

УДК 621.436

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЕЙ

Докт. техн. наук, проф. КУХАРЕНОК Г. М., асп. БЕРЕЗУН В. И.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: kux.@tut.by

SELECTION OF PARAMETERS FOR SYSTEM OF DIESEL ENGINE EXHAUST GAS RECIRCULATION

KUKHARIONOK G. M., BEREZUN V. I.

Belarusian National Technical University

Приведены результаты исследования различных способов организации рециркуляции отработавших газов дизелей. Оценено влияние параметров рециркуляции газов на экономические и экологические показатели дизеля. Рассмотрено влияние конфигурации турбонаддува на интенсивность рециркуляции газов, указаны особенности работы системы их рециркуляции на динамических режимах. Даны рекомендации по выбору системы рециркуляции отработавших газов дизеля.

Ключевые слова: рециркуляция отработавших газов, дымность, выброс вредных веществ.

Ил. 11. Табл. 3. Библиогр.: 2 назв.

The paper presents research results of various methods for recirculation of diesel engine exhaust gases. An influence of recirculation parameters on economic and ecological diesel engine characteristics has been evaluated in the paper. The paper considers an influence of turbocharger configuration on the intensity of gas recirculation. Specific features of the recirculation system operation in dynamic modes have been shown in the paper. The paper provides recommendations for selection of a diesel engine exhaust gas recirculation system.

Keywords: recirculation of exhaust gases, smokiness, exhaust emissions.

Fig. 11. Tab. 3. Ref.: 2 titles.

Ужесточающиеся экологические нормы вынуждают производителей двигателей применять новые системы и элементы конструкций, снижающие выбросы вредных веществ. Если достижение системой экологических норм ЕВРО-3 при применении электронных систем управления топливоподачей возможно только за счет уменьшения угла опережения впрыска топлива, ухудшая расход топлива, то достижение норм ЕВРО-4 и Stage3A без применения системы рециркуляции отработавших газов (РОГ) либо системы селективного каталитического восстановления не представляется возможным. Для дизельных двигателей из всех регламентированных норм проблематичным является одновременное снижение выбросов окислов азота (NO_x) и твердых частиц (РТ).

Применение системы РОГ позволяет уменьшить температуру сгорания топлива за счет снижения скорости реакции горения вследствие уменьшения содержания кислорода при подаче негорючего газа в камеру сгорания [1]. Так как скорость образования оксида азота экспоненциально зависит от температуры сгорания, содер-

жание оксида азота в отработавших газах (ОГ) значительно снижается. При увеличении степени РОГ, в результате снижения температуры сгорания, повышается интенсивность образования твердых частиц, поэтому для достижения высоких экологических норм совместно с РОГ применяются системы очистки ОГ от твердых частиц – сажевые фильтры [2].

Зависимость выбросов NO_x и РТ от степени РОГ показана на рис. 1.

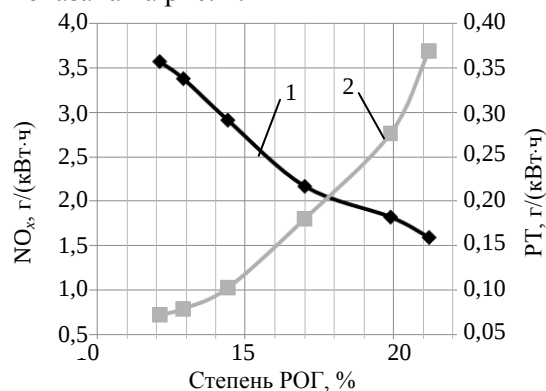


Рис. 1. Зависимость NO_x и РТ от степени РОГ:
1 – NO_x ; 2 – РТ

Ниже приведены результаты исследования способов организации РОГ на четырехцилиндровом дизельном двигателе с турбонаддувом и охладителем наддувочного воздуха (ОНВ) мощностью 90 кВт на точках цикла ESC согласно Правилам ЕЭК ООН № 49.

Внутренняя РОГ осуществляется за счет приоткрытия выпускного клапана во время такта впуска. Это может быть достигнуто изменением профиля кулачков распределительного вала (р/в). Зависимости удельного расхода топлива (g_e) и NO_x от нагрузки при частоте вращения A цикла ESC и угле опережения впрыска $\theta = 2$ град. п. к. в. (поворота коленчатого вала) при различном значении максимального вторичного хода выпускного клапана ($h'_{\text{вып.кл.}} = 1,5; 2,0$ и $2,5$ мм), которое достигалось увеличением теплового зазора, приведены на рис. 2. Чрезмерное приоткрытие выпускного клапана (при $h'_{\text{вып.кл.}} = 2,5$ мм) приводит к резкому увеличению выбросов CO , что объясняется снижением концентрации кислорода в камере сгорания, обусловленной высокой степенью РОГ. Выбросы NO_x и CO по циклу ESC приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения выбросов NO_x и CO

Исполнение профиля кулачка выпускного клапана р/в	$h'_{\text{вып.кл.}}$, мм	NO_x , г/(кВт·ч)	CO , г/(кВт·ч)
Не обеспечивающий вторичный подъем	0	7,73	0,85
Обеспечивающий вторичный подъем	1,5	5,40	1,36
	2,0	4,95	1,89
	2,5	4,36	5,51

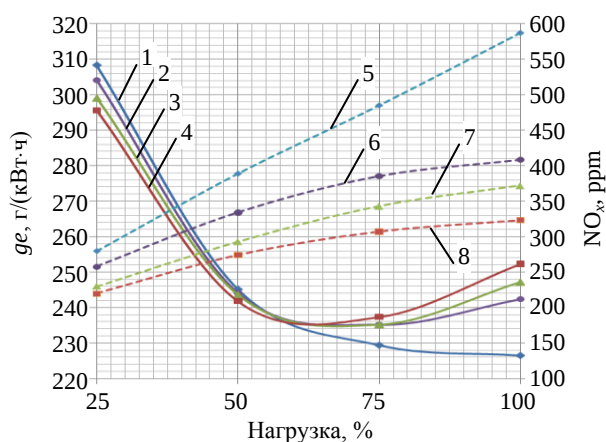


Рис. 2. Зависимость от нагрузки:
 g_e при: 1 – $h'_{\text{вып.кл.}} = 0$; 2 – 1,5; 3 – 2,0; 4 – 2,5 мм;
 NO_x при: 5 – $h'_{\text{вып.кл.}} = 0$; 6 – 1,5; 7 – 2,0; 8 – 2,5 мм

Удельный расход топлива на низких нагрузках с внутренней РОГ меньше, чем без РОГ. С увеличением нагрузки (более 30–60 %) топливная экономичность ухудшается, причем степень ухудшения увеличивается с ростом частоты вращения.

Зависимость хода выпускных клапанов от угла поворота коленчатого вала приведена на рис. 3.

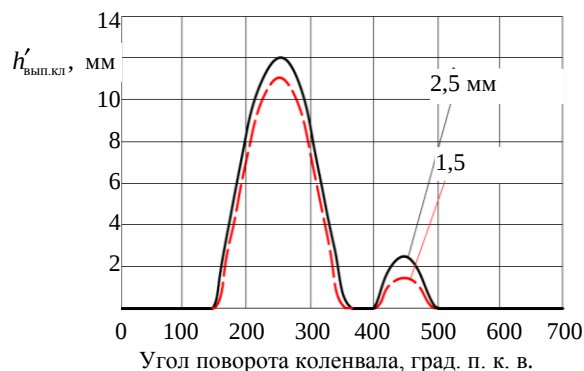


Рис. 3. Зависимость хода выпускных клапанов от угла поворота коленчатого вала

Применение распределительного вала с вторичным подъемом выпускного клапана позволяет снизить удельные выбросы NO_x . Однако отсутствие возможности регулирования степени РОГ в зависимости от нагрузки и частоты вращения коленчатого вала двигателя и охлаждения перепускаемых ОГ ограничивает эффективность использования внутренней РОГ, главным образом за счет большого расхода топлива и высокой дымности в сравнении с внешней охлаждаемой РОГ.

Внешняя РОГ в зависимости от организации перепуска ОГ разделяется на РОГ по контуру высокого давления (КВД) и РОГ по контуру низкого давления (КНД) (рис. 4).

При РОГ по КВД забор отработавших газов осуществляется из выхлопного коллектора перед турбиной турбокомпрессора (ТКР). Затем они перепускаются во впускной коллектор, откуда после смешивания с очищенным воздухом поступают в цилиндры двигателя. При РОГ по КНД выхлопные газы после турбины ТКР перепускаются на вход компрессора и, пройдя через ОНВ, попадают во впускной коллектор.

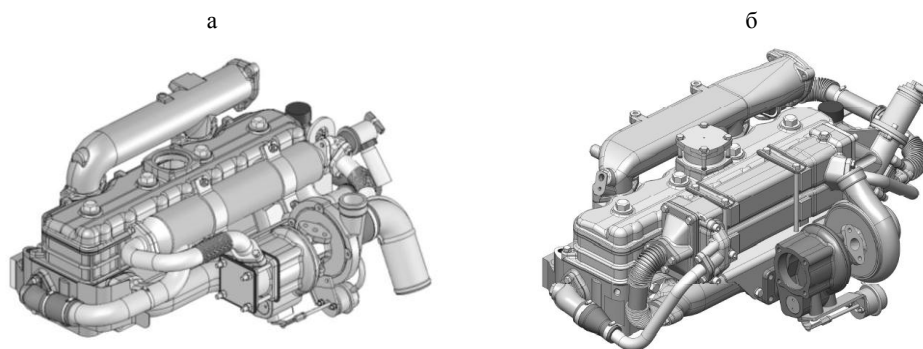


Рис. 4. Конструкция систем внешней РОГ: а – по КНД; б – по КВД

Частицы сажи в перепускаемых отработавших газах при эксплуатации двигателей с РОГ по КНД снижают ресурс ТКР. А вода, содержащаяся в отработавших газах, конденсируясь в ОНВ, снижает температуру впускного заряда до 45–50 °С, связывает частицы сажи в липкую и вязкую массу (при температуре ОГ ниже 90 °С), вызывая потребность периодического обслуживания от отложений. Отказ от применения ОНВ приводит к снижению мощности двигателя и увеличению удельных выбросов NO_x на 30 %.

Результаты испытаний двух систем РОГ по КВД и КНД, состоящих из компонентов одинакового типоразмера (трубопроводы ОГ, кла-

пан РОГ, теплообменник ОГ), при открытом клапане РОГ на всех режимах приведены на рис. 5. Обе системы обеспечивают сопоставимый выброс NO_x по циклу ESC при закрытом клапане РОГ на 100 % нагрузки точек цикла ESC.

Из рис. 5 видно, что КНД позволяет получить более равномерное изменение степени РОГ по нагрузке и частоте вращения, а по топливной экономичности КНД уступает КВД, особенно на низких нагрузках и высоких частотах вращения. Это связано с тем, что в случае применения КВД при открытии клапана РОГ уменьшается давление перед ТКР ($p_{\text{ТР}}$), вследствие чего снижаются потери энергии отработавших газов на привод ротора.

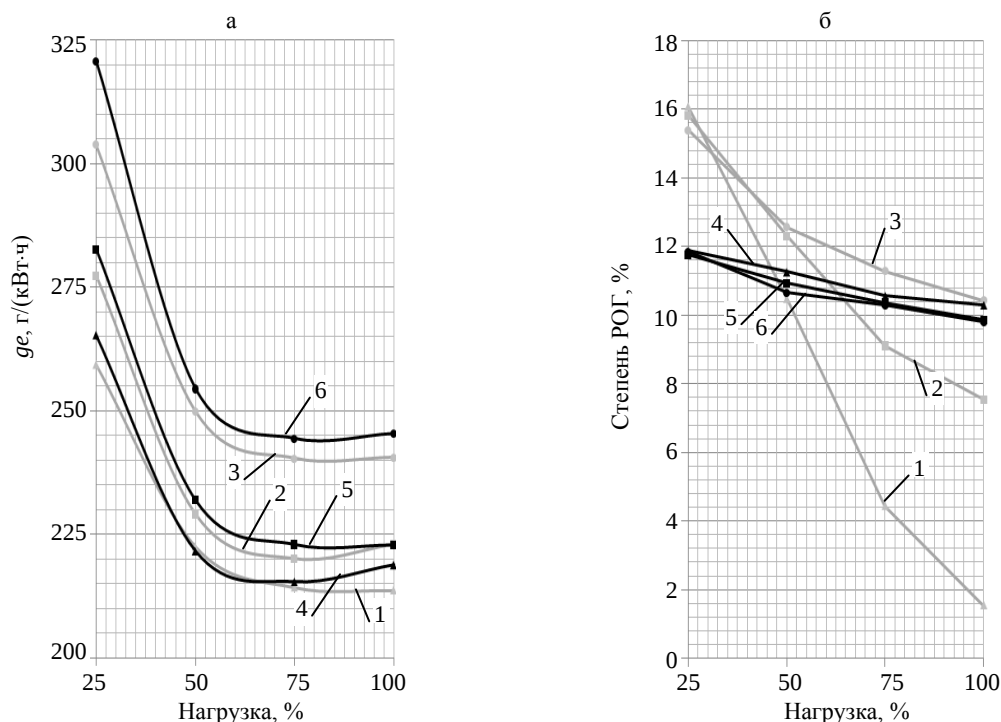


Рис. 5. Сравнение систем РОГ по КВД и КНД при частоте вращения А, В, С: 1 – А – РОГ по КВД; 2 – В – РОГ по КВД; 3 – С – РОГ по КВД; 4 – А – РОГ по КНД; 5 – В – РОГ по КНД; 6 – С – РОГ по КНД

Однако следует учитывать, что это более характерно для ТКР, имеющих большой перепад давлений $p_{тр} - p_k$. Турбокомпрессоры, обладающие более высоким КПД и, как следствие, с меньшим перепадом $p_{тр} - p_k$, не позволяют организовать высокую степень РОГ по КВД.

По дымности отработавших газов обе системы рециркуляции равноценны, за исключением режимов 100%-й нагрузки, где КНД имеет большую дымность ОГ вследствие высокой степени РОГ. Внешняя РОГ в отличие от внутренней позволяет организовать охлаждение перепускаемых отработавших газов и, как следствие, увеличить степень РОГ. Применение охлаждаемой системы РОГ дает возможность достичь требуемых выбросов NO_x с меньшим расходом топлива, чем при уменьшении угла опережения впрыска.

При снижении нагрузки и росте частоты вращения наблюдается тенденция увеличения коэффициента избытка воздуха α из-за улучшения условий смесеобразования. При использовании системы наддува с высоким КПД, состоящей из одного ТКР с перепускным клапаном, не удастся полностью реализовать потенциал РОГ на низких нагрузках (рис. 6).

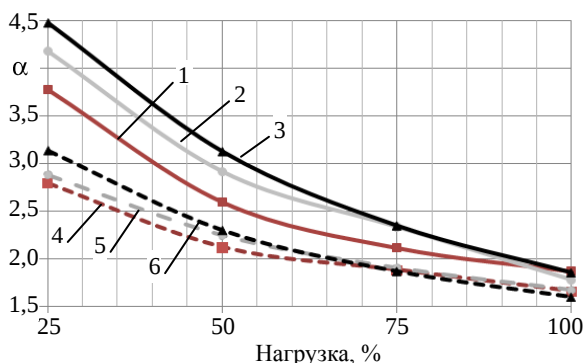


Рис. 6. Зависимость α от нагрузки при частоте вращения A, B, C цикла ESC: 1 – A – без РОГ; 2 – B – без РОГ; 3 – C – без РОГ; 4 – A – с РОГ; 5 – B – с РОГ; 6 – C – с РОГ

Для увеличения степени РОГ на частичных режимах была установлена заслонка перед впускным коллектором. Закрытие заслонки приводит к уменьшению давления на впуске и соответственно к увеличению значения перепада давлений между точками забора и подвода отработавших газов. Анализ зависимости выброса дымности двигателя от α (рис. 7) показывает, что снижение α до 2 при увеличении степени РОГ практически не влияет на дымность,

дальнейшее снижение α до 1,6–1,8 сопровождается резким увеличением дымности.

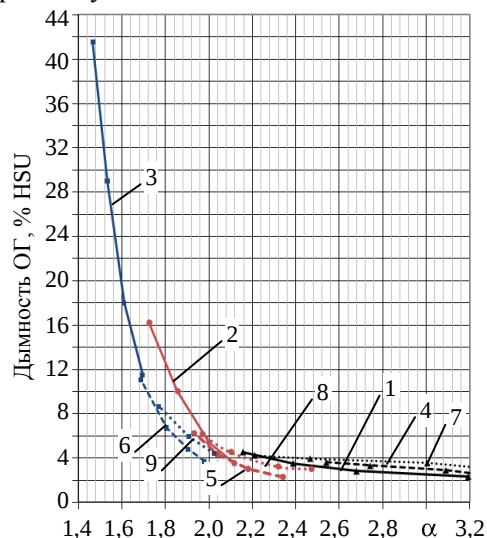


Рис. 7. Зависимость дымности отработавших газов от α : 1 – A – 25 %; 2 – A – 50 %; 3 – A – 75 %; 4 – B – 25 %; 5 – B – 50 %; 6 – B – 75 %; 7 – C – 25 %; 8 – C – 50 %; 9 – C – 75 %

Применение заслонки в системе РОГ по КНД позволило увеличить степень РОГ на частичных нагрузках до 35 % без существенного увеличения дымности (рис. 8). По КВД динамика роста степени РОГ в зависимости от закрытия заслонки существенно ниже, а на частоте вращения A цикла ESC наблюдается тенденция снижения степени РОГ при уменьшении α .

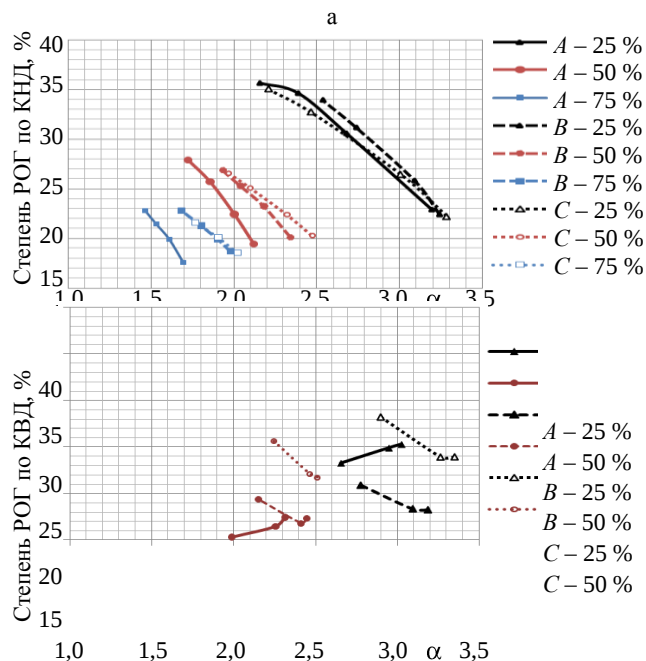


Рис. 8. Зависимость степени РОГ от α :
а – по КНД; б – по КВД

Реализация высокой степени РОГ на низких нагрузках позволяет снизить удельный расход топлива по внешней скоростной характеристике за счет увеличения угла опережения впрыска, а возросшие вследствие этого выбросы NO_x – компенсировать на других точках цикла ESC, где увеличение количества перепускаемых газов в меньшей степени влияет на выброс твердых частиц. Одним из основных вопросов конструирования системы РОГ является обеспечение ее эффективности и точности регулирования количества перепускаемых ОГ во всем скоростном и нагрузочном диапазонах работы двигателя. Это достигается нахождением компромиссного технического решения между размерами и типами применяемых компонентов и параметрами двигателя.

Для организации высокой степени РОГ и снижения инерционности перепускаемых отработавших газов необходимо, чтобы газовый контур системы обладал низким сопротивлением. Увеличение диаметра трубопроводов приводит к снижению давления в газовом контуре, что ведет к уменьшению количества перепускаемых ОГ, а также увеличивает паразитный объем, который ввиду волновых явлений во впускном коллекторе ухудшает наполнение и точность регулирования степени РОГ. Изменение параметров двигателя из-за применения ТКР с различной расходной характеристикой также приводит к изменению степени РОГ. Значения экологических выбросов по циклу ESC ТКР с различной расходной характеристикой при одинаковых настройках топливоподающей системы, положениях клапана РОГ и давлении открытия перепускного клапана ТКР приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения экологических выбросов по циклу ESC ТКР

Турбокомпрессор	NO_x , г/(кВт·ч)	РТ, г/(кВт·ч)
ТКР ₁	3,28	0,019
ТКР ₂	1,91	0,084

При переразмеренной системе РОГ на полной нагрузке для обеспечения выбросов NO_x требуется настраивать клапан РОГ на малые

(ниже 10 %) открытия. Но при продолжительной эксплуатации в результате загрязнения сажей посадочного гнезда исполнительного механизма (ИМ) ухудшается эффективность перепуска ОГ, что вызывает увеличение выбросов NO_x .

Сравнение эффективности регулирования по динамике снижения NO_x различных типов исполнительных механизмов на режиме С-100 цикла ESC приведено на рис. 9.

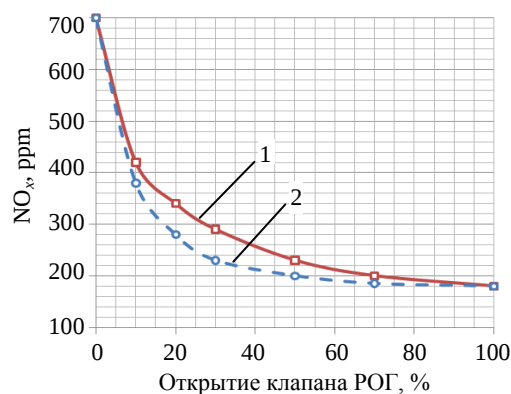


Рис. 9. Зависимость NO_x от открытия клапана РОГ:
1 – ИМ – заслонка; 2 – ИМ – сдвоенный тарельчатый клапан

Из графика на рис. 9 видно, что применение ИМ в виде заслонки расширяет зону эффективного регулирования степени РОГ и позволяет более качественно осуществлять настройку РОГ. Преимущество ИМ в виде заслонки проявляется главным образом на динамических режимах. Результаты испытаний по циклу ELR приведены в табл. 3.

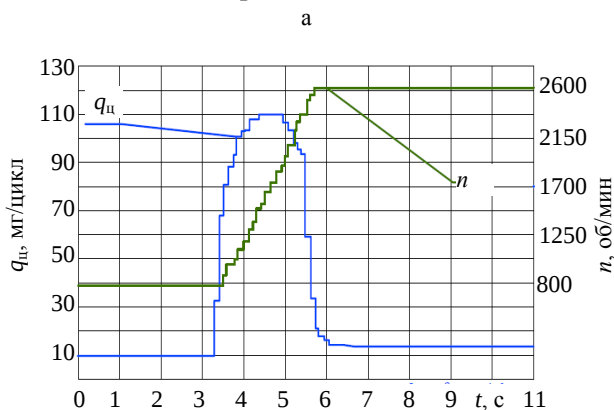
Таблица 3

Результаты испытаний по циклу ELR

Вариант исполнительного механизма	N , м ⁻¹
Заслонка	0,15
Сдвоенный тарельчатый клапан	0,19

Показатели выбросов вредных веществ на динамических циклах (ETC, ELR, режим свободного ускорения) обеспечиваются поддержанием α выше предела дымления, которое осуществляется ограничением цикловой подачи топлива $q_{ц}$ на режимах разгона (рис. 10), а при воздушном

голодании из-за инерционности ТКР – измене-



нием закона управления клапаном РОГ.

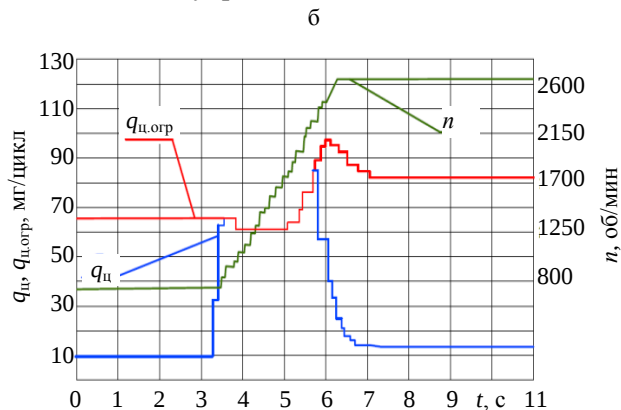


Рис. 10. Изменение значения цикловой подачи на режиме свободного ускорения:
а – без ограничения цикловой подачи; б – с ограничением цикловой подачи

На цикле ЕТС при работе на настройках клапана РОГ, удовлетворяющих экологическим нормам ЕВРО-4 на статических режимах цикла ESC, происходит перераспределение вредных выбросов в сторону снижения NO_x и увеличения РТ. Изменение настроек открытия клапана РОГ в зависимости от скоростных и нагрузочных режимов двигателя на переходных режимах позволяет приблизиться к нормируемой зоне экологических параметров. Однако наиболее эффективными являются кратковременное закрытие клапана РОГ и ограничение цикловой подачи двигателя $q_{u,огр}$ до момента восстановления α выше предела дымления.

Применение кронштейнов, придающих жесткость конструкции, и изменение места установки клапана РОГ (рис. 11) позволили исключить негативное влияние вибрации.

Применение неохлаждаемой РОГ позволяет снизить выброс несгоревших углеводородов и уровень шума двигателя при холодном старте и на фазе прогрева двигателя. Это важно для снижения выбросов вредных веществ на динамических циклах и практически реализуется в применении обводного канала отработавших газов мимо теплообменника либо многостадийного ступенчатого охлаждения теплообменников с переменной интенсивностью охлаждения ОГ. Недостатком этой системы является увеличение тепловой нагрузки на систему охлаждения двигателя и, что более важно, при использовании высокосернистого топлива способствует преобразованию серы в серную кислоту, вызывающую внутреннюю коррозию двигателя, клапанов, седел и износ гильз.

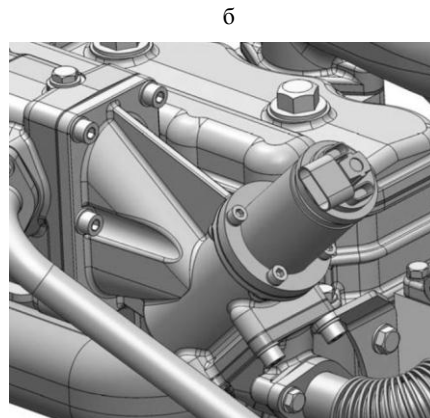
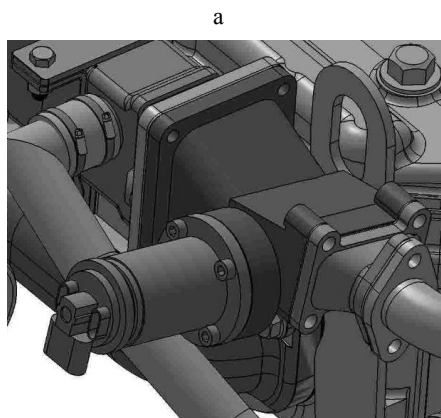


Рис. 11. Варианты установки клапанов РОГ: а – первоначальная конструкция;
б – модернизированная конструкция

ВЫВОД

Наибольшей эффективностью обладает внешняя система рециркуляции отработавших газов по контуру высокого давления. Она позволяет организовать охлаждение и регулирование степени рециркуляции перепускаемых отработавших газов. Не приводит к преждевременному выходу из строя турбокомпрессора и засорению охладителя наддувочного воздуха ввиду возможности организовать поток отработавших газов мимо лопаток компрессора напрямую во впускной коллектор. Топливная экономичность двигателя лучше с рециркуляцией отработавших газов по контуру высокого давления вследствие меньших потерь на привод ротора.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bosch:** Системы управления дизельными двигателями: пер. с нем. – М.: Изд-во «За рулем», 2004. – 480 с.
2. **Севиздрал, С. П.** Обеспечение экологических показателей уровня Евро-4 и Евро-5 на автомобильных дизелях Минского моторного завода / С. П. Севиздрал, Г. М. Кухаренко, В. И. Березун // Вісті Автомобільно-дорожного інституту: науково-виробничий збірник. – 2012. – № 1 (14). – С. 95–105.

REFERENCES

1. **Bosch:** Diesel Engine Control Systems: Translation from German. – M.: Publishing House “Za Rulim” (“Behind the Wheel”), 2004. – 480 p.
2. **Sevizdral, S. P.** Provision of Euro-4 and Euro-5 Ecological Indices in Automotive Diesel Engines of Minsk Motor Plant / S. P. Sevizdral, G. M. Kukharionok, V. I. Berezun // Visti Avtomobilno-Dorozhnogo Institutu (News of Automobile and Highway Institute): Science-Production Collected Works. – 2012. – No 1 (14). – P. 95–105.

Поступила 25.09.2013

УДК 656.1

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ТРАНСПОРТНАЯ СИСТЕМА КАК ИННОВАЦИОННАЯ КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТА

Докт. техн. наук, проф. ГРАБАУРОВ В. А.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: Vladimir.Grabaurov@yandex.ru

INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEM INNOVATIVE CONCEPT OF TRANSPORT DEVELOPMENT

GRABAUROV V. A.

Belarusian National Technical University

Приводится анализ передовых технологий, которые основаны на инновационном развитии транспортного комплекса страны на базе интеллектуальных транспортных систем. Предложено в качестве основной идеи при разработке долгосрочной концепции инновационного развития транспорта Республики Беларусь использовать интеллектуальные транспортные системы и всю концепцию долгосрочного инновационного развития транспорта. Сформулированы принципы создания концепции развития и приведено обоснование ее создания с позиции интеллектуальных транспортных систем.

Ключевые слова: транспортная система, интеллектуальная транспортная система, инновации, концепция развития.

Ил. 4.

The paper presents an analysis of the state-of-the-art technologies which are based on the innovative development of the transport sector of the country using intelligent transport systems. It has been proposed to use intelligent transportation systems and the whole concept of long-term innovative transport development as the basic idea while elaborating long-term concept of innovative transport development of the Republic of Belarus. Principles for creation of development concept have been formulated and substantiation of its creation from the perspective of intelligent transport systems has been given in the paper.