УДК 629.3

© И. В. Карнаухова, канд. техн. наук, ассистент
© О. В. Карнаухов, канд. социолог. наук, доцент
© В. Н. Карнаухов, д-р техн. наук, профессор
© О. В. Рындина, канд. социолог. наук, доцент
(Тюменский индустриальный университет)
E-mail: karnauhovaiv@tyuiu.ru, karnauhov1948@yandex.ru,
karnauhovov@tyuiu.ru, ryndinaov@tyuiu.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-5-228-236

© I. V. Karnaukhova, PhD in Sci. Tech., Assistant lecturer
© O. V. Karnaukhov, PhD in Sci. Soc., Associate Professor
© V. N. Karnaukhov, Dr. Sci. Tech., Professor
© O. V. Ryndina, PhD in Sci. Soc., Associate Professor
(Tyumen Industrial University)
E-mail: karnauhovaiv@tyuiu.ru, karnauhov1948@yandex.ru,
karnauhovov@tyuiu.ru, ryndinaov@tyuiu.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ПРОДИССОЦИИРОВАННОЙ ВОДЫ ПРИ ДОБАВЛЕНИИ ЭТАНОЛА В БЕНЗИНОВОЕ ТОПЛИВО

DETERMINATION OF THE AMOUNT OF DISSOCIATED WATER WHEN ETHANOL IS ADDED TO GASOLINE FUEL

Ужесточение экологических требований к качеству автомобильных бензинов подразумевает необходимость использования альтернативных биовозобновляемых высокооктановых компонентов (добавок) к автомобильным бензинам. В настоящее время все большее применение находят смесовые топлива с различным содержанием спирта, воды и углеродного топлива. В результате исследования была выявлена математическая зависимость диссоциации воды от количественного состава топливовоздушной смеси. Применение вычислительных коэффициентов диссоциации воды в смешанных топливах позволит обеспечивать оптимальное обеднение горючей смеси и в результате экономию топлива до 35 % от общего количества.

Ключевые слова: диссоциация воды, экономия топлива, этанол.

Environmental requirement toughening regarding the quality of motor gasoline implies the need of using alternative bio-renewable high-octane components (additives) to motor gasoline. Currently, mixed fuels with different content of alcohol, water and carbon fuel are widely used. As a result of the research, there was revealed a mathematical dependence of water dissociation on the quantitative composition of the fuel-air mixture. The use of computational coefficients of water dissociation in mixed fuels will ensure optimal depletion of the fuel mixture and as a result will provide fuel savings of up to 35% of the total amount.

Keywords: water dissociation, fuel economy, ethanol.

Сегодня самым перспективным компонентом топлива, повышающим антидетонационную стойкость бензинов являются оксигенаты [6, 10]¹. В этих работах отмечено, что оксигенатные топлива содержат в своем составе углеводородное топливо (бензин, дизтопливо) и различное количество кислородсодержащих добавок, в качестве которых используются низкомолекулярные спирты (этанол, метанол и т. д.) [10]. Количество спиртов, вводимое в состав автомобильных бензинов, ограничивается содержанием кислорода не более 2,7–3 % от массы углеводородов [2]. При содержании спирта в бензинах до 10 % содержа-

ние кислорода составляет 3,5 %, при 15 % допустимая концентрация кислорода уменьшается до 2,7 %.

Преимущества этанола — прекрасная растворимость в углеводородном топливе, меньшая токсичность и высокое октановое число [13]. Исследованиями, проведенными на кафедре эксплуатации автомобильного транспорта Тюменского индустриального университета (ЭАТ ТИУ), установлено, что введение этанола в состав традиционных топлив снижает содержание токсичных веществ в отработанных газах бензиновых ДВС до 30 % и дизельных до 40 %. Кроме того, при добавлении этанола в дизельное топливо в количестве до 20 % повышается температура воспламенения до 450–500° С.

¹ Использование этилового спирта в качестве компонента автомобильного бензина. Анализ нормативной документации. URL: http://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=53 (дата обращения: 22.03.2019).

Влияние растворенной воды на физическую стабильность при низких температурах заметно возрастает в случае использования кислородсодержащих компонентов. Добавление спиртов к топливу увеличивает растворимость воды, но при этом возрастает склонность смесовых углеводородов к расслоению на углеводородную и спиртоводную части при понижении температуры. Влажный воздух рассматривается как смесь идеальных газов, комбинация плотностей каждого из которых позволяет получить требуемое значение для любой смеси.

Из всех спиртов наиболее эффективным средством повышения октанового числа является этанол. Эффективность действия спиртов определяется содержанием в них кислорода. ГОСТ Р 52501–2004 «Топливо моторное этанольное для автомобильных двигателей с принудительным зажиганием. Бензолы» позволяет производить и использовать топливо, содержащее до 10 % этилового спирта и устанавливает общие требования к такому топливу.

Применение смеси этанола с водой в качестве добавок обеспечивает:

1. Высокие антидетонационные свойства и повышение степени сжатия у бензиновых ДВС $\epsilon = 12\text{--}14$, что ведет к росту КПД двигателей и снижению выбросов оксидов азота, которые образуются при повышении температуры более 1090 °C.

2. Наличие кислорода в молекуле спиртов снижает расход воздуха и уменьшает содержание окиси углерода в отработанных газах.

3. Обеспечивает широкий диапазон сгорания топлива.

В настоящее время производство этанола достигает 113 млн тонн в год и планируют к 2025 году заменить каждый пятый литр бензина на этанол, что приведет к увеличению содержания этанола в бензинах до 20–25 %. [9].

Спирты — это производные углеводородов, содержащих группу ОН, называемую гидроксильной группой или гидроксилем [3]. Спирты менее летучи и имеют более высокие температуры плавления, что объясняется необходимостью разрыва водородных связей, которые отлично связываются с молекулами воды. В этиловом спирте гидроксильная группа составляет почти 45 % веса молекулы, поэтому этанол смешива-

ется с водой во всех пропорциях. Одноатомные спирты — это производные воды, где один атом водорода заменяется алкильной группой, при этом длина связи О–Н в спиртах точно такая же, что и в воде.

При повышении температуры скорости распространения пламени увеличиваются, а пределы воспламеняемости топлива расширяются. Наиболее полное сгорание топлива происходит при сгорании обедненных смесей. Горение — это экзотермический процесс взаимодействия топлива и окислителя. Он осуществляется в поршневых ДВС и называется нестационарным горением из-за постоянно меняющихся давления, температуры и концентрации реагирующих веществ. Гипотеза, объясняющая физико-химическую сущность цепных реакций при горении углеводородного топлива в ДВС, предложена академиком Н. Н. Семеновым. Он объясняет это прямым присоединением молекул кислорода и топлива с дельнейшей изомеризацией в гидроперекись ROOH [11]. Наличие в молекуле спирта кислорода и гидроксильной группы обеспечивает начало цепной реакции, которая ведет к полному сгоранию топлива, что увеличивает теплоотдачу и скорость сгорания смеси. Увеличению диссоциации воды способствует фазовая нестабильность этанолсодержащего углеводородного топлива в присутствии воды. Как показали исследования, проведенные на кафедре ЭАТ ТИУ, фазовая нестабильность топлив особенно проявляется при применении смеси этанола с водой в пропорции 1:2. Цепную реакцию сгорания топлив можно вызвать в камерах сгорания ДВС путем введения дополнительной энергии в виде электромагнитной, звуковой, химической, световой, тепловой и т. д., но при этом ударные волны обязательно должны распространяться в резонансе с частотой распространения ударных волн сгорающего топлива. Равномерное течение цепных реакций обеспечивает воздушная смесь этанола с водой, введенная во впускной коллектор ДВС. Причины, в результате которых возникают цепные реакции, следующие:

1. Разветвление цепей деления молекул и атомов (цепной взрыв).

2. Прогрессивный саморазогрев реагирующей смеси (тепловой взрыв).

3. Ударнотепловой разогрев (тепловолновой взрыв).

Все три перечисленных параметра возникают в начальной стадии горения «холодной плазмы», вызывая следующие процессы при сгорании углеводородов:

1. Появление холодного пламени и голубое свечение, являющееся результатом оптического возбуждения молекул формальдегида HCHO и радикала $-\text{HCO}$, с температурой холодного пламени в интервале $170\text{--}450^\circ\text{C}$. При повышении температуры более 450°C появляется вторичное более интенсивное свечение, что приводит к тепловому взрыву.

2. Тепловолновой взрыв вызывает появление фиолетовых лучей с длиной волны $\lambda = 155\text{--}170\text{ мкм}$ и фотохимическую диссоциацию воды в результате ионизирующего излучения пламени.

3. При дальнейшем повышении температуры более 850°C наступает этап «высокотемпературной плазмы» и радиолитическая диссоциация воды под воздействием рентгеновских лучей, приводящих к массовому образованию свободных радикалов, $-\text{OH}$, $-\text{CH}$, $-\text{C}_2\text{H}_5$ — обязательных элементов для продолжения цепных реакций.

4. Вследствие вышеперечисленных процессов происходит возникновение детонационных волн с частотой $\gamma = 5,5\text{ кГц}$, усиливающих процессы цепных реакций.

Цепные реакции являются весьма распространенными и обязательно протекают через образование и последующее взаимодействие свободных атомов или групп атомов-радикалов, играющих основную роль во всех химических реакциях. Цепные реакции могут протекать как в газовой, так и жидкой среде. Вода, содержащаяся в воздухе, топливе и образующаяся в результате сгорания углеводородов и спирта является катализатором, усиливающим выделение тепла при сгорании углеводородов.

Процесс диссоциации воды состоит из двух стадий: «холодной» и «высокотемпературной» плазмы.

В результате выделения теплоты и повышения давления происходит ионизация молекул углерода в интервале «холодной» плазмы с образованием спиртов, альдегидов, но самое главное — образуются активные частицы: атомы

водорода H , радикалы $-\text{OH}$, $-\text{OH}_2$, $-\text{CH}_2$, $-\text{C}_2\text{H}_5$. В дальнейшем в зоне «высокотемпературной» плазмы при $t > 850^\circ\text{C}$ происходит образование активных перекисей, радикалов, атомов.

При сгорании топлива в цилиндре ДВС температура горячих газов колеблется около 1800°C , поэтому часть продуктов, образовавшихся в процессе сгорания, диссоциирует, то есть происходит распад химических соединений на отдельные элементы. Диссоциировавшие продукты сгорания вновь окисляются. Это явление обуславливает приток теплоты в процессе расширения. Вода диссоциирует на водород и кислород, а при сгорании водорода образуется тепла в 4 раза больше, чем при сгорании углерода. Диссоциация воды — процесс эндотермический, поэтому с ростом температуры она усиливается, и реакция образования паров воды начинает протекать лишь при температуре выше 100°C . При сгорании углеводородного топлива вода или только ее следы являются катализатором, усиливающим процесс выделения тепла.

Масса воды, участвующей в сгорании топлива, определяется по формуле

$$W = W_o + S \cdot (\rho_{\phi} - \rho_o) - W_r, \quad (1)$$

где W_o — оптимальная масса продиссоциированной воды, кг; S — параметр чувствительности диссоциации, $\text{г} \cdot \text{м}^6 / \text{кг}^2$; ρ_{ϕ} — фактическая плотность смеси, $\text{кг} / \text{м}^3$; W_r — масса гидратированной воды, ушедшей в атмосферу вместе с отработанным газом, кг.

Реакции в пламени, идущие при высоких температурах и давлениях, несмотря на их сложный цепной характер, хорошо подчиняются классическим законам формальной кинетики. Скорость химической реакции определяется изменением во времени концентрации реагирующих веществ или образующихся продуктов реакции. В большинстве случаев концентрацию измеряют количеством данного вещества в единице объема, то есть плотностью ρ_{ϕ} или парциальным давлением P_{ϕ} :

$$\rho_{\phi} = \frac{P_{\phi} \cdot T_o \cdot \rho_o}{T_{\phi} \cdot P_o}, \quad (2)$$

где P_{ϕ} и P_o — фактическое и оптимальное давление в камере сгорания ДВС, $\text{кг} / \text{м}^2$; T_{ϕ} и T_o — фактическая и оптимальная температура в камере сгорания ДВС, К.

С учетом вышеизложенного формула для расчета массы воды, участвующей в сгорании топлива, в зависимости от параметров в камере сгорания двигателя имеет следующий вид [6]:

$$W = W_o + S \left(\frac{P_{\phi} \cdot T_o \cdot \rho_o}{T_{\phi} \cdot P_o} - \rho_o \right)^2 - W_{\Gamma}. \quad (3)$$

Оптимальное количество продиссоциированной воды при сгорании углеводородного топлива в смеси со спиртом можно определить по формуле

$$W_o = W_1 + W_2, \quad (4)$$

где W_1 — оптимальное количество продиссоциированной воды при сгорании углеводородного топлива, кг; W_2 — оптимальное количество продиссоциированной воды при сгорании спирта, кг.

Оптимальное количество продиссоциированной воды при сгорании углеводородного топлива (W_1) определяется по формуле

$$W_1 = \left(\frac{9H + W_{\Gamma} + W_{\text{вв}}}{100} \right) - W_{\Gamma}, \quad (5)$$

где W_{Γ} — количество воды, содержащейся в топливе, кг; $W_{\text{вв}}$ — количество воды, находящейся в воздухе; W_{Γ} — количество гидратированной воды, ушедшей в атмосферу вместе с отработанными газами, образовавшимися при сгорании углеводородного топлива, кг; $9H$ — количество воды, образуемой в результате сгорания водорода.

W_2 рассчитывается следующим образом:

или

$$W_2 = \text{C}_n\text{H}_{2n} + 1 + 0,5(3n + 1)\text{O}_2 = n\text{CO}_2 + (n + 1)\text{H}_2\text{O}$$

$$W_2 = 18(n + 1)/(14n + 2) = (9n + 9)/(7n + 1) = 18 \text{ кг}$$

Масса воды в результате сгорания 1 кг спирта составила 1,8 кг.

Таким образом, с учетом преобразований формула (4) принимает следующий вид:

$$W_o = \left[\left(\frac{9H + W_{\Gamma} + W_{\text{вв}}}{100} \right) - W_{\Gamma} \right] + \left[\left(\frac{9n + 9}{7n + 1} + W_{\text{вв}} \right) - W_{\Gamma} \right], \quad (6)$$

где W_{Γ} — количество гидратированной воды, ушедшей в атмосферу вместе с отработанными газами, образовавшимися при сгорании этанола, кг.

В результате преобразований формулы (3) была получена математическая модель для расчета массы воды, участвующей в сгорании этанола и углеводородного топлива:

$$W = \left[\left(\frac{9H + W_{\Gamma} + W_{\text{вв}}}{100} \right) - W_{\Gamma} \right] + \left[\left(\frac{9n + 9}{7n + 1} + W_{\text{вв}} \right) - W_{\Gamma} \right] + S \left(\frac{P_{\phi} \cdot T_o \cdot \rho_o}{T_{\phi} \cdot P_o} - \rho_o \right)^2 - W_{\Gamma}. \quad (7)$$

Масса атмосферных водяных паров $W_{\text{вв}}$ зависит от относительной влажности воздуха и определяется по формуле

$$W_{\text{вв}} = f \sigma_{\text{в}} \alpha L_o, \quad (8)$$

где $\sigma_{\text{в}}$ — абсолютное влагосодержание, кг/м³; f — коэффициент влажности воздуха; α — коэффициент избытка воздуха двигателей; L_o — теоретический удельный расход воздуха.

При относительной влажности воздуха более 60 % $f = 0,8$, меньше 60 % $f = 0,6$. В Тюменской области по данным кафедры ЭАТ ТИУ относительная влажность воздуха колеблется в диапазоне 60–87 % в течение 290 дней, а в оставшиеся дни менее 60 %². На основании этих данных можно определить количество влаги, попадающей в рабочую смесь. Для ДВС, работающем на этаноле, $W_{\text{вв}} = 0,196$ кг, а на углеводородном топливе $W_{\text{вв}} = 0,328$ кг.

Суммарная масса продуктов сгорания всегда равняется сумме компонентов, образующих горючую смесь [1, 3, 4]:

$$\sum_{i=1}^n m_{\text{кол}} = \sum_{i=1}^m m_{\text{сгор}}. \quad (9)$$

Массу продуктов сгорания для бензиновых ДВС определим по формуле [8]

$$\bar{m}_{\text{сгор}} = 1 + \alpha L_o + W_o. \quad (10)$$

Количество гидратированной воды, уходящей в атмосферу с отработанными газами (W_{Γ}) определяют экспериментально для каждого ДВС индивидуально в процентах от общей массы отработанных газов. Для двигателя MZR-2,3L3T автомобиля Mazda CX-7 это 3 % от общей массы отработанных газов при сгорании углеводородов [7] и 2,1 % при сгорании этанола: $W_{\Gamma} = 0,444$ кг, $W_{\Gamma} = 0,254$ кг.

² Архив погоды в Тюмени [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://rp5.ru/Архив_погоды_в_Тюмени (дата обращения: 31.01.19).

Параметр чувствительности S и ρ_o определяют в процессе исследования для каждой марки автомобиля индивидуально. В итоге формула продиссоциированной воды с добавлением 50 % этанола в топливо получит следующий вид:

$$W_3 = \left[\left(\frac{9H + W_T}{100} + W_{BB} \right) - 0,444 \right] + \left[\left(\frac{9n + 9}{7n + 1} + W_{BB} \right) - 0,254 \right] + S \left(\frac{P_\Phi \cdot T_o \cdot \rho_o}{T_\Phi \cdot P_o} - \rho_o \right)^2 - W_\Gamma. \quad (11)$$

Массу диссоциированной воды, полученной при сгорании углеводородного топлива, определяется по формуле

$$W_y = \left[\left(\frac{9H + W_T}{100} + W_{BB} \right) - W_{\Gamma y} \right] + S \left(\frac{P_\Phi \cdot T_o \cdot \rho_o}{T_\Phi \cdot P_o} - \rho_o \right)^2 - W_\Gamma. \quad (12)$$

При давлении воды во впускной коллектор массу диссоциированной воды рассчитаем по формуле

$$W_{H_2O} = \left[\left(\frac{9H + W_T}{100} + W_{BB} + W_\Phi \right) - W_{\Gamma y} \right] + S \left(\frac{P_\Phi \cdot T_o \cdot \rho_o}{T_\Phi \cdot P_o} - \rho_o \right)^2 - W_\Gamma, \quad (13)$$

где W_Φ — масса воды, распыленной во впускной коллектор.

На рис. 1, 2 и 3 представлены зависимости диссоциации воды при сгорании бензина, этанола и добавления воды в топливо при изменении температуры и давления в камере сгорания ДВС.

На рис. 1 при горении углеводородного топлива наблюдается максимальная масса при температуре 100 °С и давлении 50–60 кг/см². При дальнейшем повышении температуры идет резкое понижение и стабилизируется в интервале высокотемпературной плазмы 850–2300 °С. В интервале давлений 1–25 кг/см² наблюдается небольшое снижение в пределах 10 % количества продиссоциированной воды, и только начиная с 20 кг/см² происходит резкий рост диссоциации. При давлении 1–30 кг/см² масса диссоциированной воды практически не зависит от температуры.

В результате добавления воды во впускной коллектор (см. рис. 2) диссоциация воды максимальна в расширяющемся интервале температур горючей смеси — 100–1400 °С, то есть в интервале температур «холодной» и «высокотемпературной» плазмы. Постоянная масса диссоциации независимо от температуры находится в интервале давлений 1–15 кг/см². В результате сгорания бензина с добавлением воды в интервале температур 500–800 °С идет планомерное увеличение

Рис. 1. Масса диссоциированной воды при сгорании бензина

Рис. 2. Масса диссоциированной воды при сгорании бензина с добавлением воды

Рис. 3. Масса диссоциированной воды при сгорании бензина с добавлением этанола в смеси с водой

массы продиссоциированной воды, начиная с давления 1 кг/см^2 и до 60 кг/см^2 на 70–80 % увеличивая теплоту в камере сгорания. При добавлении воды до 30–50 % масса воды остается постоянной в интервале давлений $1\text{--}40 \text{ кг/см}^2$, увеличиваясь до 7 % в интервале $40\text{--}60 \text{ кг/см}^2$.

При добавлении этанола в топливо (см. рис. 3) максимальная диссоциация наблюдается в интервале температур $100\text{--}500 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $40\text{--}60 \text{ кг/см}^2$. При дальнейшем повышении температуры в камере сгорания от 450 до $850 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается снижение массы диссоциации воды при сгорании топлива без добавления этанола

Таблица 1

**Коэффициент диссоциации воды
при сгорании бензина**

Температура в цилиндре, °С	Давление в цилиндре двигателя, кг/см ²						
	5	10	20	30	40	50	60
100	1,03	1	1,033	1,175	1,43	1,79	2,26
200	1,038	1,001	1,007	1,07	1,21	1,41	1,068
300	1,05	1,02	1	1,029	1,11	1,23	1,4
400	1,05	1,025	1	1,01	1,06	1,13	1,25
500	1,054	1,031	1,004	1,003	1,027	1,08	1,16
600	1,06	1,035	1,008	1	1,01	1,045	1,1
700	1,06	1,04	1,01	1	1,004	1,03	1,06
800	1,062	1,04	1,016	1,002	1,002	1,016	1,04
900	1,064	1,046	1,019	1,004	1	1,008	1,026
1000	1,064	1,048	1,02	1,007	1	1,003	1,02
1200	1,07	1,05	1,029	1,01	1,002	1	1,004
1400	1,07	1,056	1,034	1,017	1,006	1	1
1600	1,07	1,06	1,038	1,022	1,01	1,003	1
1800	1,071	1,061	1,042	1,026	1,015	1,006	1
2000	1,073	1,069	1,045	1,03	1,018	1,009	1,002
2300	1,074	1,005	1,043	1,035	1,024	1,015	1,008

Таблица 2

**Коэффициент диссоциации воды
при сгорании бензина с добавлением воды**

Температура в цилиндре, °С	Давление в цилиндре двигателя, кг/см ²						
	5	10	20	30	40	50	60
100	1,093	1,062	1,584	2,66	4,2	6,23	8,79
200	1	1,032	1,33	1,94	2,86	4,1	5,64
300	1	1,01	1,19	1,58	2,2	3	4,03
400	1,007	1	1,115	1,38	1,8	2,37	3,1
500	1,03	1	1,07	1,26	1,56	1,98	2,52
600	1,012	1	1,045	1,18	1,41	1,73	2,15
700	1,015	1	1,028	1,13	1,3	1,55	1,88
800	1,017	1	1,018	1,09	1,23	1,43	1,68
900	1,019	1,004	1,01	1,07	1,18	1,34	1,55
1000	1,02	1,004	1,004	1,05	1,137	1,27	1,44
1200	1,023	1,009	1	1,028	1,09	1,175	1,3
1400	1,03	1,009	1	1,015	1,05	1,117	1,21
1600	1,03	1,015	1	1,007	1,04	1,08	1,15
1800	1,03	1,016	1	1	1,02	1,05	1,1
2000	1,035	1,02	1,003	1	1,004	1,04	1,08
2300	1,04	1,02	1,006	1	1,006	1,04	1,095

Таблица 3

**Коэффициент диссоциации воды
при сгорании бензина с добавлением
этанола в смеси с водой**

Температура в цилиндре, °С	Давление в цилиндре двигателя, кг/см ²						
	5	10	20	30	40	50	60
100	1,0239	1,002	1,025	1,132	1,321	1,592	1,95
200	1,029	1,008	1,005	1,054	1,163	1,31	1,512
300	1,034	1,014	1	1,022	1,08	1,17	1,3
400	1,038	1,019	1	1,008	1,041	1,099	1,19
500	1,04	1,023	1,003	1,003	1,021	1,06	1,12
600	1,043	1,027	1,006	1	1,01	1,035	1,075
700	1,045	1,03	1,009	1	1,005	1,02	1,033
800	1,047	1,03	1,01	1,002	1	1,01	1,03
900	1,05	1,035	1,015	1,003	1	1,006	1,02
1000	1,05	1,04	1,03	1,005	1	1,003	1,015
1200	1,05	1,04	1,02	1,01	1,002	1	1,004
1400	1,052	1,042	1,026	1,013	1,005	1	1
1600	1,053	1,044	1,029	1,016	1,01	1,002	1
1800	1,054	1,046	1,03	1,02	1,01	1,005	1
2000	1,06	1,05	1,036	1,026	1,02	1,01	1,005
2300	1,056	1,05	1,037	1,026	1,018	1,01	1,005

(см. рис. 1) и с добавлением (см. рис. 3) в интервале давлений 1–35 кг/см². При изменении давления 1–20 кг/см² в зоне высокотемпературной плазмы 850–1200 °С идет небольшое увеличение массы диссоциации воды до 5 % при добавлении этанола с дальнейшим понижением при повышении температуры на 20 %. При этом интервале давлений независимо от температуры наблюдается минимальный расход топлива.

На рис. 1, 2 и 3 с повышением температуры с 1200 до 2300 °С и интервале давлений 1–60 кг/см² масса диссоциированной воды остается практически постоянной для всех трех вариантов.

Для уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу до 20–30 % и повышения мощности бензиновых ДВС до 15–20 % необходима работа двигателя с применением максимального количества цепных реакций при сгорании смеси. С этой целью применяются корректирующие коэффициенты диссоциации воды, заложенные в бортовые компьютеры автомобилей, применение которых обеспечивает обеднение горючей смеси путем подачи этанола или дистиллированной воды во впускной коллектор двигателя. При

диссоциации воды в камере сгорания выделяют-ся водород, который окисляется при сгорании и выделяет дополнительное количество тепла. Вода, содержащаяся в воздухе, топливе и образующаяся в результате сгорания углеводородов является еще и катализатором, усиливающим процесс выделения тепла при сгорании. Для поддержания цепных реакций в процессе сгорания (как установлено на кафедре ЭАТ ТИУ) необходимо максимум 15–20 % энергии от полной энергии сгорания. Цепные реакции протекают как в газовой, так и в жидкой среде, образуя газообразный или жидкофазный цепной процесс. Максимальные температура и давление цикла ДВС зависят от массы диссоциированной воды, количество которой зависит от состава горючей смеси.

В целях облегчения работы бортовых компьютеров автомобилей для мгновенного определения массы диссоциированной воды вводятся корректирующие коэффициенты, от которых зависит длительность впрыска (количество подаваемого топлива) от нагрузки и частоты вращения коленчатого вала двигателя. Зависимость от массы диссоциированной воды и топлива задается в виде таблицы (характеристической карты), разработанной на основе всесторонних испытаний двигателя. Выбор данных из готовых таблиц является более быстрым процессом, чем выполнение вычислений сервером. Полученные по таблицам значения корректируются в зависимости от давления и температуры воздуха во впускном коллекторе. Корректирующие коэффициенты характеризуют реальный состав смеси, позволяющий достигать оптимального значения расхода топлива. В табл. 1, 2 и 3 представлены результаты расчетов корректирующих коэффициентов диссоциации воды при сгорании различных видов топлив.

При применении данных коэффициентов диссоциации в виде таблиц, заложенных в бортовые компьютеры автомобилей, позволяет поддерживать оптимальное обеднение горючей смеси, которая обеспечивает максимальную экономию топлива до 30 % от общего количества.

Библиографический список

1. Алексеев И. В., Богданов С. Н., Пришвин С. А. Методика выполнения теплового расчета. М.: МАДИ (ГТУ), 2004. Ч. 1. 85 с.
2. Аникина О. П. Определение оксигенатов в бензинах, реализуемых в Кузбасском регионе // «Россия молодая»: материалы VIII Всероссийской науч.-практ. конф. молодых ученых с международным участием. Кемерово: КГТУ им. Т. Ф. Горбачева, 2016. С. 10–14.
3. Артеменко А. И. Справочное руководство по химии. М.: Высшая школа, 2003. 536 с.
4. Гаврилов А. А., Игнатов М. С., Эфрос В. В. Расчет циклов поршневых двигателей. Владимир: Владимирский гос. ун-т, 2003. 124 с.
5. Ерохов В. И., Одинокое И. В. Применение спиртов в бензиновых двигателях и дизелях // Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовки кадров: материалы Международной науч.-техн. конф. «Ассоциации автомобильных инженеров». М.: МГТУ МАМИ, 2010. С. 106–115.
6. Карнаухов О. В., Карнаухов В. Н., Рындина О. В., Захаров Д. А., Карнаухова И. В. Влияние диссоциации на качественное сгорание углеводородов в дизельных ДВС // Вестник МАДИ. 2016. № 4 (47). С. 10–17.
7. Карнаухова И. В., Карнаухов В. Н., Захаров Д. А. Влияние диссоциации воды на расход топлива в двигателях внутреннего сгорания // Современные проблемы науки и образования, 2015. № 1-1. С. 352–360.
8. Карнаухова И. В., Карнаухов В. Н., Захаров Д. А. Влияние водяных паров на топливную экономичность двигателей внутреннего сгорания // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 3. С. 151–153.
9. Карпов С. А. Развитие производства этанола как альтернативного источника автомобильных топлив // Нефтегазовое дело, 2007. № 1. С. 2–15. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/KarpovSA/KarpovSA_3.pdf (дата обращения: 21.01.2019).
10. Онойченко С. Н. Применение оксигенатов при производстве перспективных автомобильных бензинов. М.: Изд-во «Техника», 2003. 64 с.
11. Семенов Н. Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 686 с.
12. Сибикин Ю. Д., Сибикин Б. Ю. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. М.: КНОРУС, 2012. 240 с.
13. Шароглазов Б. А., Фарафонов М. Ф., Клементьев В. В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. 287 с.

References

1. Alekseev I. V., Bogdanov S. N., Prishvin S. A. *Metodika vypolneniya teplovogo rascheta* [Methods of implementing the thermal calculation]. Moscow, MADI (GTU) Publ., 2004, pt. 1, 85 p.
2. Anikina O. P. *Opreделение oksigenatov v benzinakh, realizuemykh v Kuzbasskom regione* [Determination of oxygenates in gasoline sold in the Kuzbass region]. *Trudy VIII Vserossiyskoy nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem «Rossiya molodaya»* [Proc. of the VIII All-Russian sci. conf. of young scientists with international participation "Young Russia"]. Kemerovo, KGTU im. T. F. Gorbacheva Publ., 2016, pp. 10–14.
3. Artemenko A. I. *Spravochnoe rukovodstvo po khimii* [Reference book on chemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003, 536 p.
4. Gavrilov A. A., Ignatov M. S., Ehfras V. V. *Raschet tsiklov porshnevnykh dvigateley* [Calculation of piston engine cycles]. Vladimir, Vladimirskiy Gosudarstvennyy Universitet Publ., 2003, 124 p.
5. Erokhov V. I., Odinkova I. V. *Primenenie spirtov v benzinovykh dvigatelyakh i dizelyakh* [Application of spirits in gasoline engines and diesels]. *Trudy Mezhdunarodnoy nauch.-tekhn. konf. «Assotsiatsii avtomobil'nykh inzhenerov»*. *Avtomobile- i traktorostroenie v Rossii: priority razvitiya i podgotovki kadrov* [Proc. of the Int. sci. conf. "Association of automotive engineers". Automobile and tractor construction in Russia: priorities of development and personnel training]. Moscow, MGTU MAMI Publ., 2010, pp. 106–115.
6. Karnaukhov O. V., et al. *Vliyanie dissotsiatsii na kachestvennoe sgoranie uglevodorodov v dizel'nykh DVS* [The influence of dissociation on qualitative combustion of hydrocarbons in diesel engines]. *Vestnik MADI – Bulletin of MADI*, 2016, no. 4 (47), pp. 10–17.
7. Karnaukhova I. V., Karnaukhov V. N., Zakharov D. A. *Vliyanie dissotsiatsii vody na raskhod topliva v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya* [Influence of water dissociation on fuel consumption in internal combustion engines]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2015, no. 1 (1), pp. 352–360.
8. Karnaukhova I. V., et al. *Vliyanie vodyanykh parov na toplivnuyu ehkonomichnost' dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Influence of water vapors on fuel efficiency of internal combustion engines]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya – Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*, 2015, no. 3, pp. 151–153.
9. Karpov S. A. *Razvitie proizvodstva ehtanola kak al'ternativnogo istochnika avtomobil'nykh topliv* [Development of ethanol production as an alternative source of automotive fuels]. *Neftegazovoe delo – Oil and Gas Business*, 2007, no. 1, pp. 2–15. Available at: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/KarpovSA/KarpovSA_3.pdf (accessed: 21.01.2019).
10. Onoychenko S. N. *Primenenie oksigenatov pri proizvodstve perspektivnykh avtomobil'nykh benzinov* [The use of oxygenates in the production of promising motor gasoline kinds]. Moscow, Tekhnika Publ., 2003, 64 p.
11. Semenov N. N. *O nekotorykh problemakh khimicheskoy kinetiki i reaktivnoy sposobnosti* [On some problems of chemical kinetics and reactivity capacity]. Moscow, AN SSSR Publ., 1958, 686 p.
12. Sibikin Yu. D., Sibikin B. Yu. *Netraditsionnye i vozobnovlyaemye istochniki ehnergii* [Alternative and renewable sources of energy]. Moscow, KNORUS Publ., 2012, 240 p.
13. Sharoglazov B. A., Farafontov M. F., Klement'ev V. V. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: teoriya, modelirovanie i raschet protsessov* [Internal combustion engines: theory, modeling and calculation of processes]. Chelyabinsk, YuUrGU Publ., 2004, 287 p.