



МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

УДК 621.436-634:502.17

Г.М. КУХАРЕНОК, д-р техн. наук, проф.
профессор кафедры «Двигатели внутреннего сгорания»¹
E-mail: kux@tut.by

Д.Г. ГЕРШАНЬ
старший преподаватель кафедры «Двигатели внутреннего сгорания»¹
E-mail: dimka_dvs@mail.ru

А.С. КЛИМУК
начальник отдела силовых агрегатов²
E-mail: ka1955@rambler.ru

¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 16.07.2020.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БУТАНОЛА В ДИЗЕЛЯХ В КАЧЕСТВЕ МОТОРНОГО ТОПЛИВА

Приведены результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований влияния содержания бутанола в топливе на удельные мощностные, топливно-экономические и экологические показатели дизеля 4ЧН 11/12,5 при различных цикловых подачах топлива и степенях рециркуляции отработавших газов. Исследования выполнены при частотах вращения коленчатого вала 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000 и 2200 мин⁻¹ с 25-, 50-, 75- и 100-процентной нагрузкой. Содержание бутанола в топливе составляло 5, 10, 15, 20, 25 и 30 % по объему. Разработана компьютерная модель рабочего процесса дизеля, которая учитывает физико-химические свойства топлива, характеристики течения топлива в носке распылителя и развития топливных струй в камере сгорания. По результатам компьютерного моделирования определены зависимости, позволяющие проводить оценку влияния процентного содержания бутанола в смесевом топливе на среднее индикаторное давление, удельный расход топлива, индикаторный КПД, выбросы оксидов азота и динамические показатели процесса сгорания при выборе состава смесевого бутанолсодержащего топлива. На основании проведенных исследований выбран следующий состав смесевого топлива: дизельное топливо 85 % и бутанол 15 %. Проведены сравнительные экспериментальные испытания дизеля при работе по внешней скоростной характеристике (ВСХ) на дизельном топливе и его смеси с 15 % бутанола. Получено, что при использовании смесевого топлива характер изменения мощности остается неизменным, дымность отработавших газов уменьшается, выбросы оксидов азота снижаются при частотах вращения коленчатого вала 1400, 1600, 1800 и 2200 мин⁻¹, эффективный КПД двигателя практически не изменяется.

Ключевые слова: бутанол, дизельное топливо, смесь, моделирование, рабочий процесс, дизель

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-2-55-81-87>

Введение. Одной из проблем при эксплуатации транспортных средств является их сильная зависимость от дизельного топлива. Использование аль-

тернативного дизельного топлива может сократить эту зависимость, а также уменьшить выбросы вредных веществ с отработавшими газами двигателей.

Из существующих видов альтернативного топлива для дизелей спирты привлекают все большее внимание исследователей. Среди спиртов бутанол является одним из наиболее перспективных видов альтернативного топлива. В настоящее время резко увеличилось количество исследований, посвященных использованию бутанола в дизелях в качестве моторного топлива [1–13].

Безусловно, роль основного вектора при выборе топлива отдается эффективности протекания внутрицилиндровых процессов, для оценки которых необходимо рассматривать изменение мощностных, топливно-экономических и экологических показателей.

Цель работы — выбор состава смесового топлива, содержащего бутанол, с учетом мощностных, топливно-экономических и экологических показателей дизеля.

Задачи:

- провести компьютерное моделирование внутрицилиндровых процессов с учетом физико-химических свойств топлива для определения показателей работы дизеля при использовании топлив, содержащих бутанол;
- определить закономерности изменения среднего индикаторного давления, удельного расхода топлива, выбросов оксидов азота (NO_x), индикаторного КПД, динамических показателей процесса сгорания при использовании видов топлива с различным содержанием бутанола;
- выбрать процентное содержание бутанола в дизельном топливе;
- провести сравнительные экспериментальные исследования показателей дизеля при работе по внешней скоростной характеристике на дизельном топливе и его смеси с бутанолом.

Основная часть. Расчетные и экспериментальные исследования рабочего процесса проведены для дизеля 4ЧН 11/12,5 с рециркуляцией отработавших газов при использовании смесового дизельного топлива, содержащего до 30 % бутанола по объему.

Расчетные исследования выполнены по разработанной компьютерной модели, включающей модель рабочего процесса дизеля и модели течения топлива в носке распылителя форсунки и развития топливных струй в камере сгорания [13–17].

В основу математической модели рабочего процесса дизеля положено уравнение первого закона термодинамики. Модель дополнена зависимостями для определения выбросов оксидов азота. Она учитывает параметры системы рециркуляции отработавших газов (РОГ) и позволяет проводить расчетные исследования при применении смеси дизельного топлива с бутанолом.

Массовые доли углерода, водорода и кислорода смесей дизельного топлива с бутанолом рассчитываются по зависимостям:

$$g_C = (1 - C_{\text{бут}}) \cdot g_{C_{\text{диз}}} + C_{\text{бут}} \cdot g_{C_{\text{бут}}}; \quad (1)$$

$$g_H = (1 - C_{\text{бут}}) \cdot g_{H_{\text{диз}}} + C_{\text{бут}} \cdot g_{H_{\text{бут}}}; \quad (2)$$

$$g_O = (1 - C_{\text{бут}}) \cdot g_{O_{\text{диз}}} + C_{\text{бут}} \cdot g_{O_{\text{бут}}}; \quad (3)$$

где $C_{\text{бут}}$ — массовая доля (содержание) бутанола в смеси с дизельным топливом; $g_{C_{\text{диз}}}$, $g_{H_{\text{диз}}}$, $g_{O_{\text{диз}}}$ — массовые доли углерода, водорода и кислорода в дизельном топливе; $g_{C_{\text{бут}}}$, $g_{H_{\text{бут}}}$, $g_{O_{\text{бут}}}$ — массовые доли углерода, водорода и кислорода в бутаноле.

Плотность смеси дизельного топлива с бутанолом:

$$\rho = \frac{\rho_{\text{диз}} \cdot \rho_{\text{бут}}}{(1 - C_{\text{бут}}) \cdot \rho_{\text{бут}} + C_{\text{бут}} \cdot \rho_{\text{диз}}}, \quad (4)$$

где $\rho_{\text{диз}}$ — плотность дизельного топлива; $\rho_{\text{бут}}$ — плотность бутанола.

Динамическая вязкость смеси в зависимости от содержания в ней бутанола:

$$\mu = 10^{(C'_{\text{бут}} \cdot \lg \mu_{\text{бут}} + (1 - C'_{\text{бут}}) \cdot \lg \mu_{\text{диз}})}, \quad (5)$$

где $C'_{\text{бут}}$ — мольная доля бутанола в смеси с дизельным топливом; $\mu_{\text{диз}}$ — коэффициент динамической вязкости дизельного топлива; $\mu_{\text{бут}}$ — коэффициент динамической вязкости бутанола.

Течение топлива в носке распылителя исследовалось с использованием уравнений Навье–Стокса. Развитие топливных струй описывается выражениями и критериальными зависимостями, представленными в работе [14].

В результате расчетных исследований получено, что содержание бутанола в дизельном топливе до 30 % практически не влияет на распределение давления и скорости течения топлива (рисунки 1 и 2) и характеристики топливных струй.

Исследовалось влияние содержания бутанола в топливе на удельные мощностные, топливно-экономические и экологические показатели дизеля при различных цикловых подачах топлива и степенях рециркуляции отработавших газов. Исследования проводились при частотах вращения коленчатого вала 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000 и 2200 мин^{-1} с 25-, 50-, 75- и 100-процентной нагрузкой.

Получены регрессионные зависимости для определения удельного индикаторного расхода топлива g_i , удельного выброса оксидов азота g_{NO_x} и среднего индикаторного давления p_i при различном содержании бутанола в топливе для режимов 13-ступенчатого экологического цикла ESC [15].

Например, для режима работы дизеля с нагрузкой 530 Н·м (75 %) и частотой вращения коленчатого вала 1400 мин^{-1} при изменении содержания бутанола в смеси 0...30 %, степени рециркуляции 11...19 % и цикловой подачи топлива 102...118 мм^3 регрессионные зависимости для определения удельного выброса оксидов азота и среднего индикаторного давления имеют вид:

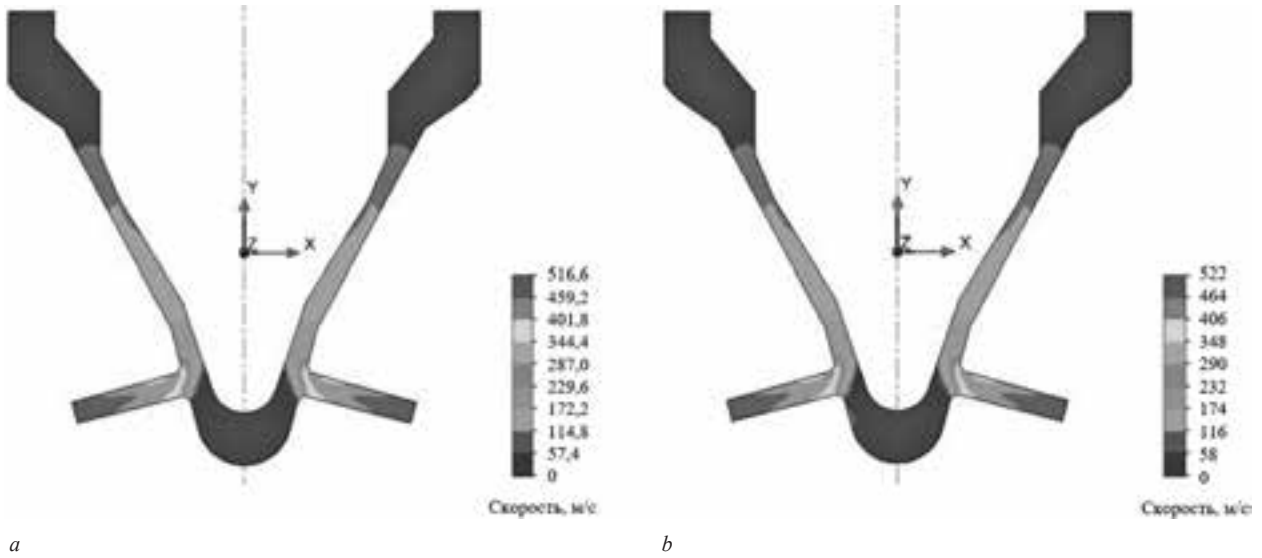


Рисунок 1 — Распределение скорости в носке распылителя при течении дизельного топлива (a) и его 30-процентной смеси с бутанолом (b)
 Figure 1 — Rate distribution in the nozzle tip during the flow of diesel fuel (a) and its 30 % mixture with butanol (b)

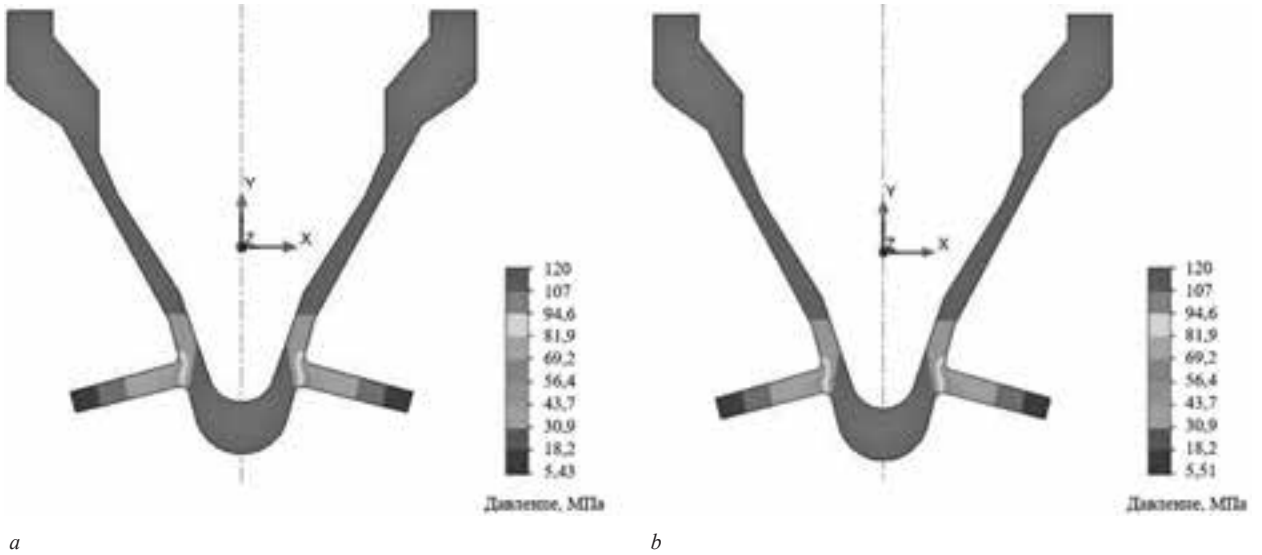


Рисунок 2 — Распределение давления в носке распылителя при течении дизельного топлива (a) и его 30-процентной смеси с бутанолом (b)
 Figure 2 — Pressure distribution in the nozzle tip during the flow of diesel fuel (a) and its 30 % mixture with butanol (b)

$$g_{NO_x} = 2,94 - 0,369 \cdot C_{\text{бут}}^* - 0,593 \cdot \rho_p^* + 1,497 \cdot g_{\text{ц}}^* + 0,074 \cdot (\rho_p^*)^2 - 0,135 \cdot (g_{\text{ц}}^*)^2 + 0,183 \cdot C_{\text{бут}}^* \cdot \rho_p^* - 0,15 \cdot C_{\text{бут}}^* \cdot g_{\text{ц}}^* - 0,151 \cdot \rho_p^* \cdot g_{\text{ц}}^* ; \quad (6)$$

$$p_i = 1,49 - 0,051 \cdot C_{\text{бут}}^* - 0,022 \cdot \rho_p^* + 0,095 \cdot g_{\text{ц}}^* - 0,002 \cdot (g_{\text{ц}}^*)^2 + 0,001 \cdot C_{\text{бут}}^* \cdot \rho_p^* - 0,002 \cdot C_{\text{бут}}^* \cdot g_{\text{ц}}^* - 0,003 \cdot \rho_p^* \cdot g_{\text{ц}}^* ; \quad (7)$$

где $C_{\text{бут}}^*$, ρ_p^* , $g_{\text{ц}}^*$ — приведенные значения содержания бутанола в смеси, степени рециркуляции и цикловой подачи топлива в натуральном масштабе измерений.

Выполнен анализ полученных зависимостей.

На рисунке 3 представлена зависимость удельного выброса оксидов азота от степени рециркуляции и содержания бутанола в смеси при цикловой подаче топлива 108 мм³.

Получено, что рост содержания бутанола в смеси ведет к снижению удельных выбросов оксидов азота во всем диапазоне изменения степени рециркуляции. Для 15-процентной смеси выброс оксидов азота снижается на 13,9 и 6,7 % по сравнению с дизельным топливом при степенях рециркуляции 11 и 19 % соответственно.

На рисунке 4 показана зависимость среднего индикаторного давления от цикловой подачи топлива и степени рециркуляции при содержании бутанола в смеси 15 %.

Для поддержания среднего индикаторного давления на том же уровне, что и при использовании

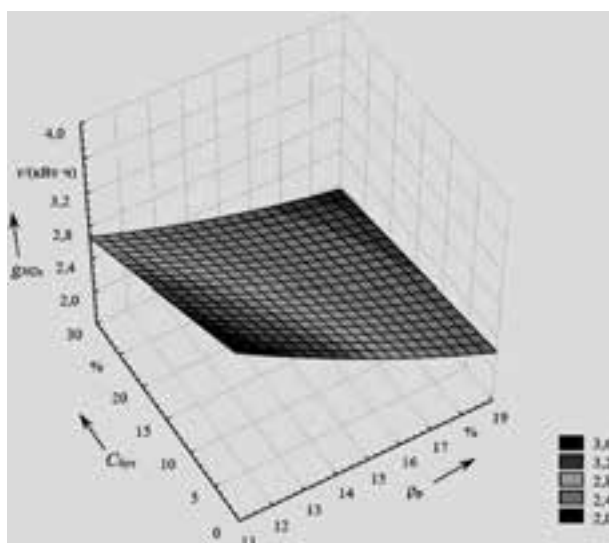


Рисунок 3 — Зависимость удельного выброса оксидов азота от степени рециркуляции и содержания бутанола в топливе
 Figure 3 — Dependence of the specific emission of nitrogen oxides on the degree of recirculation and butanol content in fuel

дизельного топлива, необходимо увеличивать цикловую подачу топлива. С ростом содержания бутанола до 15 % в смеси цикловую подачу при степени рециркуляции 11 % необходимо увеличить на 3,7 %.

Рассмотрены относительные изменения показателей рабочего процесса дизеля для выбора содержания бутанола в топливе.

Относительное изменение p_i и g_i с ростом содержания бутанола в топливе показано на рисунке 5. Для определения данных показателей использованы весовые коэффициенты 13-ступенчатого цикла ESC.

С увеличением содержания бутанола в смеси при неизменных регулировках топливной аппаратуры среднее индикаторное давление уменьшается, а удельный индикаторный расход увеличивается.

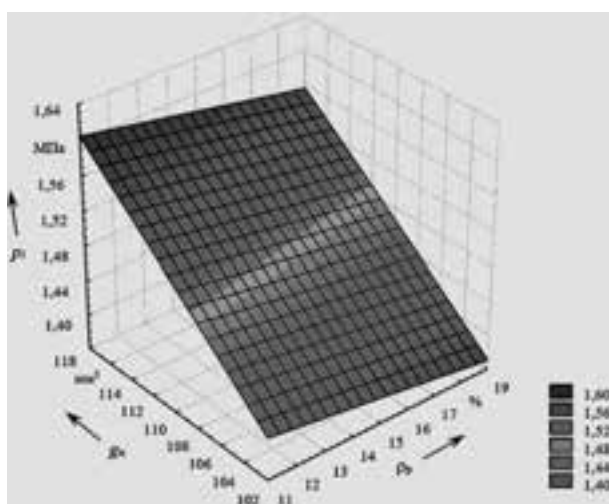


Рисунок 4 — Зависимость среднего индикаторного давления от цикловой подачи топлива и степени рециркуляции
 Figure 4 — Dependence of the average indicator pressure on the cyclic fuel supply and the degree of recirculation

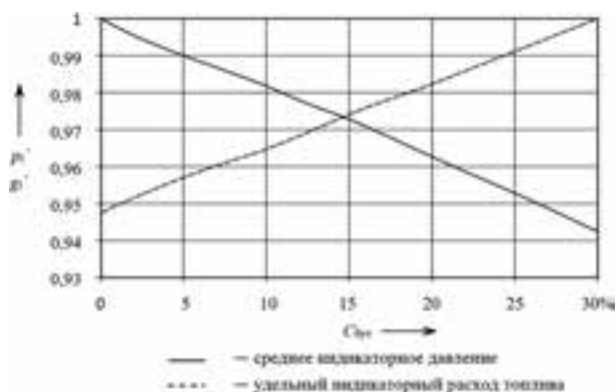


Рисунок 5 — Относительное изменение p_i и g_i с ростом содержания бутанола в топливе
 Figure 5 — Relative change in p_i and g_i with increasing butanol content in fuel

Снижение мощности двигателя и увеличение удельного расхода топлива обусловлено более низкой теплотворной способностью смеси по сравнению с дизельным топливом, а также снижением массового часового расхода топлива.

Содержание бутанола в топливе 13...15 % снижает p_i и увеличивает g_i на 2,5...3 %.

Влияние содержания бутанола в смеси на показатели рабочего процесса и динамические показатели процесса сгорания дизеля (максимальное давление сгорания p_z , жесткость процесса сгорания $\Delta p/\Delta \varphi$) представлено в таблице.

Основным показателем при оценке процесса сгорания является индикаторный КПД. С ростом содержания бутанола в смеси до 15 % индикаторный КПД практически не меняется, что свидетельствует об эффективности протекания рабочего процесса двигателя.

На основании проведенных расчетных исследований выбран следующий состав смеси: дизельное топливо 85 % и бутанол 15 %.

Экспериментальные исследования проведены на дизеле 4ЧН 11/12,5 при использовании дизельного топлива и его смеси с 15 % бутанола. Испытания проводились в лаборатории отдела главного конструктора Минского моторного завода на стенде, укомплектованном балансирной машиной

Таблица — Влияние смесей дизельного топлива с бутанолом на показатели двигателя

Table — Effect of diesel fuel mixtures with butanol on the engine performance

Показатель	Изменение показателя в зависимости от содержания бутанола в смеси
p_i	Снижается, согласно зависимости $\delta p_i = 20,37 \cdot C_{\text{бут}}$
g_i	Растет, согласно зависимости $\delta g_i = 18,45 \cdot C_{\text{бут}}$
p_z	Практически не изменяется
$\Delta p/\Delta \varphi$	Возрастает

IDS 1036 N, приборами и оборудованием, обеспечивающими точность измерений в соответствии с ГОСТ 18509.

Расход топлива измерялся расходомером ЛСИ 500.101.ЭЗ.1. Дымность ОГ замерялась дымометром AVL439 по методике Правил 24-03 ЕЭК ООН. Количество выбросов оксидов азота измерялось датчиком Continental Uninox Sensor 5WK9 6622A.

Для экспериментальных исследований разработана система топливоподачи, позволяющая осуществлять переменную подачу дизельного топлива или его смеси с бутанолом через отдельные трубопроводы с фильтрами тонкой очистки. Переменная подача осуществлялась переключателем, который был установлен перед топливоподкачивающим насосом ТНВД (топливный насос высокого давления).

Методика проведения испытаний предусматривала снятие внешних скоростных характеристик. Определение содержания NO_x в отработавших газах дизеля производилось путем снятия циклов токсичности согласно Правилам № 96 ЕЭК ООН.

Результаты испытаний показывают, что при использовании смесового топлива без регулировки цикловой подачи мощность двигателя по всей внешней скоростной характеристике уменьшается. Характер изменения мощности по внешней характеристике остается неизменным. Удельный эффективный расход топлива g_e растет не более чем на 4 %.

Дымность отработавших газов при работе двигателя на смеси в исследованном скоростном диапазоне меньше, чем при применении дизельного топлива (рисунок 6). Наибольшее уменьшение отмечено при частоте 1000 мин^{-1} и составляет 15 % HSU. При более высоких значениях частоты вращения отличие меньше и составляет от 0,5 до 5,5 % HSU. Снижение дымности обусловлено ростом коэффициента избытка воздуха, что связано с наличием кислорода в бутаноле (21,6 %).

Выбросы оксидов азота при работе на 15 % смеси снижаются при частотах вращения 1400, 1600, 1800 и 2200 мин^{-1} по сравнению с исполь-

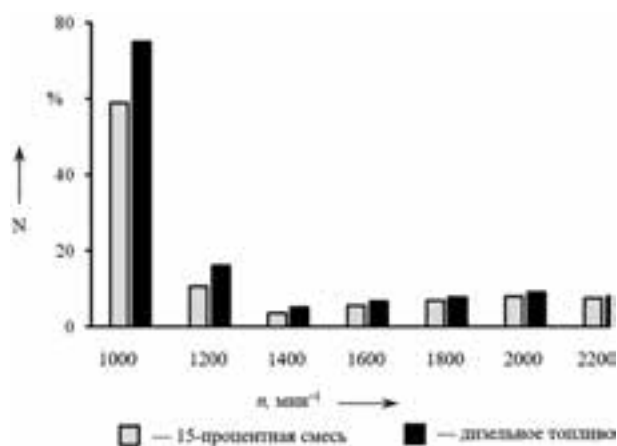


Рисунок 6 — Изменение дымности отработавших газов по ВСХ
Figure 6 — Change in smoke content of exhaust gases by external speed characteristics

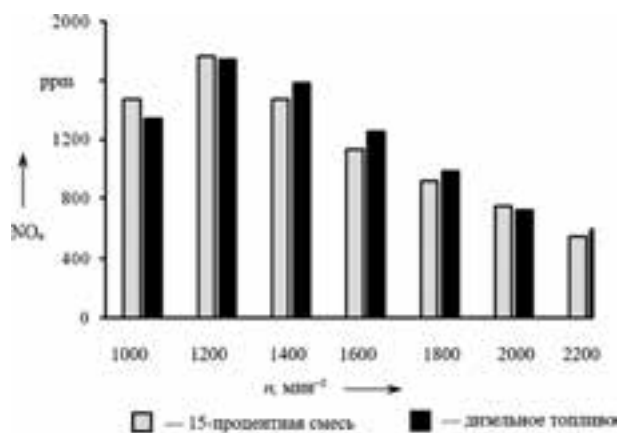


Рисунок 7 — Изменение выбросов оксидов азота по ВСХ
Figure 7 — Change in emissions of nitrogen oxides by external speed characteristics

зованием дизельного топлива, наибольшее снижение получается при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ и $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ и составляет 112 и 122 ppm соответственно, на остальных рассматриваемых частотах вращения увеличиваются с наибольшим увеличением на 132 ppm при $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ (рисунок 7). Эффективный КПД двигателя при работе на смеси увеличивается в среднем на 1 %, что указывает на практическую идентичность процессов сгорания при использовании обоих топлив.

Выводы. 1. Разработана компьютерная модель рабочего процесса дизеля, учитывающая физико-химические свойства топлива, характеристики течения топлива в носке распылителя и развития топливных струй в камере сгорания, позволяющая определять показатели работы дизеля при использовании топлив, содержащих бутанол.

2. Проведено компьютерное моделирование рабочего процесса дизеля и определены зависимости, позволяющие проводить оценку влияния процентного содержания бутанола в смесевом топливе на среднее индикаторное давление, удельный расход топлива, индикаторный КПД, выбросы оксидов азота и динамические показатели процесса сгорания при выборе состава смесового бутанол-содержащего топлива.

3. При работе дизеля 4ЧН 11/12,5 по внешней скоростной характеристике на смеси, содержащей по объему 15 % бутанола, по сравнению с использованием дизельного топлива:

- характер изменения мощности остается неизменным;
- дымность отработавших газов при работе двигателя на смеси меньше, чем при применении дизельного топлива;
- выбросы оксидов азота при работе на 15 % смеси снижаются при частотах вращения коленчатого вала 1400, 1600, 1800 и 2200 мин^{-1} .

4. Выбран состав смесового топлива: дизельное топливо 85 % и бутанол 15 % для использования в качестве моторного топлива для дизелей.

Список литературы

1. Кухаренок, Г.М. Влияние состава бутанолсодержащего топлива на процесс сгорания дизеля / Г.М. Кухаренок, Д.Г. Гершань // Сб. науч. тр. / БНТУ. — Минск, 2017. — Организация дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов и транспорт. — С. 68–74.
2. Болотник, Е.В. Основы технологии получения биобутанола использованием отселектированного штамма *clostridiumacetobutylicum* БИМ В-709 Д; автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.01.06 / Е.В. Болотник; Нац. акад. наук Беларуси. — Минск, 2015. — 25 с.
3. 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. — Pp. 69–75.
4. 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. — Pp. 257–263.
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. — Pp. 2781–2790. DOI: 10.1016/j.fuel.2010.03.047.
6. Impact of Diesel-butanol Blends on Performance and Emission of Diesel Engine / R.L. Swamy [et al.] // Oil Gas Res. — 2015. — Vol. 1, iss. 1. — 7 p. DOI: 10.4172/2472-0518.1000101.
7. Kumar, N. Blending of Higher Alcohols with Vegetable Oil Based Fuels for Use in Compression Ignition Engine / N. Kumar, S. Bansal, H. Pali // SAE Technical Paper. — 2015. DOI: 10.4271/2015-01-0958.
8. Study on Performance and Emissions of a Passenger-Car Diesel Engine Fueled with Butanol—Diesel Blends / Z. Chen [et al.] // Energy. — 2013. — no. 55. — Pp. 638–646.
9. The Influence of Diesel Fuel-biodiesel-ethanol-butanol Blends on the Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine / A. Keskin [et al.] // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. — 2013. — Vol. 35, iss. 19. — Pp. 1873–1881. DOI: 10.1080/15567036.2010.529568.
10. Performance Characteristics of n-Butanol-Diesel Fuel Blend Fired in a Turbo-Charged Compression Ignition Engine. / L. Siwale [et al.] // Journal of Power and Energy Engineering. — 2013. — no. 1. — Pp. 77–83.
11. Combustion and emissions characteristics of a compression ignition engine fuelled with N-butanol blends. / I.M. Yusria [et al.] // Jurnal Teknologi. — 2015. — Vol. 77, no. 8. — Pp. 69–73.
12. Bio-Butanol — Alternative Fuel for Diesel Engine / A.I. Dobre [et al.] // INMATEH — Agricultural Engineering. — 2014. — Vol. 42, no. 1. — Pp. 145–152.
13. 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.
14. Кухаренок, Г.М. Моделирование характеристик топливных струй и параметров камеры сгорания дизеля / Г.М. Кухаренок, Д.Г. Гершань // Вестн. БНТУ. — 2011. — № 4. — С. 35–39.
15. Кухаренок, Г.М. Методика прогнозирования влияния состава и свойств топлив на показатели рабочего процесса дизеля / Г.М. Кухаренок, Д.Г. Гершань // Изобретатель. — 2017. — № 4. — С. 42–45.
16. Hershman, Dz. Coordination of fuel sprays characteristics with combustion chamber parameters / Dz. Hershman // 12th EAEC 2009 European Automotive Congress, Bratislava 29 June – 1 July 2009. — Bratislava, 2009. — Pp. 57–58.
17. 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. / БНТУ. — Минск, 2015. — С. 65–70.

KUKHARONAK Heorhi M., D. Sc. in Eng., Prof.

Professor of the Department “Internal Combustion Engines”¹

E-mail: kux@tut.by

HERSHAN Dmitriy G.

Senior Lecturer of the Department “Internal Combustion Engines”¹

E-mail: dimka_dvs@mail.ru.

KLIMUK Anatoliy S.

Head of the Department of Power Units²

E-mail: ka1955@rambler.ru

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

²Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 16 July 2020.

USE OF BUTANOL IN DIESEL ENGINES AS A MOTOR FUEL

The article presents the results of computer modeling and experimental research of the effect of butanol content in the fuel on the specific power, fuel-economic and environmental performance of 4ChN 11/12.5 (4ChN 11/12.5) diesel engine at various cycle fuel supplies and exhaust gas recirculation rates. The research has been carried out at crankshaft speeds of 1,000, 1,200, 1,400, 1,600, 1,800, 2,000 and 2,200 rpm with 25, 50, 75 and 100 % load. Fuels with butanol content of 5, 10, 15, 20, 25, and 30 % by volume have been investigated. The computer model of the diesel working process has been developed that takes into account the physical and chemical properties of the fuel, the characteristics of the fuel flow in the nozzle tip and the development of fuel sprays in the combustion chamber. Based on the results of computer modeling, dependencies have been determined that make it possible to assess the effect of the percentage of butanol in mixed fuel on the mean indicator pressure, specific fuel consumption, indicator efficiency, emissions of nitrogen oxides and dynamic indicators of the combustion process when choosing the composition of mixed

butanol-containing fuel. Based on the conducted research, the following composition of mixed fuel has been selected: 85 % diesel fuel and 15 % butanol. Comparative tests of the diesel engine have been carried out when working on the external speed characteristic on diesel fuel and its mixture with 15 % butanol. It is obtained that when using mixed fuel, the character of the power change remains unchanged, the exhaust smoke decreases, nitrogen oxides emissions decrease at crankshaft speeds of 1,400, 1,600, 1,800, and 2,200 rpm, and the effective engine efficiency remains practically unchanged.

Keywords: butanol, diesel fuel, mixture, modeling, working process, diesel engine

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-2-55-81-87>

References

- Kukharenek G.M., Gershan D.G. Vliyanie sostava butanol-soderzhashchego topliva na protsess sgoraniya dizelya [Influence of composition of fuel containing butanol on diesel combustion process]. *Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya i perevozok passazhirov i gruzov i transport*, 2017, pp. 68–74 (in Russ.).
- Bolotnik E.V. *Osnovy tekhnologii polucheniya biobutanola ispolzovaniem otlektirovannogo shamma clostridiumacetobutylicum BIM V-709 D*. Diss. kand. biolog. nauk [Fundamentals of technology for producing biobutanol using a selected strain of clostridiumacetobutylicum BIM B-709 D (BIM V-709 D). Extended Extract of Ph. D. Thesis]. Minsk, 2015. 25 p. (in Russ.).
- Dziegielewski W., Gawron B., Kaźmierczak U., Kulczycki A. Butanol/biobutanol as a component of an aviation and diesel fuel. *Journal of KONES powertrain and transport*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 69–75. DOI: <https://doi.org/10.5604/12314005.1133869>.
- Kumar A.Y., Prabakaran B. Performance and emission characteristics of spark ignition engine fuelled with gasoline/n-butanol blends. *International journal of engineering sciences & research technology*, 2015, vol. 3, no. 4, pp. 257–263.
- Rakopoulos D.C., Rakopoulos C.D., Hountalas D.T., Kakaras E.C., Giakoumis E.G., Papagiannakis R.G. Investigation of the performance and emissions of bus engine operating on butanol/diesel fuel blends. *Fuel*, 2010, vol. 89, no. 10, pp. 2781–2790. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.03.047>.
- Swamy R.L., Chandrashekar T.K., Banapurmath N.R., Khandal S.V. Impact of diesel-butanol blends on performance and emission of diesel engine. *Oil & gas research*, 2015, vol. 1, iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.4172/2472-0518.1000101>.
- Kumar N., Bansal S., Pali H. *Blending of higher alcohols with vegetable oil based fuels for use in compression ignition engine*. SAE Technical Paper, no. 2015-01-0958, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4271/2015-01-0958>.
- Chen Z., Liu J., Han Z., Du B., Liu Y., Lee C. Study on performance and emissions of a passenger-car diesel engine fueled with butanol–diesel blends. *Energy*, 2013, no. 55, pp. 638–646.
- Keskin A., Yaar A., Reitolu I., Akar M. A., Sugz I. The influence of diesel fuel-biodiesel-ethanol-butanol blends on the performance and emission characteristics of a diesel engine. *Energy sources, Part A: Recovery, utilization, and environmental effects*, 2013, vol. 35, iss. 19, pp. 1873–1881. DOI: <https://doi.org/10.1080/15567036.2010.529568>.
- Siwale L., Kristóf L., Adam T., Bereczky A., Penninger A., Mbarawa M., Kolesnikov A. Performance characteristics of n-butanol-diesel fuel blend fired in a turbo-charged compression ignition engine. *Journal of power and energy engineering*, 2013, no. 1, pp. 77–83.
- Yusria I.M., Akasyaha M.K., Mamatb R., Ali O.M. Combustion and emissions characteristics of a compression ignition engine fuelled with n-butanol blends. *Jurnal teknologi*, 2015, vol. 77, no. 8, pp. 69–73.
- Dobre A., Pană C., Nuțu N.C., Negurescu N., Cernat A., Bondoc I.D. Bio-butanol – alternative fuel for diesel engine. *IN-MATEH – agricultural engineering*, 2014, vol. 42, no. 1, pp. 145–152.
- Hershan D.G. Vliyanie sostava topliva, soderzhashchego butanol, na pokazateli rabocheho protsessa dizelya [Effect of composition of fuel containing butanol on working process parameters of diesel engine]. *Science & technique*, 2017, vol. 16, no. 3, pp. 225–231 (in Russ.).
- Kukharonak G.M., Hershan D.G. Modelirovanie kharakteristik toplivnykh struy i parametrov kamery sgoraniya dizelya [Modelling of fuel spray characteristics and diesel combustion chamber parameters]. *Vestnik BNTU*, 2011, no. 4, pp. 35–39 (in Russ.).
- Kukharonak G.M., Hershan D.G. Metodika prognozirovaniya vliyaniya sostava i svoystv topliv na pokazateli rabocheho protsessa dizelya [Method of predicting the influence of composition and properties of fuels on working indicators of the diesel engine]. *Izobretatel*, 2017, no. 4, pp. 42–45 (in Russ.).
- Hershan D.G. Coordination of fuel sprays characteristics with combustion chamber parameters. *Proceedings of 12th EAEC European Automotive Congress*. Bratislava, 2009, pp. 57–58.
- Gershan D.G. Issledovanie kharakteristik toplivnykh struy pri primenenii smesey dizelnogo topliva s butanolom [Investigation of fuel sprays characteristics at application of butanol-diesel blends]. *Sovershenstvovanie organizatsii dorozhnogo dvizheniya i perevozok passazhirov i gruzov*, 2015, pp. 65–70 (in Russ.).