

References

1. Zevenhoven R., Kilpinen P. Control of pollutants in flue gases and fuel gases. — Espoo : Helsinki University of Technology. Nordic Energy Research Programme. Solid Fuel Committee, February 2004. — Espoo/Turku, Finland.
2. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) (Recast), *Official Journal L334*, 2010, pp. 17–119.
3. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy Pro implementatsiiu Uhody pro Asotsiatsiiu mizh Ukrainoiu ta Yevropeiskym Soiuzom, Yevropeiskym spivtovarystvom z atomnoi enerhii i yikhnimy derzhavamy-chlenamy vid 17 veresnia 2014 r. № 847-r, *Uriadovi kurier*, 08.10.2014 (185). (Ukr.)
4. Integrated pollution prevention and control. Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants. European Commission. Institute for Prospective Technological Studies (Seville), July 2006, 607 p. — Access mode: <http://www.ipts.jrc.ec.europa.eu>.
5. Kohl A.I. Gas purification. Houston : Gulf Publishing Company, 1997, 1403 p.
6. Evans A.P., Miller C., Pouliot S. Operational Experience of Commercial, Full Scale Ammonia-Based Wet FGD for Over a Decade, Coal-Gen 2009, Charlotte, North Carolina, USA, 2009, 19 p.
7. Volchyn I., Iasynetskyi A., Przybylski W., Maicher M. Semy-Dry Delsulphurisation for Coal Boilers, *Proc. of 7-th International Conference on Clean Coal Technologies (CCT2015)*, Krakow, Poland, 17–21 May, 2015. IEA Clean Coal Centre. — Access mode: <http://cct2015.org/ibis/CCT2015/home>
8. Srivastava R.K., Jozewicz W. Flue gas desulphurisation: the state of the art, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2001.
9. Volchyn I.A., Karatsuba A.S., Kolomiets A.M. Matematychnie modeliuvannia napivsuchoho metodu sirkoochyshchennia [Mathematical Modeling of Semi-Dry Method for Desulfurization], *Jenerhetyka ta elektryfikatsiia [Energetics and Electrification]*, 2005, (8), pp. 45–49 (Ukr.)
10. Kolomiets O.M., Yasynetskyi A.O. Modeliuvannia napivsuchoho amiachnoho metodu vydalennia dioksydu sirky [Modeling of Semi-Dry Ammonia Method of Removing of Sulfur Dioxide], *Jenerhotekhnologii i resursozberehenije [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2014, (5–6), pp. 69–77. (Ukr.)
11. Volchyn I., Karatsuba A., Rudenko L. Features of use of limestone and lime in wet desulphurisation technology, *Research Journal of Engineering Sciences*, 2014, 3, Iss. 8, pp. 1–6.
12. Vance J.L., Peters L.K. Aerosol Formation Resulting from the Reaction of Ammonia and Sulfur Dioxide, *The Journal of Industrial & Engineering Chemistry*, 1976, 15 (3), pp. 202–214.
13. Hartley E.M., Matleson Sulfur Dioxide Reactions with Ammonia in Humid Air, *The Journal of Industrial & Engineering Chemistry*, 1975, 14 (1), pp. 67–78.
14. Landreth R., de Pena R.G., Helcklen J. Thermodynamics of the Reaction of Ammonia and Sulfur Dioxide in the Presence of Water Vapor, *The Journal of Physical Chemistry*, 1975, 79 (17), pp. 1785–1796.

Received June 22, 2015

УДК 621.436.2

Пылёв В.А., докт. техн. наук, **Клименко А.Н.,** аспирант**Национальный технический университет «ХПИ», Харьков**ул. Фрунзе, 21, 61002 Харьков, Украина, e-mail: dvs@kpi.kharkov.ua**Улучшение эколого-экономических показателей дизеля с учетом модели эксплуатации транспортного средства**

Проведен анализ возможности комплексного улучшения показателей токсичности и топливной экономичности автомобильного и тракторного дизелей при одновременном поддержании достаточного уровня надежности их конструкции за счет использования систем автоматического регулирования теплового состояния. На основе данных проведенного моторного эксперимента решена компромиссная задача по оптимизации эколого-экономических показателей на каждом режиме заданной модели эксплуатации двигателей. В качестве управляющих факторов предложено использовать режимные параметры — частоту вращения коленчатого вала и нагрузку двигателя, в качестве управляемых — угол опережения подачи топлива и температурное состояние поршней. Выполнена оценка экологического эффекта от предложенных мероприятий за период эксплуатации дизеля. Предложены характеристические карты управления системой автоматического регулирования теплового состояния поршней дизеля 4ЧН12/14. *Библ. 17, рис. 2, табл. 3.*

Ключевые слова: автоматическое регулирование, экономичность двигателя, дымность, твердые частицы, оксиды азота, модель эксплуатации, оптимизация.

Особенностью современного этапа развития двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является повышение уровня их экологизации как составляющей глобальной проблемы преодоления экологического кризиса. При этом известные пути экологизации ДВС противоречат проблематике сокращения непроизводственных потерь энергетических ресурсов, обеспечению ресурсной прочности теплонапряженных деталей. Указанное явление особенно актуально для ДВС транспортных машин, работающих в широком диапазоне постоянно изменяющихся нагрузок.

Учитывая то, что двигатели ДВС в ближайшие десятилетия будут оставаться основными установками по выработке механической энергии, их совершенствование в значительной степени будет определять развитие мобильных энергоустановок в Украине и мире.

Указанная тенденция увеличивает техногенную нагрузку на окружающую среду, интенсифицирует использование сырьевых невозобновляемых и возобновляемых природных ресурсов и влияет на эффективность многих отраслей экономики и качество жизни человека. В связи с этим общее направление развития и совершенствования ДВС связано с исследованиями новых эффективных подходов по комплексному достижению прогрессивных показателей их экологичности, экономичности, ресурсной прочности при постоянном росте удельной мощности двигателей транспортных машин.

Общепринятой мировой тенденцией дальнейшего развития ДВС является внедрение систем автоматизированного управления их параметрами на основе микропроцессорной техники. При этом наиболее перспективное направление совершенствования ДВС предусматривает создание систем, позволяющих комплексно решать задачи оптимизации топливной экономичности, эмиссии вредных веществ, надежности и других критериев качества конструкции.

В рамках описанной выше тенденции повышение эффективности ДВС, в том числе подразумевающее улучшение экологических и экономических его показателей, связано с рациональным регулированием теплового состояния двигателя, в частности, теплового состояния поршней (ТСП) как одной из наиболее теплонапряженных его деталей.

Цель работы — исследование возможности комплексного улучшения показателей топливной экономичности и экологичности транспортного дизеля при одновременном поддержании достаточного уровня надежности конструкции

на основе применения регулируемого масляного охлаждения его поршней.

Анализ литературы

Повышение уровня форсирования ДВС существенно влияет на ресурс деталей камеры сгорания, в частности, поршня. Обеспечение достаточного уровня надежности поршней в большинстве случаев достигается применением принудительного масляного их охлаждения [1, 2]. Однако анализ технической литературы [3–8] показывает нецелесообразность применения принудительного масляного охлаждения поршней во всем диапазоне эксплуатационных режимов дизеля вследствие ухудшения показателей ДВС на частичных, неноминальных нагрузках. Так, в работах [3, 4] выявлено увеличение уровня термических напряжений в теле поршня при переходных процессах по причине переохлаждения его на режимах частичных нагрузок. Также снижение надежности конструкции имеет место вследствие ускоренного старения масла, что связано с применением нерегулируемого охлаждения поршней [5, 6]. Кроме того, нерегулируемое охлаждение поршней и связанное с этим их переохлаждение на неноминальных нагрузках приводит к увеличению относительных тепловых потерь в стенке камеры сгорания, а следовательно, к ухудшению эколого-экономических показателей ДВС [3, 5, 7].

В работе [3] для нивелирования перечисленных негативных явлений была предложена концепция реального автоматического регулирования ТСП, предполагающая повышение температуры поршня на частичных режимах работы ДВС при неизменном уровне его температуры на тяжелых режимах. Реализация такого регулирования на тракторном дизеле 6ЧН13/11,5 позволила на частичных режимах снизить дымность отработавших газов (ОГ) на 20–50 %, расход топлива — на 1–3 %, а также повысить на 30 % долговечность поршней.

Результаты работы [7] показали, что отключение охлаждения поршней транспортного дизеля типа ЧН21/21 на режимах холостого хода и малых нагрузок приводит к улучшению топливной экономичности и снижению содержания продуктов неполного сгорания в ОГ. При этом несколько повысилась концентрация NO_x . Полученный эффект авторы объясняют интенсификацией процессов испарения топлива и смесеобразования, сокращением периода задержки воспламенения, вызванными повышением температуры камеры сгорания.

Известные исследования эффективности регулирования ТСП транспортных дизелей [5, 9] также подтверждают положительное влияние

последнего на показатели экологичности и топливной экономичности.

В двигателестроении на современном этапе его развития появляется возможность усовершенствования регулирования ТСП посредством перехода к системам, основанным на внедрении микропроцессорной техники и электронного управления процессом регулирования. Подтверждением этого служат перспективные разработки ведущих мировых фирм-производителей ДВС — Delphi Technologies [10] и Volkswagen [11].

Однако применяемые в перечисленных работах алгоритмы улучшения показателей экологичности, топливной экономичности и надежности двигателей авторами не раскрываются. Остаются неизвестными теоретические основы регулирования ТСП современных и перспективных ДВС, а также принципы и способы учета управляющих параметров.

Таким образом, актуальными остаются вопросы, связанные с исследованием эффективности применения автоматического регулирования ТСП с целью улучшения эколого-экономических показателей современных ДВС, а также повышения надежности их конструкции. Актуальность и необходимость данного направления исследований определяются постоянно ужесточающимися требованиями к экологичности современных транспортных средств.

Оценка эффективности применения автоматического регулирования ТСП транспортных ДВС

С целью получения исходных данных, необходимых для решения поставленной задачи, был проведен моторный эксперимент с использованием опытного образца автотракторного дизеля типа 4ЧН12/14 [12]. Для регистрации необходимых показателей (тепловое состояние деталей ДВС, расход топлива, экологические показатели) лабораторный стенд был оснащен измерительными комплексами с применением микропроцессорной техники и ЭВМ. Возможность регулирования ТСП обеспечивалась установкой разработанных запорных органов в форсунки струйного масляного охлаждения.

Испытания повторялись при включенном и выключенном масляном охлаждении поршней с варьируемыми в пределах от 18 до 24 градусов поворота коленчатого вала (гр.п.к.в.) значениями угла опережения подачи топлива Θ . При этом экспериментальные режимы выбирались с учетом обеспечения возможности проведения регрессионного анализа результатов эксперимента.

Результаты экспериментального исследования показали, что отключение охлаждения поршней приводит к выравниванию температур по телу поршня, что положительно влияет на его ресурсную прочность. Это положение было подтверждено в расчетно-экспериментальном исследовании [13], которое показало, что применение регулирования теплового состояния поршней повышает в 2 и более раз их ресурсную прочность.

Данные натурального эксперимента свидетельствуют о том, что при увеличении температуры камеры сгорания, сопутствующем отключению масляного охлаждения поршней, происходит снижение расхода топлива, особенно на частичных режимах, когда эффект достигает 28 г/кВт·ч. В случае регулирования интенсивности масляного охлаждения за счет, например, управляемой производительности масляного насоса эффект по расходу топлива возрастет в результате уменьшения механических потерь на привод насоса.

Результаты экологической части экспериментального исследования представлены на рис.1, где исследуемые показатели экологичности ДВС приведены при различных Θ в зависимости от частоты вращения коленчатого вала n и нагрузки двигателя, выраженной параметром среднеэффективного давления p_e .

Из рис.1, а, б видно, что при отключении охлаждения поршней происходит возрастание концентрации NO_x в ОГ дизеля, которая с увеличением Θ и нагрузки, а также при уменьшении n становится существенным.

Одновременно с этим дымность ОГ снижается во всем диапазоне эксплуатационных режимов работы дизеля (рис.1, в, г), и на режиме номинальной нагрузки эффект достигает 11 %. Из рис.1, в, г также следует, что увеличение Θ способствует снижению дымности ОГ во всем эксплуатационном диапазоне.

Таким образом, по результатам проведенного экспериментального исследования получены данные о неоднозначном влиянии на показатели ДВС масляного охлаждения поршней. Повышение температуры деталей камеры сгорания положительно влияет на топливную экономичность и дымность ОГ во всем диапазоне эксплуатационных режимов транспортного средства. При этом максимальный эффект по топливной экономичности имеет место на режимах, близких к холостому ходу, а по дымности — на максимальных нагруженных. Также на частичных режимах выявлено благоприятное влияние указанных мероприятий на надежность конструкции.

Однако уменьшение интенсивности охлаждения поршней в комплексе с увеличением Θ приводит к повышению концентрации NO_x в ОГ на всем диапазоне режимов, а также к снижению ресурсной прочности деталей камеры сгорания на нагруженных режимах.

С учетом вышеизложенного, направление дальнейшего исследования связано с анализом режимов работы транспортного средства с целью определения таких, на которых целесообразно отключение масляного охлаждения поршней при одновременном управлении углом опережения подачи топлива с целью комплексного улучшения показателей ДВС.

Для комплексной оценки качества работы ДВС предложена методика, основанная на поиске оптимального сочетания управляющих факторов для каждого режима модели эксплуатации дизеля. Методика предполагает применение обобщенной функции желательности Харрингтона [14, 15]. Рассмотрены четыре критерия качества ДВС. При этом, согласно рекомендациям [16], для оценки эколого-экономического ущерба от токсических компонентов ОГ дизелей учтены лишь выбросы NO_x и твердых частиц:

$$D = (d_1 d_2 d_3 d_4)^{1/4} \rightarrow 1,$$

где d_1 — частичная функция желательности удельного эффективного расхода топлива g_e ; d_2 , d_3 — частичные функции желательности эмиссии вредных веществ (концентрации NO_x и твердых частиц в ОГ соответственно); d_4 — частичная функция желательности ресурсной прочности конструкции.

В расчетном исследовании использовались данные проведенного эксперимента, при этом концентрация твердых частиц рассчитывалась по экспериментальным значениям дымности ОГ по зависимости Алкидаса [17]:

$$C_{\text{ТЧ}} = 565 \left[\ln \left(\frac{10}{10 - B} \right) \right]^{1,206} \cdot 10^{-6},$$

где B — дымность по шкале Бош.

В качестве критерия ресурсной прочности поршня, являющегося ограничением в процессе регулирования, в работе использовалась расчетная величина накопленных повреждений d_{fs} , вызванных совместным действием процессов усталости и ползучести материала [14]:

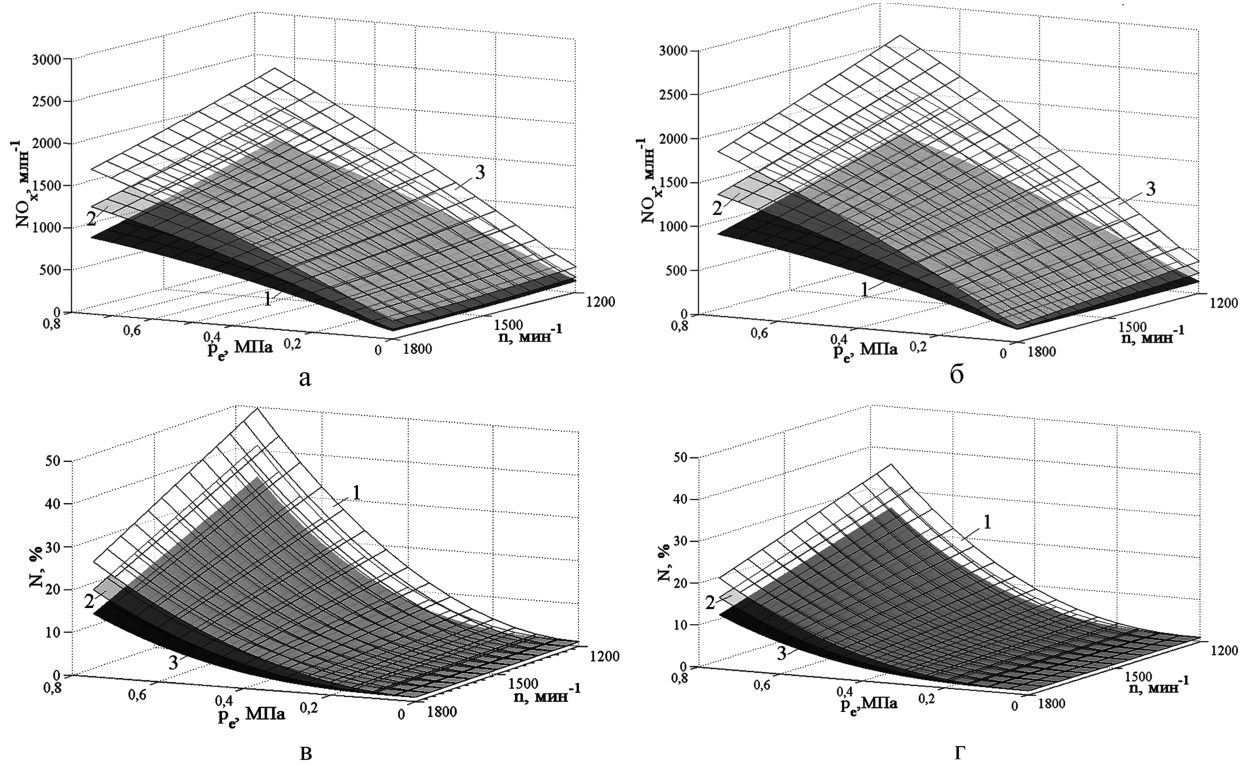


Рис.1. Влияние масляного охлаждения поршней на эмиссию оксидов азота (а, б) и дымность ОГ (в, г) при положениях, когда охлаждение включено (а, в) и выключено (б, г) при разных Θ , гр.п.к.в.: 1 — 18; 2 — 21; 3 — 24.

$$d_{fs} = d_f + d_s = \sum_j \sum_k \frac{1}{N_{fk}} + \frac{1}{U^*} \sum_j \sum_k U_k,$$

где N_{fk} — количество циклов до разрушения материала в условиях k -го цикла нагружения поршня; U^* — критическая величина удельной энергии рассеивания в условиях циклической ползучести; U_k — удельная энергия рассеивания при ползучести в условиях k -го цикла нагружения поршня; j — количество представительных переходных процессов теоретической нестационарной модели эксплуатации двигателя между характерными i -ми стационарными режимами; k — количество одинаковых циклов нагружения характерного j -го переходного процесса.

Связь между частичными функциями желательности и действительными значениями критериев качества определяется зависимостью:

$$d_l = \exp [-\exp (a + b f_l)]; l = 1-4,$$

где f_l — истинное значение параметра качества конструкции.

Значения коэффициентов a и b определяются по полученным ранее экспериментальным данным на основе учета лучшего и худшего значений каждого критерия качества на отдельном исследуемом режиме. При этом для оценки критериев качества, определяющих экономичность и экологичность ДВС (d_1, d_2, d_3), используется традиционная шкала желательности ($d_l = 0,8$ — лучшее значение частичной функции желательности, $d_l = 0,2$ — худшее значение). Для оценки эмиссии вредных веществ, d_2, d_3 , предложено применять общую шкалу желательности с использованием методики приведения выбросов по агрессивности [16]:

$$G_{ВВпр\ m} = A_m G_{ВВм},$$

где $G_{ВВпр\ m}$ — приведенная масса выброса m -го вредного вещества с ОГ дизеля; A_m — показатель относительной агрессивности m -го компонента токсичных выбросов; $G_{ВВм}$ — масса выброса этого компонента.

Для оценки ресурсной прочности поршня применена ступенчатая шкала желательности: $d_4 = 1$ — условия обеспечения ресурсной прочности выполняются, $d_4 = 0$ — не выполняются.

На основании анализа данных проведенного экспериментального исследования при реше-

Таблица 1. Модели эксплуатации дизеля грузового автомобиля [16]

№, № п/п	Дизель грузового автомобиля (шоссе)		
	\bar{n}	\bar{p}_e	\bar{P}
1	0,275	0	0,0306
2	0,415	0,15	0,0096
3	0,415	0,45	0,0048
4	0,415	0,7165	0,0021
5	0,415	0,9165	0,001
6	0,430	1,05	0,0256
7	0,550	0,15	0,0087
8	0,550	0,45	0,0177
9	0,550	0,7165	0,0087
10	0,550	0,9165	0,0068
11	0,550	1,1	0,0718
12	0,685	0,15	0,0112
13	0,685	0,45	0,0456
14	0,685	0,7165	0,0155
15	0,685	0,9165	0,0205
16	0,685	1,1	0,2035
17	0,8125	0,185	0,0113
18	0,8125	0,45	0,05
19	0,8125	0,7165	0,0316
20	0,8125	0,9165	0,0394
21	0,8125	1,1	0,2087
22	0,9375	0,185	0,059
23	0,9375	0,45	0,0335
24	0,9375	0,7165	0,022
25	0,9375	0,9165	0,0273
26	0,915	1,03	0,0824
27	1,015	0,450	0,0015
28	1,0075	0,7165	0,0025

Примечание. \bar{n} и \bar{p}_e — относительные значения частоты вращения коленчатого вала ДВС и нагрузки в узловых точках к номинальным их значениям; \bar{P} — вероятностное распределение полигонов эксплуатационных режимов.

нии компромиссной задачи в качестве управляющих факторов использовались режимные параметры — частота вращения коленчатого вала n и среднеэффективное давление p_e , в качестве параметров регулирования — угол опережения подачи топлива Θ и температурное состояние поршней.

Результаты решения компромиссной задачи в исследовании проверялись с использованием комплексного топливно-экологического критерия ДВС [16]:

$$K_{T\Theta} = 3600 / \left[H_u \frac{\sum_{i=1}^z (G_{Ti} P_i)}{\sum_{i=1}^z (N_{ei} P_i)} \right] \frac{\sum_{i=1}^z (G_{Ti} P_i)}{\sum_{i=1}^z (G_{Ti} P_i) + \sigma f \sum_{i=1}^z \left[G_{Ti} P_i \cdot \sum_{m=1}^N \frac{G_{ВВпр\ m}}{G_{Ti}} \right]},$$

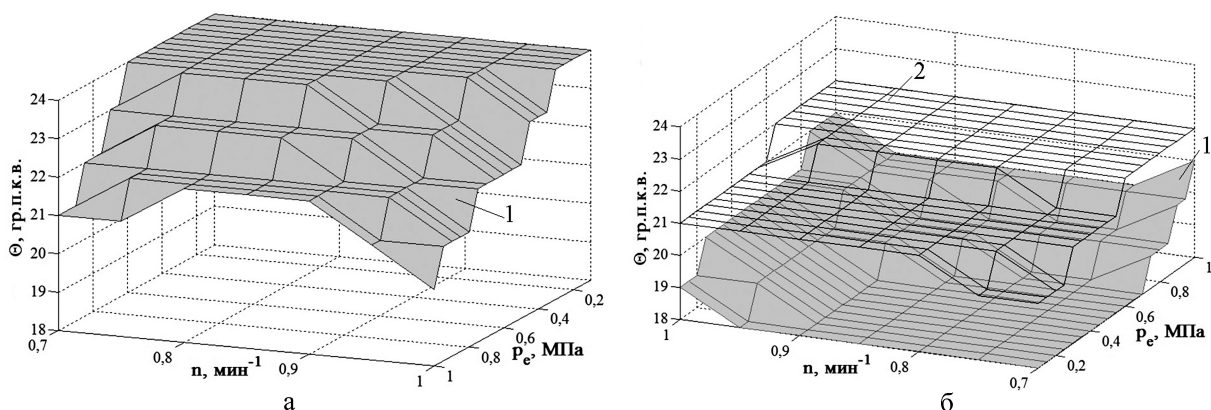


Рис.2. Характеристические карты управления масляным охлаждением поршней (а) и углом опережения подачи топлива (б): 1 – охлаждение выключено; 2 – охлаждение включено.

где P_i – коэффициент значимости каждого представительного стационарного режима на основе обобщения наработки ДВС за срок эксплуатации; H_u – низшая теплота сгорания топлива; N_{ei} – эффективная мощность дизеля на каждом представительном режиме; G_{T_i} – часовой расход топлива на каждом представительном режиме; $G_{ВВпр\ m}$ – приведенная масса выброса m -го вредного вещества с ОГ дизеля; z – количество представительных режимов модели эксплуатации; N – общее количество токсичных компонентов, учитываемых при оценке вредных выбросов с ОГ к окружающей среде; σ – безразмерный показатель относительной опасности загрязнения на различных территориях; f – безразмерный коэффициент, учитывающий характер рассеивания ОГ в атмосфере.

В соответствии с предложенной методикой, расчеты проводились для каждого i -го режима моделей эксплуатации грузового автомобиля при движении по шоссе, а также колесного и гусеничного тракторов (табл.1, 2).

Диапазон эксплуатационных режимов, относительно которых решалась оптимизационная задача, ограничивался диапазоном скоростных и нагрузочных режимов экспериментального исследования. Неучтенными в связи с особенностями моторного стенда были режимы №№1–12 модели автомобильного и режим № 1 тракторного дизеля (см. табл.1, 2). Однако этот факт не повлиял на общий характер результатов исследования, что будет показано ниже.

Расчетное исследование включало в себя анализ различных вариантов совместного управления параметрами регулирования: регулирование ТСП при базовом угле опережения подачи топлива $\Theta = 23$ гр.п.к.в.; управление углом опережения подачи топлива при включенном охлаждении поршней; комплексное управление ТСП и углом опережения подачи

топлива. Искомые оптимумы сравнивались с базовым вариантом ($\Theta = 23$ гр.п.к.в., охлаждение поршней постоянно включено).

Результаты решения оптимизационной задачи, представлены на рис.2. Видно, что масляное охлаждение поршней с увеличением нагрузки P_e целесообразно включать при уменьшении угла Θ (рис.2, а). Ограничивающими

Таблица 2. Модели эксплуатации тракторного дизеля [16]

№.№ п/п	Тракторный дизель			
	\bar{n}	\bar{P}_e	\bar{P}	
			колесный трактор	гусеничный трактор
1	0,350	0	0,154	0,116
2	0,825	0,10	0,020	0,017
3	0,975	0,10	0,034	0,026
4	1,075	0,10	0,096	0,078
5	0,825	0,30	0,027	0,017
6	0,975	0,30	0,046	0,034
7	1,050	0,30	0,060	0,042
8	0,825	0,50	0,032	0,021
9	0,950	0,50	0,035	0,020
10	1,025	0,50	0,085	0,089
11	0,825	0,70	0,026	0,018
12	0,950	0,70	0,034	0,046
13	1,025	0,70	0,090	0,158
14	0,825	0,90	0,024	0,018
15	0,950	0,90	0,036	0,026
16	1,000	0,90	0,099	0,156
17	0,825	1,10	0,012	0,011
18	0,950	1,10	0,033	0,062
19	0,825	1,15	0,006	0,016

Примечание. \bar{n} и \bar{P}_e – относительные значения частоты вращения коленчатого вала ДВС и нагрузки в узловых точках к номинальным их значениям; \bar{P} – вероятностное распределение полигонов эксплуатационных режимов.

Таблица 3. Эффективность применения вариантов совместного управления параметрами регулирования

Вариант	$K_{TЭ}$	G_T , т/экспл	G_{NOx} , т/экспл	$G_{TЧ}$, т/экспл	$G_{ВВ пр}$, т/экспл
Базовый Θ без регулирования ТСП	0,006/0,006/0,006	90,8/71,3/88,2	316,5/222,1/277,7	48,8/15,8/21,1	365,3/237,9/298,8
Регулирование ТСП при неизменном Θ	0,006/0,006/0,006	90,4/70,9/87,9	322,6/227,6/282,2	48,1/15,2/20,6	370,7/242,8/302,8
Регулирование Θ без регулирования ТСП	0,007/0,007/0,007	91,3/71,8/88,8	290,0/196,8/248,5	54,7/18,6/24,7	344,6/215,4/273,2
Комплексное управление Θ и ТСП	0,007/0,008/0,008	91,1/71,7/88,7	264,5/180,1/228,8	50,7/17,3/23,0	315,2/197,4/251,8

Примечание. Автомобильный дизель/дизель колесного трактора/дизель гусеничного трактора.

факторами при этом являются увеличение выбросов NO_x и перегрев двигателя, особенно на режимах с малой частотой вращения коленчатого вала n . Оптимальные значения Θ (рис.2, б) определяются в первую очередь условием уменьшения расхода топлива и снижения концентрации твердых частиц, требующих повышения Θ с увеличением нагрузки P_e и частоты вращения n .

Результаты исследования возможности улучшения эколого-экономических показателей дизелей колесного, гусеничного тракторов и грузового автомобиля в результате применения автоматического регулирования согласно полученным картам управления представлены в табл.3. Здесь G_T — полученные в результате комплексной оптимизации значения расхода топлива, $G_{ВВ пр}$ — значения приведенной токсичности ОГ. Расчеты выполнены применительно к сроку эксплуатации дизеля, равному 10000 моточасов.

Из табл.3 видно, что регулирование ТСП при постоянном базовом значении Θ не приводит к ощутимым изменениям эколого-экономических показателей ДВС. При этом происходит некоторое ухудшение (на 1,5–2,1 %) экологичности $G_{ВВ пр}$ дизеля.

Управление углом опережения подачи топлива при постоянно включенном охлаждении поршней, достаточно распространенное в современных ДВС, позволяет снизить эмиссию вредных веществ $G_{ВВ пр}$ для автомобильного дизеля на 6 %, для дизеля колесного трактора — на 10,7 %, для дизеля гусеничного трактора — на 9,5 %. При этом наблюдается незначительное ухудшение топливной экономичности G_T (около 1 %).

В случае применения комплексного управления ТСП и Θ достигается значительное улучшение экологичности ДВС по $G_{ВВ пр}$. Для дизеля грузового автомобиля оно составило 15,9 %, для дизеля колесного трактора — 20,8 %, для дизеля гусеничного трактора — 18,7 %. При этом топливная экономичность ДВС улучшена сравнительно с предыдущим вариантом.

Анализ представленных результатов показывает, что при распространении предложенного способа автоматического регулирования на неучтенные в исследовании малонагруженные режимы (см. табл.1, 2) эффект от комплексного управления ТСП и Θ возрастает, особенно для модели эксплуатации дизеля грузового автомобиля.

Выводы

Проведенное расчетно-экспериментальное исследование свидетельствует о целесообразности и перспективности применения систем автоматического регулирования температурного состояния поршней дизелей различного назначения в качестве эффективного способа улучшения их эколого-экономических показателей.

Предложена методика оценки качества работы ДВС, предусматривающая оптимизацию комплекса критериев качества на каждом режиме конкретной модели эксплуатации транспортного средства. Указанный комплекс критериев качества при этом состоит из показателей экологичности, топливной экономичности дизеля, а также ресурсной прочности его конструкции.

Решение задачи комплексного улучшения эколого-экономических показателей дизеля 4ЧН12/14 на основании предложенного алгоритма порежимного поиска оптимальных значений управляющих параметров позволило установить возможные законы регулирования ТСП, в том числе при управлении углом опережения подачи топлива Θ .

Совместное использование предложенной системы автоматического регулирования с современными топливными системами, предусматривающими электронное управление углом опережения подачи топлива, значительно повышает положительный экологический эффект и позволяет снизить концентрацию NO_x и твердых частиц в ОГ транспортного дизеля до 20 % при снижении топливной экономичности дизеля до 0,1–0,6 %.

Список литературы

1. Чайнов М.Д., Мягков Л.Л., Кареньков А.В. Влияние масляного охлаждения на тепловое состояние поршней ДВС // Двигуни внутрішнього згорання. — 2005. — № 2. — С. 66–70.
2. Байков Б.П., Богданов С.А., Першин В.Г., Остроухова Л.В. Оценка эффективности масляного охлаждения поршней быстроходных форсированных дизелей. — М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1976. — № 13. — С. 5–9. (Реферат. информ., Сер. Двигатели внутреннего сгорания).
3. Шеховцов А.Ф. Исследование теплового состояния поршня тракторного дизеля : Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Харьков, 1978. — 47 с.
4. Матвеевко В.В., Турчин В.Т., Пылев В.А. и др. Влияние регулируемого струйного масляного охлаждения поршня на ресурсную прочность кромки его камеры сгорания // Вісник національного технічного університету «ХПИ». Тематичний випуск «Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів». — Харків : Видавничий центр НТУ «ХПИ», 2011. — № 21. — С. 29–33.
5. Минак А.Ф. Улучшение показателей форсированного тракторного дизеля путем регулирования масляного охлаждения поршнем : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Харьков, 1982. — 21 с.
6. Зеленцов В.В. Оценка влияния теплового режима ДВС на его надежность и долговечность // Автомобильная промышленность. — 1984. — № 2. — С. 6–9.
7. Вейнблат М.Х., Быков В.Ю. Отключение охлаждения поршней на частичных режимах резервирования эксплуатационных показателей форсированного турбопоршневого дизеля // Двигательное строительство. — 1985. — № 6. — С. 20–21.
8. Аршинов В.Д., Григорьев М.А., Колмаков В.И. Выбор рационального способа охлаждения поршней автомобильного дизеля // Автомобильная промышленность. — 1984. — № 7. — С. 12–15.
9. Ибрагимов С.А., Касьянов А.В., Розенблит Г.Б. Исследование температурного состояния составного поршня дизелей 8ЧН26/26. — М. : НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1981. — № 17. — С. 1–4 (Реферат. информ., Сер. Двигатели внутреннего сгорания).
10. Pat. 8997698 B1 USA, IPC F 01 P 1/04, F 01 P 7/14. Adaptive individual-cylinder thermal state control using piston cooling for a GDCI engine, Gregory T. Roth, Harry L. Husted, Mark C. Sellnau; assignee Delphi Technologies, Inc., USA. — Appl. № 14/096,119; Filed 04.12.13; Published 07.04.15.
11. Volkswagen Technical Site. Двигатели Audi TFSI 1,8 л и 2,0 л семейства EA888 (поколение 3) — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://vwts.ru/pps/pps_606_dvig_audi_tfsi_18_20_ea888_rus.pdf
12. Пильов В.О., Клименко О.М., Обозний С.В. Экспериментальне дослідження впливу регулювання теплового стану поршня на показники дизеля // Двигуни внутрішнього згорання. — 2014. — № 2. — С. 24–27.
13. Пильов В.О., Клименко О.М. Попередня оцінка резервів підвищення ресурсної міцності поршня при використанні систем автоматичного регулювання його масляного охолодження // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Транспортне машинобудування. — Харків : Видавничий центр НТУ «ХПИ», 2014. — № 14 (1057). — С. 83–88.
14. Пильов В.О. Автоматизоване проектування поршнів швидкохідних дизелів із заданим рівнем тривалої міцності. — Харків : Видавничий центр НТУ «ХПИ», 2001. — 332 с.
15. Harrington E.C., Jr. The Desirability Function // Industrial Quality Control. — 1965. — № 21 (10). — P. 494–498.
16. Парсаданов И. В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия: Монография. — Харьков : Издат. центр НТУ «ХПИ», 2003. — 244 с.
17. Alkidas A.C. Relationship between smoke measurements and particulate measurements // SAE paper. — 1984. — № 840412. — 9 p.

Поступила в редакцию 25.08.15

Пильов В.О., докт. техн. наук, **Клименко О.М.,** аспірант
Національний технічний університет «ХПІ», Харків,
 вул. Фрунзе, 21, 61002 Харків, Україна, e-mail: dvs@kpi.kharkov.ua

Покращання еколого-економічних показників дизеля з урахуванням моделі експлуатації транспортного засобу

Зроблено аналіз можливості комплексного покращання показників токсичності та паливної економічності автомобільного та тракторного дизелів при одночасній підтримці достатнього рівня надійності їхньої конструкції завдяки застосуванню систем автоматичного регулювання теплового стану. На підставі даних проведеного моторного експерименту вирішено компромісне завдання з оптимізації еколого-економічних показників на кожному режимі заданої моделі експлуатації двигунів. Як керуючі фактори запропоновано використовувати режимні параметри — частота обертання колінчастого валу та навантаження двигуна, як керовані — кут випередження подачі палива та температурний стан поршнів. Виконано оцінку екологічного ефекту від запропонованих заходів за період експлуатації дизеля. Запропоновано характеристичні карти управління системою автоматичного регулювання теплового стану поршнів дизеля 4СН12/14. *Бібл. 17, рис. 2, табл. 3.*

Ключові слова: автоматичне регулювання, економічність двигуна, димність, тверді частки, оксиди азоту, модель експлуатації, оптимізація.

Pyljov V.A., Doctor of Technical Science, **Klimenko A.N.,** PhD Student
National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkov
 21, Frunze Str., 61002 Kharkov, Ukraine, e-mail: dvs@kpi.kharkov.ua

Improvement of Diesel Ecological and Economic Indicators Considering the Vehicle Operation Model

The work is devoted to the analysis of integrated capabilities improve toxicity and fuel efficiency of automobile and tractor engines while maintaining a sufficient level reliability of their designs through the use of automatic control systems of thermal State. Based on data carried out by motor experiment solved compromise the task of optimizing the ecologic-economic indicators at each mode specified model engine. As managers suggested that factors operating parameters-crankshaft, rotation speed and engine load, as managed-fuel supply advance angle and thermal state of the pistons. Completed assessment of the environmental effects of the proposed activities for the period of operation a diesel engine. Proposed characteristic automatic control system control card thermal state of piston diesel engine 4CN12/14. *Bibl. 17, Fig. 2, Table 3.*

Key words: automatic regulation, the ICE efficiency, smokiness, particulate matter, nitrogen oxides, operating model, optimization.

References

1. Chajnov M.D., Mjagkov L.L., Karen'kov A.V. [The oil cooling impact on the ICE piston thermal state], *Dvigunny vnutrishn'ogo zgorjannja*, 2005, (2), pp. 66–70. (Rus.)
2. Bajkov B.P., Bogdanov S.A., Pershin V.G., Ostrouhova L.V. [Estimation of the piston oil cooling efficiency of high-speed forced diesel engines], Moscow : NIIFORMTJaZhMASH, 1976, (13), pp. 5–9. (Referativnaja informacija, Dvigateli vnutrennego sgoranija). (Rus.)
3. Shehovcov A.F. [The study of the thermal state of the tractor diesel piston]: Author. Dis. ... Doctor. Tehn. Sciences., Har'kov, 1978, 47 p. (Rus.)
4. Matveenkov V.V., Turchin V.T., Pylev V.A. et al. [Effect of regulated oil jet piston cooling on the resource strength of the edge of its combustion chamber], *Visnyk nacional'nogo tehničnogo universytetu «Harkivs'kyj politehničnij instytut». Tematyčnyj vyputsk «Innovacijni doslidzhennja u naukovyih robotah studentiv»*, Harkiv : Vydavnyčnyj centr NTU «HPI», 2011, (21), pp. 29–33. (Rus.)

5. Minak A.F. [Improvement of indicators forced tractor diesel engine by adjusting the piston oil cooling]: Author. Dis. ... Cand. Tehn. Sciences, Har'kov, 1982, 21 p. (Rus.)
6. Zelencov V.V. [Estimation of influence the thermal regime of the engine on its reliability and durability], *Avtomobil'naja promyshlennost'*, 1984, (2), pp. 6–9. (Rus.)
7. Vejnblat M.X., Bykov V.Ju. [Disabling piston cooling on partial standby mode to improve operational performance turbo-piston forced diesel engine], *Dvigatelistroenie*, 1985, (6), pp. 20–21. (Rus.)
8. Arshinov V.D., Grigor'ev M.A., Kolmakov V.I. [Choice of rational method of cooling the pistons of automobile diesel], *Avtomobil'naja promyshlennost'*, 1984, (7), pp. 12–15. (Rus.)
9. Ibragimov S.A., Kas'janov A.V., Rozenblit G.B. [The study of temperature state of the diesels 8CHN26/26 composite piston], Moscow : NIIN-FORMTJaZhMASH (Referativnaja informacija, Dvigateli vnutrennego sgoranija). (Rus.)
10. Pat. 8997698 B1 USA, IPC F 01 P 1/04, F 01 P 7/14. Adaptive individual-cylinder thermal state control using piston cooling for a GDCI engine, Roth Gregory T., Husted Harry L., Sellnau Mark C. Appl. № 14/096,119; Filed 04.12.13; Published 07.04.15.
11. Volkswagen Technical Site. Engines Audi TFSI 1,8 and 2,0 l by family EA888 (Generation 3). – [El. resource]. – Mode of access: http://vwts.ru/pps/pps_606_dvig_audi_tfsi_18_20_ea_888_rus.pdf.
12. Pyl'ov V.O., Klymenko O.M., Oboznyj S.V. [Experimental study of influence of piston heat state regulation on diesel indicators], *Dvyguny vnutrishn'ogo zgorjannja*, 2014, (2), pp. 24–27. (Ukr.)
13. Pyl'ov V.O., Klymenko O.M. [Preliminary assessment of reserves to increase the piston resource strength by using automatic regulation of its oil cooling], *Visnyk NTU «HPI»*. Serija: *Transportne mashynobuduvannja*, Harkiv : Vydavnychyj centr NTU «HPI», 2014, (14), pp. 83–88. (Ukr.)
14. Pyl'ov V.O. [Automated designing of piston of speed diesel engines with a specified level of long-term strength: Monograph], Harkiv: Vydavnychyj centr NTU «HPI», 2001, 332 p. (Ukr.)
15. Harrington E.C., Jr. The Desirability Function, *Industrial Quality Control*, 1965, (21), pp. 494–498.
16. Parsadanov I. V. [Improving the quality and competitiveness of diesel through an integrated fuel and environmental criteria: Monograph], Har'kov : Izd. Centr NTU «HPI», 2003, 244 p. (Rus.)
17. Alkidas A.C. Relationship between smoke measurements and particulate measurements, *SAE paper*, 1984, № 840412, 9 p.

Received August 25, 2015

УДК 621.18:632.15

Сигал И.Я., докт. техн. наук, проф., **Смихула А.В.**, канд. техн. наук,
Марасин А.В., **Лавренцов Е.М.**

Институт газа НАН Украины, Киев

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: isigal@ukr.net

Продление ресурса промышленных и отопительных котлов от 12 МВт котельных и ТЭЦ

Показано, что имеется техническая возможность при небольших капитальных затратах модернизировать существующие в Украине промышленные и отопительные котлы мощностью от 12 МВт, отработавшие заводской ресурс, для доведения их технико-экономических и экологических показателей до современного мирового уровня с продлением их ресурса на 15–20 лет. При работе котельной или ТЭЦ на номинальной мощности и наличии значительного остаточного физического ресурса необходимо реализовать такие мероприятия: увеличение поверхности нагрева котлов для достижения современного КПД, применение различных методов снижения выбросов NO_x. В случае пиковой мощности котельной менее 2/3 от установленной необходимо снизить номинальную тепловую мощность котлов до экономически целесообразной по температуре уходящих газов (перемаркировка на мощность около 60–70 %), переоборудовать котлы на рециркуляцию дымовых газов с использованием существующего тягодутьевого оборудования (перепуск части дымовых газов с выхода дымососа на всас вентилятора). В обоих случаях необходимо заменить горелочные устройства на усовершенствованные с низким выходом оксидов азота. *Библ. 16, рис. 10.*

Ключевые слова: котлы, горение, ресурс, оксиды азота, рециркуляция дымовых газов.