

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-225-231

УДК 621.436.038

Влияние состава топлива, содержащего бутанол, на показатели рабочего процесса дизеля

Магистр техн. наук Д. Г. Гершань¹⁾¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Выполнены расчеты влияния топлива, содержащего бутанол, на показатели рабочего процесса дизеля 4ЧН 11/12,5 на режимах внешней скоростной характеристики. Номинальная мощность двигателя 140 кВт при частоте вращения коленчатого вала 2300 мин⁻¹. Двигатель снабжен газотурбинным наддувом с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха, системой топливоподачи аккумуляторного типа. Расчет рабочего процесса выполнен по разработанной компьютерной программе и моделям. Исследования проводили в два этапа: без изменения регулировок системы топливоподачи и при цикловых подачах топлива, обеспечивающих на различных режимах работы величину коэффициента избытка воздуха на уровне, соответствующем работе на дизельном топливе. Выполнен анализ полученных результатов. Показано изменение среднего индикаторного давления, удельного индикаторного расхода топлива, индикаторного коэффициента полезного действия, удельных выбросов окислов азота для рассматриваемых режимов при использовании смесей дизельного топлива с содержанием бутанола 5, 10, 15, 20, 25 и 30 %. Установлены зависимости показателей работы дизеля по внешней скоростной характеристике на различных смесях, позволяющие обосновать параметры системы топливоподачи. Рекомендуется применение смеси дизельного топлива с бутанолом, содержащей 15 % бутанола, без изменения регулировочных и конструктивных параметров двигателя. Выявлено, что для улучшения показателей рабочего процесса двигателя состав смеси должен меняться с изменением режима работы. Разработан распылитель форсунки с составной иглой для системы топливоподачи, позволяющий изменять состав топлива в зависимости от режима работы двигателя.

Ключевые слова: рабочий процесс, дизельный двигатель, бутанол, распылитель форсунки

Для цитирования: Гершань, Д. Г. Влияние состава топлива, содержащего бутанол, на показатели рабочего процесса дизеля / Д. Г. Гершань // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 3. С. 225–231. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-225-231

Effect of Fuel Composition Containing Butanol on Working Process Parameters of Diesel Engine

D. G. Hershan¹⁾¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Calculations on the effect of fuel containing butanol on working process parameters of 4ЧН 11/12,5 diesel engine with the mode of an external speed characteristic have been carried out in the paper. Engine rated brake power is 140 kW with crankshaft speed of 2300 min⁻¹. The engine is equipped with gas turbine pressure charging with intercooling of charging air, accumulator-type fuel-handling system. Calculations of the working process have been made in accordance with the developed computer program and models. Investigations have been carried out in two stages: without any changes in regulation of fuel-handling system and with cyclic fuel delivery that ensure such value of excess air factor at various operational modes which corresponds to the operation with diesel fuel. All the obtained results have been analyzed in the paper. The paper

Адрес для переписки

Гершань Дмитрий Геннадьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-95-86
dvs_atf@bntu.by

Address for correspondence

Hershan Dmitriy G.
Belarusian National Technical University
12 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-95-86
dvs_atf@bntu.by

shows changes in mean indicated pressure, specific indicated fuel consumption, indicated efficiency, specific nitrogen oxides emissions for various modes in question while using 5, 10, 15, 20, 25 and 30 % mixture of diesel fuel with butanol. Dependences of parameters pertaining to diesel operation have been determined according to external speed characteristic for various mixtures and the obtained data make it possible to justify parameters of the fuel-handling system. It has been recommended to use a diesel fuel-butanol mixture containing 15 % of butanol without any changes in regulating and design engine parameters. It has been revealed that in order to improve parameters of the engine operational process mixture composition must be changed while changing the operational mode. An injector nozzle with a compound needle for the fuel-handling system has been developed and it allows to change fuel composition according to engine operational mode.

Keywords: operational process, diesel engine, butanol, injector nozzle

For citation: Hershman D. G. (2017) Effect of Fuel Composition Containing Butanol on Working Process Parameters of Diesel Engine. *Science and Technique*. 16 (3), 225–231. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-225-231 (in Russian)

Введение

Необходимость использования возобновляемых источников энергии для получения различных видов топлива не вызывает сомнений. В связи со стремлением к уменьшению зависимости от поставок нефти, решением экологических проблем, обусловленных использованием нефтепродуктов, за последние десятилетия в мире значительно вырос интерес к производству моторных топлив на основе возобновляемых источников.

В качестве альтернативного моторного топлива относительно недавно стал рассматриваться бутанол в связи с появлением технологий, позволяющих наладить его промышленное производство, хотя по своим свойствам он превосходит метанол и этанол, особенно для использования в дизелях. На сегодняшний день бутанол – один из наиболее прогрессивных видов альтернативного топлива [1–9]. Поэтому актуальны исследования влияния состава топлива, содержащего бутанол, на показатели рабочего процесса дизеля.

Основная часть

Бутанол (бутиловый спирт) C_4H_9OH – бесцветная жидкость с характерным запахом сиушного масла. Бутанол может производиться из биомассы (свеклы, пшеницы, ячменя, сахарного тростника, кукурузы, древесины и др.) и ископаемого топлива. Благодаря своим свойствам C_4H_9OH может использоваться в дизелях в виде смесей с дизельным топливом и путем отдельной подачи. Теплофизические и термохимические свойства бутанола приведены в табл. 1 [2, 4].

Расчет рабочего процесса выполняли по разработанной компьютерной программе «МРПД» и моделям «распылитель – топливо – течение» и «топливные струи – камера сгорания» [10–13]. Исследования проведены для дизеля 4ЧН 11/12,5 на режимах внешней скоростной

характеристики. Номинальная мощность двигателя 140 кВт при частоте вращения коленчатого вала 2300 мин⁻¹. Двигатель снабжен газотурбинным наддувом с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха, системой топливоподачи аккумуляторного типа.

Таблица 1

Теплофизические и термохимические свойства бутанола
Thermo-physical and thermochemical properties of butanol

Характеристика бутанола	Показатель
Плотность при 20 °С, кг/м ³	810
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм ² /с	3,64
Октановое число (исследовательский метод)	100
Цетановое число	18
Содержание серы, %	0
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	33,1
Теплота парообразования, кДж/кг	570
Количество воздуха, необходимое для полного сгорания 1 кг топлива, кг	11,2
Элементарный состав:	
g_C	0,649
g_H	0,135
g_O	0,216

На первом этапе исследования регулировочные и конструктивные параметры двигателя не изменялись. Исследовано влияние содержания бутанола в смеси с дизельным топливом $C_{бут}$ на изменение среднего индикаторного давления p_i , удельного индикаторного расхода топлива g_i , индикаторного коэффициента полезного действия (КПД) η_i , удельных выбросов окислов азота g_{NO_x} .

Зависимости среднего индикаторного давления от частоты вращения коленчатого вала при использовании дизельного топлива и его смесей с бутанолом с содержанием последнего 5, 10, 15, 20, 25 и 30 % представлены на рис. 1.

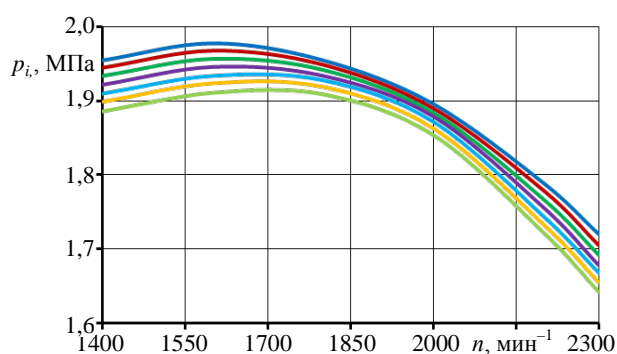


Рис. 1. Зависимость изменения среднего индикаторного давления от частоты вращения коленчатого вала при содержании бутанола в смеси, %:

— 0; — 5; — 10; — 15;
— 20; — 25; — 30

Fig. 1. Dependence of mean indicated pressure change on crankshaft speed with butanol content in mixture, %:

— 0; — 5; — 10; — 15;
— 20; — 25; — 30

Среднее индикаторное давление цикла с увеличением содержания бутанола в смеси уменьшается, причем оно различно для рассматриваемых режимов. Например, для режимов с частотой вращения коленчатого вала 1800–2100 мин⁻¹ в меньшей степени, чем для других. При $n = 1800$ мин⁻¹ для смесей с содержанием бутанола 10, 20 и 30 % снижение p_i по сравнению с дизельным топливом составляет 0,67; 1,40 и 2,40 %, а при $n = 2300$ мин⁻¹ p_i снижается на 1,6; 3,0 и 4,5 %.

При увеличении содержания бутанола в смеси удельный индикаторный расход топлива растет на всех скоростных режимах. При этом наименьший рост получается в диапазоне частот вращения 1800–2100 мин⁻¹. При $n = 1800$ и 2300 мин⁻¹ для 10-, 20-, 30%-х смесей увеличение g_i по сравнению с дизельным топливом составляет 0,67; 1,40; 2,40 % и 1,6; 3,0 и 4,5 % соответственно. Уменьшение среднего индикаторного давления и увеличение удельного индикаторного расхода топлива связаны с меньшей теплотворной способностью бутанола, чем дизельного топлива (табл. 1).

Индикаторный КПД двигателя с увеличением содержания бутанола в смеси повышается. При использовании 15- и 20%-х смесей увеличение по сравнению с дизельным топливом – не менее чем на 1,5 и 2,0 % во всем исследуемом диапазоне, кроме режимов с частотами, близкими 2200–2300 мин⁻¹. Такое изменение индикаторного КПД показывает, что при применении

смесей эффективность процесса сгорания не нарушается по сравнению с дизельным топливом.

Относительное изменение индикаторного КПД (δ_{η_i}) в зависимости от частоты вращения коленчатого вала при использовании смесей дизельного топлива с бутанолом по сравнению с дизельным топливом показано на рис. 2.

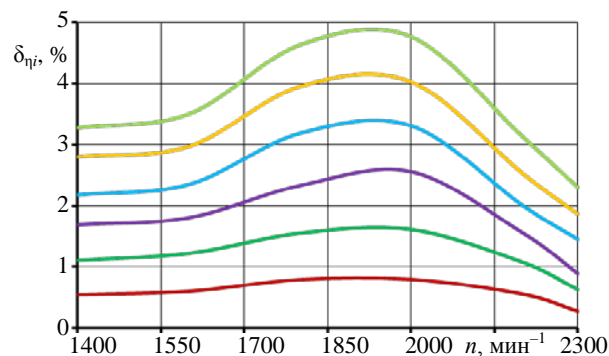


Рис. 2. Относительное изменение индикаторного коэффициента полезного действия при содержании

бутанола в смеси, %: — 5; — 10;
— 15; — 20; — 25; — 30

Fig. 2. Relative change of indicated efficiency with butanol content in mixture, %:

— 5; — 10; — 15;
— 20; — 25; — 30

Разброс значений индикаторного КПД в рассматриваемом диапазоне внешней скоростной характеристики для 5,0%-й смеси минимален и составляет не более 0,5 %, а для 30,0%-й максимален – не более 2,5 %. Для 15,0%-й смеси максимальное отклонение индикаторного КПД по режимам менее 1,7 %.

Содержание бутанола в смеси для режимов с частотами вращения 1400, 1600, 1800, 2000, 2200 и 2300 мин⁻¹ с учетом изменения p_i по сравнению с работой на дизельном топливе до 1 % показано на рис. 3.

При условии падения среднего индикаторного давления по сравнению с работой на дизельном топливе до 1,0 % для режима с частотой вращения коленчатого вала 2000 мин⁻¹ содержание бутанола в смеси не должно превышать 16,5 %; и это наибольшее значение из всех рассмотренных режимов. Для $n = 1400$ мин⁻¹ и $n = 2300$ мин⁻¹ содержание бутанола $C_{\text{бт}}$ соответственно 9,5 и 6,0 %. Такое влияние на вышеуказанные параметры определяется различиями в протекании процессов смесеобразования и сгорания на разных режимах работы двигателя.

Зависимость изменения удельных выбросов окислов азота от содержания бутанола в смеси с дизельным топливом представлена на рис. 4.

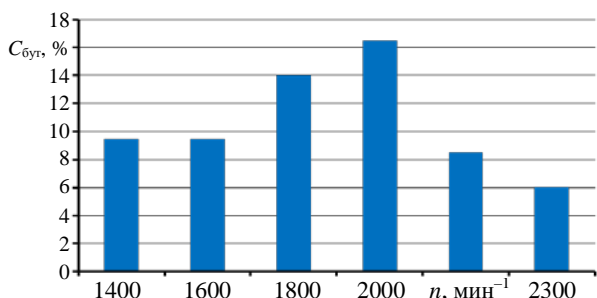


Рис. 3. Содержание бутанола в смеси в зависимости от частоты вращения при изменении p_i до 1,0 % (при неизменной цикловой подаче топлива)

Fig. 3. Butanol content in mixture due to engine speed while changing p_i up to 1,0 % (with unchangeable cyclic fuel supply)

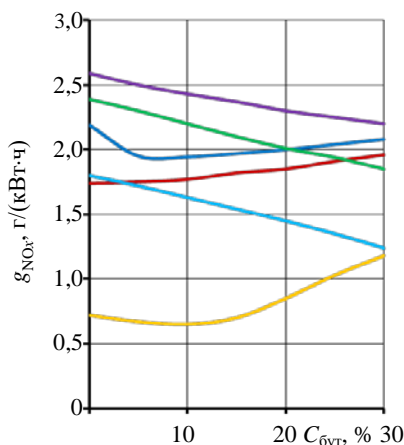


Рис. 4. Зависимость изменения удельных выбросов окислов азота от содержания бутанола в смеси при частоте вращения вала, мин^{-1} :

— 2300; — 2200; — 2000;
— 1800; — 1600; — 1400

Fig. 4. Dependence of specific nitrogen oxide emission change on butanol content in mixture with crankshaft speed, мин^{-1} :

— 2300; — 2200; — 2000;
— 1800; — 1600; — 1400

Влияние содержания бутанола в смеси на удельные выбросы окислов азота неодинаково. При частотах вращения коленчатого вала 1600, 1800 и 2000 мин^{-1} с увеличением содержания бутанола в смеси удельные выбросы окислов азота g_{NO_x} снижаются, при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ – растут, при 1400 и 2300 мин^{-1} – снижаются, а затем растут. Например, при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ для 10-, 20- и 30%-х смесей удельные выбросы окислов азота по сравнению с работой на дизельном топливе

снижаются на 6,2; 11,2 и 15,1 %; при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ – увеличиваются на 1,7; 6,3 и 12,6 %.

На втором этапе проводимых экспериментов проанализировано влияние исследуемых смесей на показатели рабочего процесса при условии сохранения значений коэффициентов избытка воздуха, соответствующих работе на дизельном топливе. Коэффициенты избытка воздуха поддерживались постоянными за счет изменения цикловой подачи топлива.

Зависимость среднего индикаторного давления от содержания бутанола в смеси с дизельным топливом для рассматриваемых скоростных режимов приведена на рис. 5.

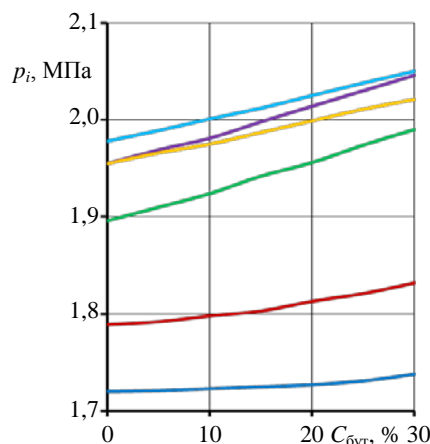


Рис. 5. Зависимость изменения среднего индикаторного давления от содержания бутанола в смеси (при сохранении коэффициента избытка воздуха) при частоте вращения вала, мин^{-1} :

— 2300; — 2200; — 2000;
— 1800; — 1600; — 1400

Fig. 5. Dependence of mean indicated pressure on butanol content in mixture (while maintaining air ratio)

with crankshaft speed, мин^{-1} : — 2300; — 2200;
— 2000; — 1800; — 1600; — 1400

Среднее индикаторное давление цикла растет с увеличением количества бутанола в смеси с дизельным топливом для всех рассмотренных режимов при поддержании коэффициента избытка воздуха постоянным для каждого скоростного режима. Интенсивность его роста различна для разных скоростных режимов. Наибольшее увеличение p_i получается при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ и для 10-, 20- и 30%-х смесей по сравнению с работой на дизельном топливе составляет 1,5; 3,2 и 5,0 %.

С ростом содержания бутанола в смеси при постоянстве коэффициента избытка воздуха для рассмотренных скоростных режимов удель-

ный индикаторный расход топлива увеличивается. Наименьшее изменение g_i получается при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, наибольшее – при $n = 2300 \text{ мин}^{-1}$ и для 10-, 20- и 30%-х смесей по сравнению с работой на дизельном топливе составляет 0,74; 1,40 и 2,00 % и 2,50; 4,40 и 5,90 % соответственно.

Удельные выбросы окислов азота с ростом концентрации бутанола в смеси при частотах вращения коленчатого вала 1400 и 1600 мин^{-1} растут, при 2200 и 2300 мин^{-1} – снижаются, при 1800 и 2000 мин^{-1} – снижаются, а затем растут. Например, при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ для 10-, 20- и 30%-х смесей удельные выбросы окислов азота по сравнению с работой на дизельном топливе снижаются на 1,7; 2,9 и 3,5 %; при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ для 10- и 20%-х смесей снижаются на 1,70 и 0,84 %, а для 30%-й смеси – растут примерно на 2,9 %. Таким образом, наименьшие изменения g_i и g_{NO_x} для всех исследуемых режимов в совокупности могут быть получены при сохранении коэффициентов избытка воздуха.

Индикаторный КПД двигателя растет при увеличении содержания бутанола в смеси. Наибольший относительный разброс значений индикаторного КПД при работе на смесях, по сравнению с дизельным топливом для рассматриваемых режимов, получается для 30%-й смеси, наименьший – для 5%-й смеси. Для 15%-й смеси максимальное отклонение удельного индикаторного КПД по режимам составляет не более 2,5 %.

Содержание бутанола в смеси для рассматриваемых режимов с учетом изменения p_i по сравнению с работой на дизельном топливе до 1 % при сохранении коэффициента избытка воздуха показано на рис. 6.

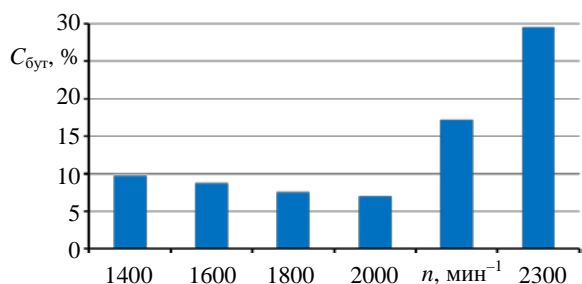


Рис. 6. Содержание бутанола в смеси в зависимости от частоты вращения при изменении p_i до 1 % при сохранении коэффициента избытка воздуха

Fig. 6. Butanol content in mixture due to engine speed while changing p_i up to 1 % while maintaining air ratio

При изменении среднего индикаторного давления по сравнению с работой на дизельном топливе не более чем на 1 % для режима с ча-

стотой вращения коленчатого вала 2000 мин^{-1} содержание бутанола в смеси не должно превышать 7 %. Для $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ и $n = 2300 \text{ мин}^{-1}$ $C_{\text{бут.}}$ должно быть 9,8 и 29,5 % соответственно.

Из приведенного анализа видно, что одинаковое содержание бутанола в смеси при работе на рассматриваемых скоростных режимах двигателя по-разному влияет на изменение среднего индикаторного давления, удельного индикаторного расхода топлив, индикаторного КПД, удельного выброса окислов азота. При выборе содержания бутанола в смеси с дизельным топливом необходимо учитывать изменение показателей рабочего процесса двигателя во всем диапазоне режимов его работы, разброс значений по режимам, возможность достижения требуемых показателей изменением регулировочных параметров двигателя.

Смесь дизельного топлива с бутанолом с концентрацией последнего до 15 % может быть использована в двигателе без изменения его регулировочных и конструктивных параметров. При этом сохраняется форма внешней скоростной характеристики с увеличением удельного индикаторного расхода топлива и падением среднего индикаторного давления 1,5–2,0 %. Чтобы получить наилучшие показатели работы двигателя в целом для каждого режима работы или их совокупности, целесообразно использовать смеси с различным содержанием бутанола. Для этого разработан распылитель форсунки для двухтопливной системы топливоподачи, дающий возможность изменять состав топлива в зависимости от режима работы.

Распылитель, содержащий составную иглу, позволяет производить раздельную подачу двух видов топлива и обеспечивать независимое управление характеристикой впрыскивания через верхний и нижний ряды распыливающих отверстий на каждом режиме работы дизельного двигателя и соответственно формировать многофазное впрыскивание с большим количеством видов характеристик впрыскивания для различных режимов работы двигателя. На разработанный распылитель форсунки (рис. 7) получен патент Республики Беларусь на изобретение № 18045 [14].

Распылитель форсунки содержит установленную в корпусе 1, имеющем в нижней части коническую запорную поверхность 2, составную иглу 3, состоящую из соосно расположенных наружной 4 и внутренней 5 частей, имею-

щих запорные поверхности 6, 7 и нажимные пояски 8, 9, камеру 10 высокого давления, образованную внутренней стенкой 11 корпуса и составной иглой, верхний 12 и нижний 13 ряда распыливающих отверстий, выполненных в нижней части корпуса. При этом запорные поверхности 6, 7 составной иглы расположены в ее вершине 14, а нажимной пояс 8 наружной части – в пределах камеры 10 высокого давления, которая сообщается с выполненным в корпусе каналом 15 для подвода топлива.

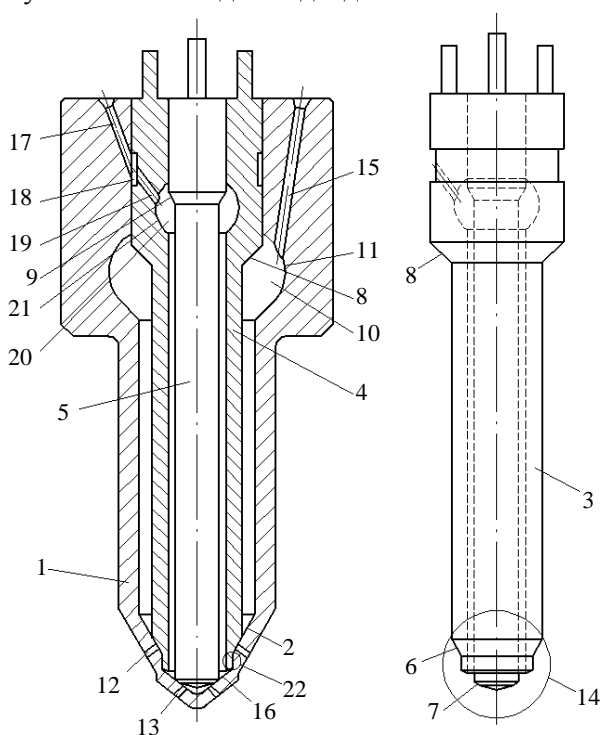


Рис. 7. Распылитель форсунки с составной иглой
Fig. 7. Injection nozzle with composite needle

Нижняя часть корпуса имеет дополнительную коническую запорную поверхность 16, в которой расположен нижний ряд 13 распыливающих отверстий с возможностью подачи к ним топлива через дополнительный канал 17 (в корпусе) для подвода топлива, канавку 18, топливopодводящий канал 19 (в наружной части составной иглы) и камеру 20 высокого давления, образованную внутренней стенкой 21 наружной и внутренней частями составной иглы, в пределах которой выполнен нажимной пояс 9 внутренней части составной иглы. Кроме того, наружная часть составной иглы образует с корпусом в его нижней части прецизионную пару 22, а наружная и внутренняя части составной иглы имеют возможность независимого перемещения.

ВЫВОДЫ

1. Установлены зависимости показателей работы дизеля по внешней скоростной характеристике на различных смесях без изменения регулировок системы топливоподачи и при цикловых подачах топлива, обеспечивающих на различных режимах работы величину коэффициента избытка воздуха на уровне, соответствующем работе на дизельном топливе, позволяющие обосновать параметры системы топливоподачи. При работе на смесях лучшие показатели удельного индикаторного расхода топлива g_i и удельных выбросов окислов азота g_{NO_x} получены при сохранении коэффициентов избытка воздуха.

2. Рекомендуется применение смеси дизельного топлива, содержащей 15 % бутанола, без изменения регулировочных и конструктивных параметров двигателя. При этом сохраняется форма внешней скоростной характеристики с изменением удельного индикаторного расхода топлива и среднего индикаторного давления на 1,5–2,0 %. Индикаторный КПД возрастает примерно на 1,5 %, что свидетельствует об эффективности протекания процессов смесеобразования и сгорания.

3. Установлено, что для улучшения показателей рабочего процесса двигателя состав смеси должен варьироваться с изменением режима работы. При условии изменения среднего индикаторного давления по сравнению с работой на дизельном топливе не более чем на 1 % для режимов с частотами вращения коленчатого вала 1400, 2000 и 2300 мин⁻¹ при неизменной подаче топлива и сохранении коэффициентов избытка воздуха путем варьирования подачи топлива содержание бутанола в смеси не должно превышать 9,5; 16,5; 6,0 % и 9,8; 7,0; 29,5 % соответственно.

4. Разработан распылитель форсунки с составной иглой для системы топливоподачи, позволяющий изменять состав топлива в зависимости от режима работы двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Двигатели внутреннего сгорания: в 3 кн. / В. Н. Луканин [и др.]; под ред. В. Н. Луканина. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2005. Кн. 1: Теория рабочих процессов. 479 с.
2. Емельянов, В. Е. Автомобильный бензин и другие виды топлива: свойства, ассортимент, применение / В. Е. Емельянов, И. Ф. Крылов. М.: Астрель: АСТ: Профиздат, 2005. 207 с.
3. Комаров, С. М. Тулунский бутанол: топливо из леса / С. М. Комаров // Химия и жизнь. 2009. № 5. С. 8–11.
4. Марков, В. А. Спиртовые топлива для дизельных двигателей / В. А. Марков, Н. Н. Патрахальцев // Транс-

- порт на альтернативном топливе. 2010. Т. 13, № 1. С. 22–26.
5. Investigation of the Performance and Emissions of Bus Engine Operating on Butanol/Diesel Fuel Blends / D. C. Rakopoulos [et al.] // *Fuel*. 2010. Vol. 89, No 10. P. 2781–2790.
 6. Butanol/Biobutanol as a Component of an Aviation and Diesel Fuel / W. Dziegielewski [et al.] // *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2014. Vol. 21, No 2. P. 69–75.
 7. Anil Kumar, Y. Performance and Emission Characteristics of Spark Ignition Engine Fuelled with Gasoline/n-Butanol Blends / Y. Anil Kumar, B. Prabakaran // *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*. 2015. Vol. 4, No 3. P. 257–263.
 8. Болотник, Е. В. Основы технологии получения биобутанола использованием отселектированного штамма *Clostridium acetobutylicum* БИМ В-709 Д / Е. В. Болотник. Минск: Нац. акад. наук Беларуси, 2015. 25 с.
 9. Перспективы использования сельскохозяйственных растительных культур для производства топлива в Республике Беларусь / О. А. Ивашкевич [и др.] // *Вестник БГУ. Сер. 2: Химия*. 2009. № 1. С. 4–13.
 10. Кухаренок, Г. М. Моделирование характеристик топливных струй и параметров камеры сгорания дизеля / Г. М. Кухаренок, Д. Г. Гершань // *Вестник БНТУ*. 2011. № 4. С. 35–39.
 11. Кухаренок, Г. М. Прогнозирование показателей рабочего процесса дизеля при использовании альтернативных топлив / Г. М. Кухаренок, Д. Г. Гершань // *Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов. Безопасность дорожного движения: сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2016. С. 284–291.*
 12. Гершань, Д. Г. Исследование характеристик топливных струй при применении смесей дизельного топлива с бутанолом / Д. Г. Гершань // *Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов: сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2015. С. 65–70.*
 13. Hershman, Dz. Coordination of Fuel Sprays Characteristics with Combustion Chamber Parameters / Dz. Hershman // *Proceedings of 12th EAEC European Automotive Congress, Bratislava, Slovak Republic, 29 June – 1 July 2009*. Bratislava, 2009. 57–58.
 14. Распылитель форсунки: пат. 18045 Респ. Беларусь, МПК F 02 M 61/10 / Г. М. Кухаренок, А. Н. Марчук, Д. Г. Гершань; дата публ. 28.02.2014.
 3. Komarov S. M. (2009) Tulun Butanol: Wood Fuel. *Khimiya i Zhizn* [Chemistry and Life], (5), 8–11 (in Russian).
 4. Markov V. A., Patrakhaltsev N. N. (2010) Alcohol Fuel for Diesel Engines. *Transport na Alternativnom Toplivo* [Alternative Fuels Transportation], 13 (1), 22–26 (in Russian).
 5. Rakopoulos D. C., Rakopoulos C. D., Hountalas D. T., Kakaras E. C., Giakoumis E. G., Papagiannakis R. G. (2010) Investigation of the Performance and Emissions of Bus Engine Operating on Butanol/Diesel Fuel Blends. *Fuel*, 89 (10), 2781–2790. DOI: 10.1016/j.fuel.2010.03.047.
 6. Dziegielewski W., Gawron B., Kaźmierczak U., Kulczycki A. (2014) Butanol/Biobutanol as a Component of an Aviation and Diesel Fuel. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 21 (2), 69–75. DOI: 10.5604/12314005.1133869.
 7. Anil Kumar Y., Prabakaran B. (2015) Performance and Emission Characteristics of Spark Ignition Engine Fuelled with Gasoline/n-Butanol Blends. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 3 (4), 257–263.
 8. Bolotnik E. V. (2015) *Main Principles of Technology for Obtaining Bio-Butanol while Using Selected Strain (Clostridium Acetobutylicum BIM V-709 D*. Minsk, National Academy of Sciences of Belarus. 25 (in Russian).
 9. Ivashkevich O. A., Kabo G. Ya., Blokhin A. V., Simirskii V. V., Lugovik Yu. N. (2009) Prospects for Using Agricultural Plant Crops for Fuel Production in the Republic of Belarus. *Vestnik Belorusskogo Gosudarstvenno Universiteta. Seriya 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya* [Vestnik BSU. Series 2: Chemistry. Biology. Geography], (1), 4–13 (in Russian).
 10. Kukharionok G. M., Gershan D. G. (2011) Simulation of Characteristics for Fuel jets and Parameters for Diesel Combustion Chamber. *Vestnik BNTU* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], (4), 35–39 (in Russian).
 11. Kukharionok G. M., Gershan D. G. (2016) Prediction of Indices for Diesel Working Process while Using Alternative Fuel. *Sovershenstvovanie Organizatsii Dorozhnogo Dvizheniya i Perevozok Passazhirov i Gruzov. Bezopasnost' Dorozhnogo Dvizheniya: Sb. Nauch. Tr.* [Improvement of Road Traffic Organization and Passenger and Freight Transportation. Road-Traffic Safety: Collection of Research Papers]. Minsk, Belarusian National Technical University, 284–291 (in Russian).
 12. Gershan D. G. (2015) Investigations on Characteristics of Fuel Jets while Applying Mixture of Diesel Fuel with Butanol. *Sovershenstvovanie Organizatsii Dorozhnogo Dvizheniya i Perevozok Passazhirov i Gruzov: Sb. Nauch. Tr.* [Improvement of Road Traffic Organization and Passenger and Freight Transportation: Collection of Research Papers]. Minsk: Belarusian National Technical University, 65–70 (in Russian).
 13. Hershman Dz. (2009) Coordination of Fuel Sprays Characteristics with Combustion Chamber Parameters. *Proceedings of 12th EAEC European Automotive Congress, Bratislava, Slovak Republic, 29 June – 1 July 2009*. Bratislava, 57–58.
 14. Kukharionok G. M., Marchuk A. N., Gershan D. G. (2014) *Injection Nozzle*. Patent Republic of Belarus no 18045 (in Russian).

Поступила 02.11.2016

Подписана в печать 05.01.2017

Опубликована онлайн 30.05.2017

REFERENCES

1. Lukanin V. N., Morozov K. A., Khachiyan A. S., Alekseev I. V., Golubkov L. N., Chernyak B. Ya., Trusov V. I., Kamfer G. M., Makhov V. Z., Prishvin S. A., Sinyavskii V. V., Matyukhin L. M., Nazarov N. I., Shatrov M. G. (2005) *Internal Combustion Engines. Book 1. Theory of Working Processes*. 2nd Edition. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 479 (in Russian).
2. Yemelianov V. E., Krylov I. F. (2005) *Motor Petrol and Other Types of Fuel: Properties, Range of Fuel, Application*. Moscow, Astrel Publ. 207 (in Russian).

Received: 02.11.2016

Accepted: 05.01.2017

Published online: 30.05.2017