

АНАЛИЗ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЯ ПРИ РАБОТЕ НА СМЕСЕВОМ БИОТОПЛИВЕ

*Докт. хим. наук, чл.-кор. НАН Беларуси ИВАШКЕВИЧ О. А.,
докт. техн. наук, проф. КУХАРЕНОК Г. М.,
канд. техн. наук ПЕТРУЧЕНКО А. Н., канд. хим. наук ГРИГОРЬЕВ Ю. В.,
асп. ЗЕЛЕНКОВ А. А.*

*Белорусский национальный технический университет,
НИИ физико-химических проблем Белорусского государственного университета*

По прогнозам международного энергетического агентства, мировое потребление энергии на планете увеличится до 2010 г. по сравнению с настоящим уровнем на 50 %. Одним из основных потребителей энергоресурсов является транспорт, на долю которого приходится 70 % суммарного потребления нефтепродуктов.

Относительная ограниченность запасов нефти, обострение экологических проблем ужесточают требования к экологическим и потребительским свойствам топлив, что определяет актуальность исследований и разработок, направленных на диверсификацию сырьевой базы, поиск эффективных и экологически чистых топлив из нетрадиционных источников сырья, так называемых альтернативных моторных топлив.

Мировой опыт производства и применения альтернативных топлив свидетельствует о том, что одним из перспективных направлений является использование в качестве моторного топлива смесей с дизельным топливом или в чистом виде метиловых эфиров жирных кислот рапсового масла (МЭЖК) [1–3].

Эти топлива по своим физико-химическим свойствам отличаются от традиционного топлива, приводят к изменению протекания процессов в цилиндре двигателя [4–6]. Поэтому решение вопроса о возможности применения биотоплив связано с проведением исследовательских работ по оценке их влияния на экологические и динамические показатели процесса сгорания, характеристики выгорания топлива и индикаторные показатели цикла.

Для исследования рабочего процесса дизеля при работе на биотопливах необходимо совершенствование математических моделей путем включения в расчетные методики новых факторов, учитывающих состав и физико-химические свойства этих топлив. Исходной являлась математическая модель, приведенная в [7]. При ее реализации учитывалось влияние добавки метилового эфира на показатели смесового топлива.

Динамическая вязкость смесового топлива от концентрации МЭЖК аппроксимируется полиномом четвертого порядка

$$\mu_{\text{см}} = 7,02 - 2,04C_{\text{см}} - 13,03C_{\text{см}}^2 + 21,39C_{\text{см}}^3 + 10,18C_{\text{см}}^4. \quad (1)$$

где $C_{\text{см}}$ – массовая доля МЭЖК в смеси биотоплива.

Коэффициент поверхностного натяжения топлива $\sigma_{\text{см}}$ определяется физическими свойствами жидкости и зависит от природы составных компонентов жидкого топлива. Изменение коэффициента поверхностного натяжения, вызванное варьированием состава смесового биотоплива, можно рассчитать по следующей регрессионной зависимости:

$$\sigma_{\text{см}} = 30,7 - 6,89C_{\text{см}} - 12,63C_{\text{см}}^2 + 18,67C_{\text{см}}^3 + 10,3310,33C_{\text{см}}^4. \quad (2)$$

Для определения максимальной степени снижения скорости испарения топлива χ_0 при изменении температуры стенок камеры сгора-

ния от 270 до 700 °С целесообразно использовать эмпирическую зависимость

$$\chi_0 = q_v + 0,6q_w \sqrt{\frac{T_w - T_m}{T_k - T_m}}, \quad (3)$$

где q_v и q_w – доли цикловой подачи топлива, распыленного в объеме камеры сгорания и достигшего ее стенок; T_k , T_m , T_w – соответственно критическая температура фазового перехода жидкого топлива в пар, средняя молекулярная температура кипения топлива, температура стенки.

Средняя молекулярная температура кипения топлива T_m определяется его фракционным составом. Для нахождения величины T_m необходимо определить среднеобъемную температуру $T_{ср.о}$ и скорректировать полученное значение на величину поправки ΔT_m . Среднеобъемная температура может быть определена по одной из следующих зависимостей:

$$T_{ср.о} = \frac{t_{10} + t_{20} + t_{30} + t_{40} + t_{50} + t_{60} + \rightarrow + t_{70} + t_{80} + t_{90}}{9} + 273, \quad (4)$$

или

$$T_{ср.о} = \frac{t_{нк} + 4t_{50} + t_{кк}}{6} + 273, \quad (5)$$

где t_{10} – t_{90} – температуры выкипания 10–90 % топлива; $t_{нк}$ и $t_{кк}$ – соответственно температуры начала и конца кипения.

Температуры, необходимые для нахождения среднеобъемной температуры $T_{ср.о}$, получены при определении фракционного состава смесевых топлив. Температурная поправка определяется из графика, представленного на рис. 1.

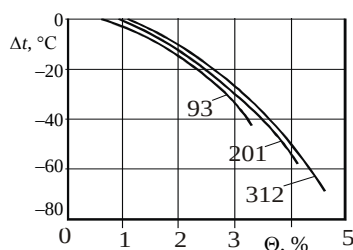


Рис. 1. График для нахождения поправки при определении средней молекулярной температуры кипения топлива в зависимости от наклона кривой разгонки Θ

Значение коэффициента избытка воздуха определяется элементарным составом топлива.

Метилловый эфир имеет состав, отличающийся по массовому содержанию углерода, водорода и кислорода от дизельного топлива. Поэтому при определении расчетного значения коэффициента избытка воздуха для биотоплива необходимо учитывать изменение массового баланса.

В общем случае коэффициент избытка воздуха определяется по следующей зависимости:

$$\alpha = \frac{Ma}{G_{ц} l_0 (1 + \gamma_r)}, \quad (6)$$

где Ma – количество свежего заряда, поступившего в цилиндр дизеля за такт впуска; γ_r – коэффициент остаточных газов; l_0 – количество воздуха, теоретически необходимого для сгорания 1 кг топлива; $G_{ц}$ – цикловая подача топлива.

Величина l_0 определяется элементарным составом топлива. Для исследуемых смесевых топлив значение параметра l_0 находится по соотношению:

$$l_0 = \frac{1}{0,21} \left((1 - C_{см}) \left(\frac{g_{Cм}}{12} + \frac{g_{Hм}}{4} - \frac{g_{Oм}}{32} \right) + C_{см} \left(\frac{g_{Cсм}}{12} + \frac{g_{Hсм}}{4} - \frac{g_{Oсм}}{32} \right) \right), \quad (7)$$

где $g_{Cм}$, $g_{Hм}$, $g_{Oм}$ – соответственно массовые доли углерода, водорода и кислорода в дизельном топливе; $g_{Cсм}$, $g_{Hсм}$, $g_{Oсм}$ – соответственно массовые доли углерода, водорода и кислорода в МЭЖК.

Значение коэффициента сжимаемости топлива можно получить с помощью эмпирической зависимости. Этот параметр зависит от величины текущего давления топлива p , его плотности $\rho_{см}$, динамической вязкости $\eta_{см}$ и коэффициента поверхностного натяжения $\sigma_{см}$. Для смесового дизельного топлива коэффициент сжимаемости $\beta_{см}$ определяется из следующей эмпирической зависимости:

$$\beta_{см} \sqrt{\rho_{см} \sigma_{см}} = 5,25 \cdot 10^{-9} \left[\frac{\eta_{см}^2 g}{\sqrt{\rho_{см} \sigma_{см}^3}} \right]^{-0,11} \times e^{-0,875 \cdot 10^{-7} \frac{p}{\sqrt{\rho_{см} \sigma_{см}}}}, \quad (8)$$

Низшая теплотворная способность МЭЖК ниже, чем у дизельного топлива, а плотность выше. При проведении расчетов теплотворная способность и плотность смесового топлива находятся с учетом массовой доли МЭЖК в биотопливе.

Первый этап расчетов предполагал проверку адекватности математической модели с целью получения адекватных значений выходных величин и оценки возможностей использования модели для проведения расчетных исследований рабочего процесса дизельного двигателя. Расчетные показатели сравнивали с результатами индицирования двигателя, выполненными на ММЗ.

Основные параметры рабочего процесса (максимальные давление и температура цикла, удельный индикаторный расход топлива и среднее индикаторное давление), полученные при обработке экспериментальных индикаторных диаграмм и расчетным путем, отличаются на 1–3 %. Изменение коэффициента избытка воздуха и условной продолжительности сгорания, характер протекания интегральных особенностей выгорания топлива, определенных при моделировании рабочего процесса, сохраняют тенденции, присущие результатам экспериментальных исследований.

Таким образом, разработанная математическая модель рабочего процесса дизельного двигателя, учитывающая физико-химические свойства применяемых топлив, достаточно точно описывает процессы, протекающие в цилиндре дизеля при сгорании биотоплива, и может быть использована для оценки влияния свойств смесевых топлив на показатели его работы.

Были проведены расчетные исследования рабочего процесса дизеля 4ЧН 11/12,5 с литровой мощностью 18 кВт/л на скоростных режимах $n = 2200$; 1600 и 1200 мин⁻¹ при полной подаче топлива и постоянной величине угла опережения впрыска топлива – 3 град. ПКВ.

Концентрация МЭЖК в дизельном топливе составляла 5; 10; 20; 30; 50 и 75 % по массе. Для проведения сравнительного анализа расчетные исследования проводились для дизеля, работающего и на «чистом» МЭЖК.

В качестве оценочных показателей работы дизеля на смесевых топливах были взяты

экономические, экологические и динамические показатели рабочего процесса.

Расчетные индикаторные диаграммы и зависимости изменения температуры газов в цилиндре для номинального режима работы дизеля на топливах с различной концентрацией МЭЖК показаны на рис. 2 и 3.

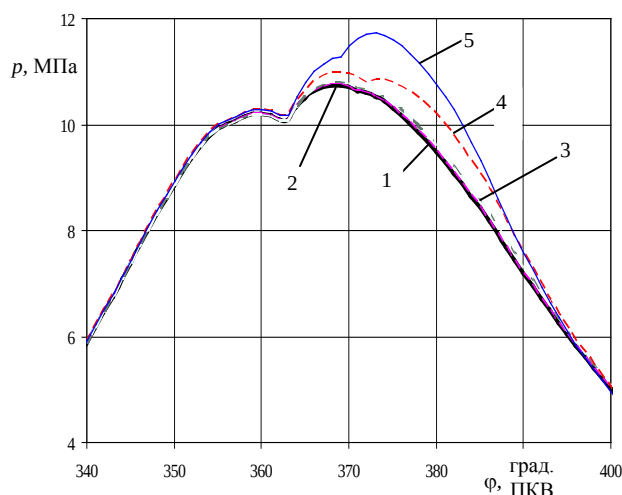


Рис. 2. Участок индикаторных диаграмм дизеля при применении различных топлив: $n = 2200$ мин⁻¹; 1 – ДТ; 2 – 5 % МЭЖК; 3 – 30 % МЭЖК; 4 – 50 % МЭЖК; 5 – 100 % МЭЖК

Как видно из индикаторных диаграмм (рис. 2), по мере увеличения концентрации МЭ в дизельном топливе происходит рост максимального давления цикла. При концентрации МЭЖК 5 и 10 % прирост максимального давления не существен – менее 1%. При содержании 20 % МЭЖК в дизельном топливе увеличение максимального давления составляет 2,5 %. Наиболее высокая величина максимального давления соответствует работе дизеля на «чистом» МЭЖК. По отношению к дизельному топливу это увеличение составляет: при $n = 2200$ мин⁻¹ – 0,97 МПа (9 %); при $n = 1600$ мин⁻¹ – 2,02 МПа (17,4 %); при $n = 1200$ мин⁻¹ – 0,5 МПа (4,8 %).

Увеличение максимального давления цикла при росте концентрации МЭЖК сопровождается повышением скорости нарастания давления в процессе сгорания.

Из анализа зависимостей изменения температуры газов в цилиндре дизеля (рис. 3) следует, что увеличение концентрации МЭЖК ведет к росту максимальной температуры цикла. При концентрации МЭЖК в смесевом топливе до

10 % максимальная температура цикла увеличивается незначительно.

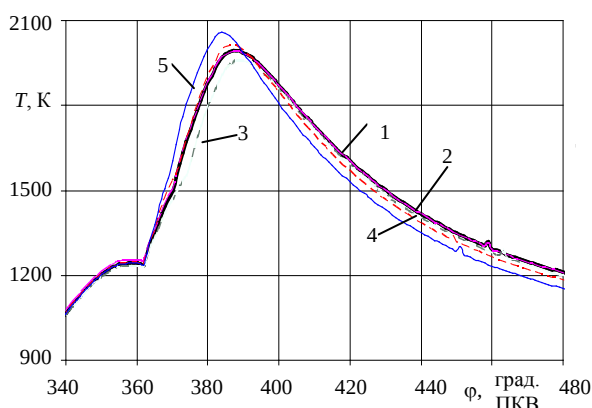


Рис. 3. Диаграммы температур газов при применении дизельного, смесевых топлив и метилового эфира: $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; 1 – ДТ; 2 – 5 % МЭЖК; 3 – 30 % МЭЖК; 4 – 50 % МЭЖК; 5 – 100 % МЭЖК

Увеличение максимальной температуры цикла при применении 50 % смеси и «чистого» МЭЖК для скоростного режима 2200 мин^{-1} составляет примерно 2–2,5 %.

Относительный рост максимальных значений температуры и давления при моделировании рабочего цикла дизеля, работающего на 5–10 % смеси МЭЖК с нефтяным дизельным топливом, составляет 0,1–0,3 %.

Как видно из зависимостей, приведенных на рис. 4, увеличение концентрации МЭЖК в смесевом топливе вызывает рост максимальной скорости сгорания $dx/d\varphi$; по сравнению с дизельным топливом эта величина выше на 30 %. Сгорание «чистого» МЭЖК начинается раньше на 2 град. ПКВ, чем нефтяного и смесевых топлив с концентрацией МЭЖК до 10 %. Таким образом, основными факторами, определяющими высокие значения скорости нарастания давления и максимального давления цикла являются высокая максимальная скорость сгорания топлива и более раннее его воспламенение.

Выгорание в цилиндре смеси дизельного топлива и 30 % метилового эфира протекает достаточно интенсивно и равномерно. Несмотря на более низкие значения максимальной скорости выгорания биотоплива, содержащего 30 % метилового эфира, при работе на скоростных режимах $n = 2200$ и 1200 мин^{-1} продолжительность выгорания 80%-й цикловой подачи сокращается на ~2 град. ПКВ.

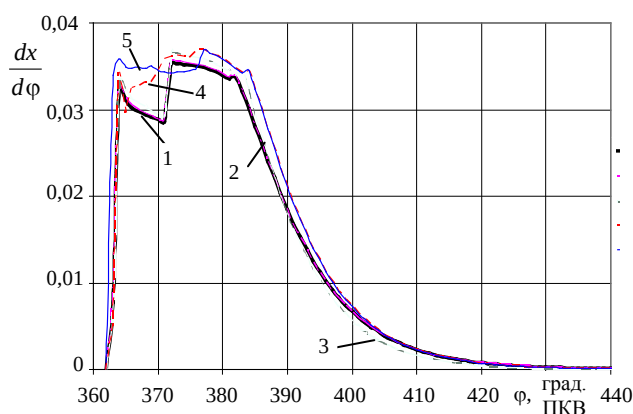


Рис. 4. Расчетная дифференциальная характеристика выгорания топлива при применении дизельного, смесевых топлив и метилового эфира: $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; 1 – ДТ; 2 – 5 % МЭЖК; 3 – 30 % МЭЖК; 4 – 50 % МЭЖК; 5 – 100 % МЭЖК

Продолжительность сгорания топлива φ_z по мере снижения частоты вращения коленчатого вала уменьшается: при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ $\varphi_z = 83\text{--}88$ град. ПКВ; при $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ $\varphi_z = 80\text{--}84$ град. ПКВ; при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$ $\varphi_z = 75\text{--}80$ град. ПКВ. Меньшие значения соответствуют смеси, содержащей 30 % МЭЖК.

Раннее воспламенение, невысокие значения скоростей выгорания и сокращение продолжительности сгорания топлива обусловлены изменением физико-химических свойств смесевоего топлива.

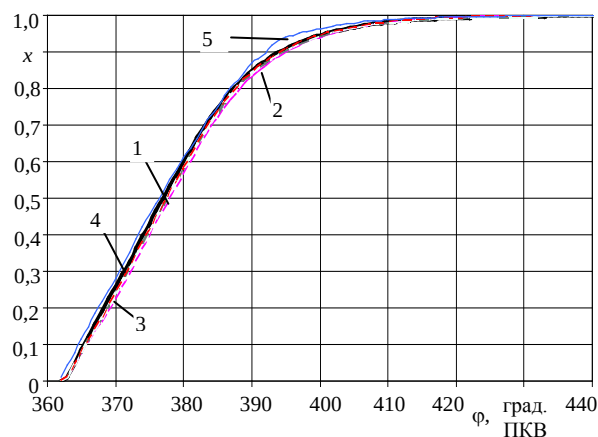


Рис. 5. Интегральная характеристика выгорания топлива при применении дизельного, смесевых топлив и метилового эфира: $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$; 1 – ДТ; 2 – 5 % МЭЖК; 3 – 30 % МЭЖК; 4 – 50 % МЭЖК; 5 – 100 % МЭЖК

Особенности развития процессов сгорания отразились на показателях работы дизеля (табл. 1). По сравнению с дизельным топливом

среднее эффективное давление при применении метилового эфира уменьшилось на 0,126 МПа (11,2 %) при частоте вращения коленчатого вала 2200 мин⁻¹. Его снижение на смесевых топливах обусловлено их меньшей теплотворностью, этот показатель для метилового эфира на 14 % меньше, чем для дизельного топлива.

Увеличенное содержание кислорода в биотопливе интенсифицирует процесс сгорания, что ведет к уменьшению выбросов углеводородов, угарного газа и твердых частиц, однако топлива с повышенным содержанием кислорода имеют тенденцию к росту эмиссии окислов азота [8].

Путем обработки экспериментальных данных была построена регрессионная зависимость, связывающая максимальную температуру $T_{\max}$ и давление $p_{\max}$ сгорания, коэффициент избытка воздуха α и среднее индикаторное давление p_i с количеством окислов азота, образующихся в процессе сгорания:

$$M_{\text{NO}_x} = -54,06 + 8,06\alpha - 0,86\alpha^2 +$$

$$+ 0,047T_{\max} - 1,1 \cdot 10^{-5}T_{\max}^2 + 0,53p_{\max} - 0,018p_{\max}^2 - 7,04p_i + 3,035p_i^2. \quad (9)$$

Результаты расчетов по (9) показали, что с ростом концентрации МЭЖК в смесевом топливе содержание окислов азота в продуктах сгорания увеличивается незначительно: 4–5 % – при применении 50%-й смеси на номинальном режиме работы.

Был выполнен расчетный анализ показателей рабочего цикла дизеля 4ЧН 11/12,5 с литровой мощностью 23 кВт/л при работе на различных топливах, а также определены показатели рабочего процесса исследованных дизелей на всех скоростных режимах при неизменном крутящем моменте. Они показали, что индикаторные диаграммы, графики температуры, а также дифференциальные и интегральные характеристики выгорания топлива идентичны рассмотренным зависимостям. Сохраняются ранее установленные закономерности изменения удельного индикаторного расхода топлива.

Таблица 1

Результаты расчетных исследований рабочих процессов дизеля ($N_{e,л} = 18$ кВт/л)

Топливо	n , мин ⁻¹	$p_{\max}$, МПа	$\Phi_{p_{\max}}$, град. ПКВ	η_i	g_i , г/(кВт·ч)	$T_{\max}$, К	$\Phi_{T_{\max}}$, град. ПКВ	α	q , мм ³	Φ_z , град. ПКВ
Дизельное	2200	10,748	8	0,4543	186,4	1962,0	32	2,162	90,5	82,0
	1600	11,605	11	0,4698	180,3	2074,1	24	2,022	103,8	87,5
	1200	10,434	12	0,4700	180,2	2299,4	24	1,588	86,1	80,0
Смесь 5%-я	2200	10,756	8	0,455	187,3	1990,3	31	2,166	90,6	83,0
	1600	11,142	11	0,4648	183,4	2079,2	27	2,039	103,9	87,5
	1200	10,452	12	0,4704	181,2	2313,2	23	1,590	86,3	78,0
Смесь 30%-я	2200	10,821	9	0,4582	192,2	1994,4	30	2,148	92,9	80,0
	1600	11,295	9	0,4687	187,9	2092,1	25	2,066	103,7	85,5
	1200	10,492	12	0,4734	186,0	2328,8	22	1,624	85,9	70,0
Смесь 50%-я	2200	10,985	13	0,4618	198,7	2036,3	25	2,263	89,4	82,5
	1600	12,75	10	0,4746	191,9	2088,0	22	2,199	98,7	70,5
	1200	10,506	12	0,4793	190,6	2345,6	19	1,620	87,3	65,0
Метилловый эфир	2200	11,718	13	0,4754	207,0	2057,1	36	2,322	90,4	85,0
	1600	12,927	12	0,4807	203,4	2138,1	30	2,200	102,1	72,0
	1200	10,942	13	0,4806	203,5	2381,1	28	1,660	89,8	66,5

ВЫВОД

Применение смесей дизельного топлива и метилового эфира жирных кислот рапсового масла с концентрацией до 5 % не оказывает заметного влияния на экологические и экономи-

ческие показатели двигателя, а также на динамические показатели процесса сгорания. Увеличение содержания МЭЖК в смеси с дизельным топливом приводит к уменьшению токсичности продуктов сгорания при незначительном росте удельного расхода топлива; при

этом возрастают скорость сгорания топлива, максимальные давление и температура рабочего процесса. Отмеченное увеличение динамических показателей процесса сгорания находится в допустимых пределах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Голубов, О. С.** Перспективы та переваги застосування біодизеля в паливно-енергетичному комплексі країни / О. С. Голубов, Я. В. Загоруй // Проблеми хімотології: матеріали I Міжнарод. наук.-техн. конф. – К.: Книжкове вид-во НАУ, 2006. – С. 260–262.
2. **Рапсовое** масло как альтернативное топливо для дизеля / В. А. Марков [и др.] // Автомобильная промышленность. – 2006. – № 2. – С. 3–8.
3. **Исследования** рабочего процесса тракторного дизеля при работе на смеси дизельного топлива и рапсового масла / Л. Н. Басистый [и др.] // Вестник РУНД. Сер. тепловых двигателей. – 1996. – № 1. – С. 30–36.
4. **Разлейцев, Н. Ф.** Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях / Н. Ф. Разлейцев. – Харьков: Вища шк., Из-во при Харьк. ун-те, 1980. – 169 с.
5. **Теоретические** основы химмотологии / под ред. А. А. Браткова. – М.: Химия, 1985. – 320 с.
6. **Двигатели** внутреннего сгорания: системы поршневых и комбинированных двигателей: учеб. для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / С. И. Ефимов [и др.]; под общ. ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1985. – 456 с.
7. **Лышевский, А. С.** Методика статического расчета давлений в топливных системах дизелей / А. С. Лышевский, В. М. Сычев // Научные труды НПИ. – Новочеркасск, 1971. – Т. 224. – С. 3–42.
8. **Смирнова, Т. Н.** Биодизель – альтернативное топливо для дизелей / Т. Н. Смирнова, В. М. Подгаецкий // Двигатель. – 2007. – № 1. – С. 32–35.

Поступила 19.09.2007

УДК 629.113-592.004.58

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА БОРТОВОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СТЕПЕНИ ИЗНОСА ФРИКЦИОННЫХ НАКЛАДОК ВЕДОМОГО ДИСКА СЦЕПЛЕНИЯ

Докт. техн. наук КАРПИЕВИЧ Ю. Д.

Белорусский национальный технический университет

Сложившийся в прошлом столетии и получивший наибольшее распространение регламентный характер контрольно-диагностических работ не может обеспечить требуемого уровня технического состояния автотранспортных средств, так как не учитывает индивидуальные особенности каждого автомобиля, условия его эксплуатации, технического обслуживания и проведенные ранее ремонтные воздействия.

Внешние средства диагностирования также не позволяют своевременно выявить внезапные отказы, что отрицательно сказывается на безопасности, а в силу планово-предупредительного или эпизодического характера контрольно-диагностических работ недостаточно эффективны и при выявлении постепенных отказов.

Именно стремление снять указанные ограничения стимулировало у нас и за рубежом разработку бортовых систем диагностирования автотранспортных средств.

Идентичность функциональных структур микропроцессорных систем управления и бортового диагностирования позволяет за счет совместного использования общей аппаратуры (датчиков, исполнительных механизмов, микроЭВМ) обеспечить непрерывный контроль системы и объекта управления без использования каких-либо специализированных технических средств и избежать тем самым необоснованного усложнения конструкции колесных и гусеничных машин и необходимости разработки дополнительного диагностического оборудования [1].