\sigma_V = \frac{V_2 - V_1}{2\sqrt{3}}, \quad (6)$$

где  $V_1$  – нижняя граница скорости изменения ОП.

Учитывая, что равномерный закон является симметричным и длительность внезапного включения-выключения не изменяет положение математического ожидания  $m_V$ , можно записать

$$\tau = \frac{S_0 - S_{кр}}{m_V + \sqrt{3} \frac{1}{p + qt_{np}}}. \quad (7)$$

Равенство (7) приводится к виду

$$\tau = \Theta \frac{c_1 + b_1 t_{np}}{c'_1 + b_1 t_{np}} \quad (8)$$

$$c_1 = m_V p; \quad \frac{1}{p} = \sigma_V; \quad \Theta = \frac{S_0 - S_{кр}}{m_V}, \quad b = m_V q,$$

$$c'_1 = c_1 \sqrt{3}.$$

Аналогично в случае закона Симпсона при

$$m_V = \frac{1}{2}(V_1 + V_2); \quad (9)$$

$$\sigma_V = \frac{V_1 + V_2}{2\sqrt{6}}; \quad (10)$$

$$\tau = \Theta \frac{c_1 + b_1 t_{np}}{c'_1 + b_1 t_{np}}, \quad (11)$$

$$c'_1 = c_1 + \sqrt{6}$$

$t_{np} = 0$  для (11) справедливо

$$\tau = \Theta \frac{c_1}{c'_1}. \quad (12)$$

Кривая (11) представляет собой равнобочную гиперболу, отнесенную к асимптотам, центр симметрии которой смещен в точку с координатами

$$\left(-\frac{c_1}{c'_1}, \Theta\right).$$

По закону Симпсона получается аналогичное выражение с координатами центра симметрии

$$\left(-\frac{c_1}{c'_1}, \Theta\right).$$

$$\tau = \frac{S_0 - S_{кр}}{m_V} \cdot \frac{c_1}{c'_1}. \quad (13)$$

На рис. 1, 2 представлены зависимости  $\tau = f(t_{np})$ , построенные по выражениям (8) и (11) при значениях стойкости ( $K_{ge}^{cm}$ ) и продолжительности внезапного включения-выключения ОП.

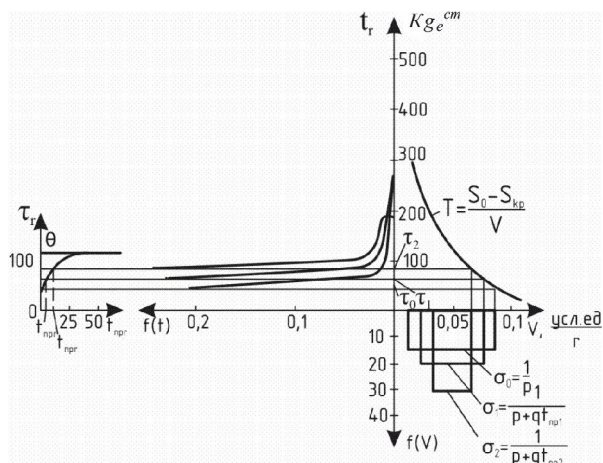


Рис. 1. Зависимость между стойкостью ( $K_{ge}^{cm}$ ) и продолжительностью внезапного включения-выключения различного оборудования при равномерной плотности распределения скорости изменения ОП

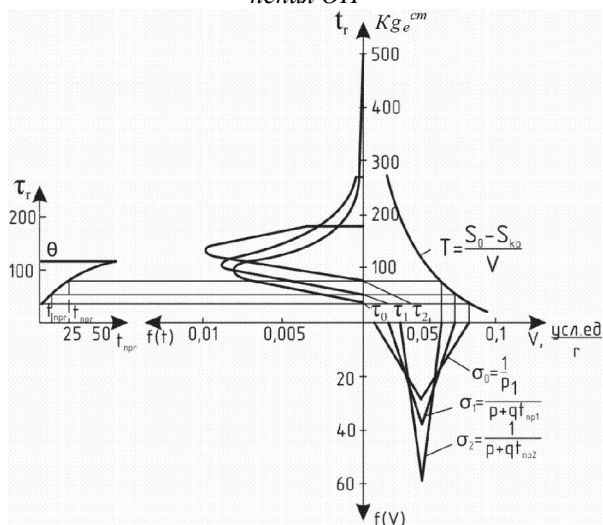


Рис. 2. Зависимость между стойкостью ( $K_{ge}^{cm}$ ) и продолжительностью внезапного включения различного оборудования при плотности распределения скорости изменения ОП по закону Симпсона

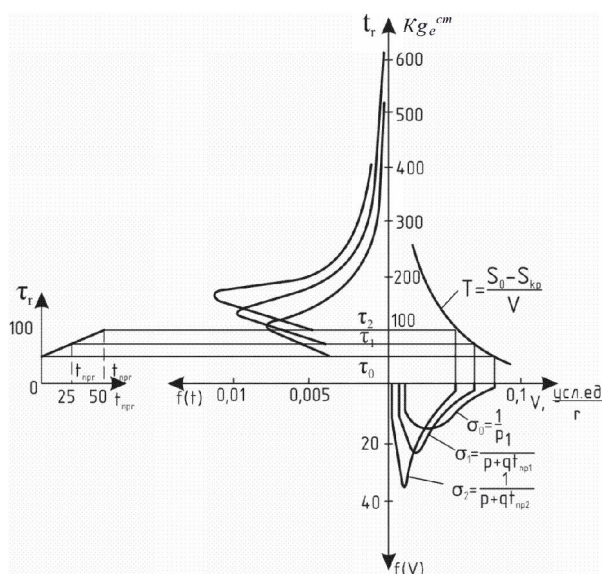


Рис.3. Зависимость между стойкостью ( $K_{ge}^{cm}$ ) и продолжительностью внезапного включения различного оборудования при плотности изменения скорости изменения ОП по закону Вейбулла

Анализ характера зависимости (между стойкостью выбранного критерия и продолжительностью включения-выключения различного оборудования), проведенного в рамках нижеприведенных формул

$$S_0 - S_{кр} = 5 \text{ усл. ед.}; V_1 = 0,01 \frac{\text{усл. ед.}}{\text{ч}};$$

$$V_2 = 0,08 \frac{\text{усл. ед.}}{\text{ч}}$$

показал, что с увеличением длительности внезапного включения-выключения различного оборудования при принятой зависимости  $\tau = f(t_{пр})$  стойкость асимптотически приближается к параметру  $\Theta \cdot (\Theta = 110\text{ч})$ .

В случае усеченного распределения Вейбулла, являющегося асимметричным распределением, уменьшение дисперсии в результате внезапного включения-выключения оборудования влечет за собой уменьшение математического ожидания, вследствие чего точное аналитическое выражение зависимости стойкости от внезапного включения-выключения различного оборудования получить трудно. Численный анализ при различных вариациях параметров закона Вейбулла показывает, что зависимость стойкости ( $K_{ge}^{ct}$ ) от внезапного включения-выключения различного оборудования приближенно может быть представлена эмпирическим соотношением

$$\tau[\varphi(t_{пр})] \cong \frac{S_0 - S_{кр}}{V_2} + \kappa' t_{пр}, \quad (14)$$

где  $\kappa' \cong \frac{a \cdot q}{2}$ .

При распределении Релея,  $a=2$ , а при экспоненциальном,  $a=1$ . Зависимость (14) представлена на рис. 3 при  $S_0 - S_{кр} = 5 \text{ усл. ед.}; V = 0,01 \frac{\text{усл. ед.}}{\text{ч}};$

$$V = 0,08 \frac{\text{усл. ед.}}{\text{ч}}; \Theta = 2; q = 2.$$

Зависимость  $t(t_{пр})$  является убывающей функцией от  $t_{пр}[2]$  и может быть аппроксимирована функцией вида

$$t_B = \frac{1}{c_2 + b_2 t_{пр}}. \quad (15)$$

Использование формул (1), (8), (11), (14) и (15) позволяет получить

$$t_{и} = \Theta \frac{c_1 + b_1 t_{пр}}{c_1'' + b_1 t_{пр}} - \frac{\kappa \cdot r}{r - f_{реж}} \left( \frac{1}{c_2 + b_2 t_{пр}} + t_{пр} \right); \quad (16)$$

$$t_{и} = \Theta \frac{c_1 + b_1 t_{пр}}{c_1'' + b_1 t_{пр}} - \frac{\kappa \cdot r}{r - f_{реж}} \left( \frac{1}{c_2 + b_2 t_{пр}} + t_{пр} \right); \quad (17)$$

$$t_{и} = \frac{S_0 - S_{кр}}{V_2} - \frac{aq}{2} - \frac{\kappa \cdot r}{r - f_{реж}} \left( \frac{1}{c_2 + b_2 t_{пр}} + t_{пр} \right); \quad (18)$$

Время полезного использования ( $t_{и}$ ) имеет максимум при  $t_{пр} = t_{пр. опт}$ . Значение  $t_{пр. опт}$  может быть найдено графически или в результате решения уравнений (16) ÷ (18) на экстремум:

$$\frac{dt_{и}}{dt_{пр}} = 0. \quad (19)$$

Уравнения (16), (17) сводятся к алгебраическому уравнению 4-й степени, а уравнение (18) – 2-й степени относительно  $t_{пр. опт}$ .

Так, при значениях  $c_2 = b_2 = 0,04 \frac{1}{\text{ч}}, \kappa = 1$

$$q = 1, S_0 - S_{кр} = 5_{\text{усл. ед.}}; V_1 = 0,01 \frac{\text{усл. ед.}}{\text{ч}}, V_2 =$$

$$\frac{\text{усл. ед.}}{\text{ч}}$$

можно определить, что для случаев (17) и (18)  $\tau_{опт}$  соответственно равны 7,0 ч и 8,2 ч сокращённых обкаточных испытаний.

Следует отметить, что в предлагаемой математической модели критерий стабилизации расхода топлива ( $K_{ge}^{ct}$ ) учитывал оптимальный объем технологических операций, включая, как существующую методологию, так и методологию проведения сокращённых обкаточных испытаний [7].

**Заключение**

Математическое моделирование критерия ста-

билизации расхода топлива и влияния на него внезапности включения-отключения различного вспомогательного оборудования, подтверждает на практике высокую степень точности контроля неразрушающим методом качества приработки цилиндропоршневой группы в реальном времени на каждом обкаточном режиме испытаний тепловозного дизеля.

**Список литературы:**

1. Зонов В.Д. Математическое моделирование и исследование энергетических характеристик топливopодачи в форсунках специальной конструкции / В.Д. Зонов // Межвуз. сб. научн. трудов. – Харьков: УкрГАЗТ, 2005. – Вып. 70. – С. 112-122. 2. Зонов В.Д. Критерий контроля показателя качества энергетических характеристик топливopодачи форсунками специальной конструкции тепловозов / В.Д. Зонов, Н.И. Данько // Научно-практический журнал «Новини науки Придніпров'я». – 2006. - № 1. – С.25-28. 3. Зонов В.Д. Математичне моделювання процесу паливopодачі у форсунках спеціальної конструкції / В.Д. Зонов, С.А. Єроценков, А.Л. Григорьев // Зб.наук.праць/ ХарДАЗТ, – 2001.-Вип.45 -с. 82-88. 4. Зонов В.Д. Анализ причин и определение условий, обеспечивающих герметичность плоского дифференциального клапана форсунки / В.Д. Зонов, Г.Б. Розенблит, А.Л. Григорьев // Двигатели внутреннего сгорания: Вестник ХГПУ. – 1999.-Вып.58 - с.82-91. 5. Зонов В.Д. Прогнозно-математические методы оценки качества энергосберегающих технологий приработки цилиндропоршневой группы тепловозного дизеля / В.Д. Зонов // Вісник інженерної академії України. – № 3-4.– 2007. – с. 124-

129. 6. Пат. на корисну модель № 30267. Форсунка спеціальної конструкції для дизельного та газодизельного процесу / Зонов В.Д. (Україна). – 7F02M45/00; заявл. 27.07.2007; опубл. 25.02.2008, Бюл. №4. 7. Пат.на корисну модель № 47003. Спосіб гарячої обкатки двигуна внутрішнього згорання / Зонов В.Д. (Україна). – F02B79/00 G01M15/04; заявл.04.08.2009, опубл.11.01.2010, Бюл.№1.

**Bibliography (transliterated):**

1. Zonov V.D. Matematicheskoe modelirovanie i issledovanie jenergeticheskikh harakteristik toplivopodachi v forsunkah special'noj konstrukcii / V.D. Zonov // Mezhhvuz. sb. nauchn. trudov. – Har'kov:UkrGAZHT, 2005. – Vyp. 70. – S. 112-122. 2. Zonov V.D. Kriterij kontrolja pokazatelja kachestva jenergeticheskikh harakteristik toplivopodachi forsunkami special'noj konstrukcii teplovozov / V.D. Zonov, N.I. Dan'ko // Naukovo-praktichnij zhurnal «Novini nauki Pridniprov'ja». – 2006. - № 1. – S.25-28. 3. Zonov V.D. Matematichne modeljuvannja procesu palivopodachi u forsunkah special'noi konstrukcii / V.D. Zonov, S.A. Eroshhenkov, A.L. Grigor'ev // Zb.nauk.prac'/ HarDAZT, – 2001.-Vip.45 -s. 82-88. 4. Zonov V.D. Analiz prichin i opredelenie uslovij, obespechivajushhih germetichnost' ploskogo differencial'nogo klapanu forsunki / V.D. Zonov, G.B. Rozenblit, A.L. Grigor'ev // Dvigateli vnutrennego sgoranija: Vestnik HGPU. – 1999.-Vyp.58 - s.82-91. 5. Zonov V.D. Prognozno-matematicheskie metody ocenki kachestva jenergosberegajushhih tehnologij prirabotki cilindroporshnevoj gruppy teplovoznogo dizelja / V.D. Zonov // Visnik inzhenernoi akademii Ukraini. – № 3-4.– 2007. – s. 124-129. 6. Pat. na korisnu model' № 30267. Forsunka special'noi konstrukcii dlja dizel'nogo ta gazodizel'nogo procesu / Zonov V.D. (Ukraina). – 7F02M45/00; zjavl. 27.07.2007; opubl. 25.02.2008, Bjul. №4. 7. Pat.na korisnu model' № 47003. Sposib garjachoї obkatki dviguna vnutrishn'ogo zgorannja / Zonov V.D. (Ukraina). – F02B79/00 G01M15/04; zjavl.04.08.2009, opubl.11.01.2010, Bjul.№1.

Поступила в редакцию 20.06.2014

**Зонов Виктор Дмитриевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры управления эксплуатационной работы Украинской государственной академии железнодорожного транспорта «УкрГАЗТ», e-mail: D\_Zonov@mail.ru

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КРИТЕРІЮ ПРИРОБЛЕННЯ ЦИЛІНДРОПОРШНЕВОЇ ГРУПИ ДИЗЕЛІВ ТЕПЛОВОЗІВ ПРИ ЗАВОДСЬКИХ ОБКАТУВАЛЬНИХ ВИПРОБУВАННЯХ**

**В.Д. Зонов**

Приведена математична модель критерію стабілізації витрати палива, що оцінює якість прироблення пари тертя поршневе кільце-гільза циліндра на станції випробування дизелів і на рамі тепловоза, з урахуванням раптовості включення-відключення допоміжного устаткування тепловоза, при заводських обкатувальних випробуваннях. Приведений вплив раптовості включення – виключення допоміжного устаткування на критерій стабілізації витрати палива.

**MATHEMATICAL MODEL OF RUNNING-IN CRITERION IN THE PISTON-CYLINDER UNIT OF LOCOMOTIVE DIESELS ENGINE DURING FACTORY TESTING**

**V.D.Zonov**

The mathematical model of criterion of stabilizing of fuel consumption, which allow to estimate quality of run in of pair of friction piston ring-shell of cylinder at the station of test of diesels and on the frame of diesel engine is resulted, taking into account the suddenness of including-disconnecting of ancillaries of diesel engine, at factory tests. Influence of suddenness of on-off ancillaries on the criterion of stabilizing of consumption of fuel is resulted.