

**Шекихачев Ю.А., Батыров В.И., Болотоков А.Л., Шекихачева Л.З.
Shekikhachev Yu.A., Batyrov V.I., Bolotokov A.L., Shekikhacheva L.Z.**

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА БИОТОПЛИВНОЙ СМЕСИ OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF BIOFUEL MIXTURE

В настоящее время практически во всех промышленно развитых странах ведутся работы по созданию биотоплива из растительных масел (РМ). Во Франции на основе РМ создано экологически чистое топливо, получившее название «Диэстро». Результаты испытаний показали снижение до 50% выброса сажи. Фирма «Джон-Диер» (США) проводила испытания дизеля модели 152 на биотопливе из растительного масла, бутанола и этанола. Установлено, что при работе на биотопливе мощность дизеля сохранилась, несмотря на пониженную на 19%, по отношению к ДТ, теплоту сгорания. Хорошие результаты показал дизель фирмы «Дейтц» (Германия) F3L413W, который работал на смеси 40% ДТ, 40% РМ, 19% воды и 1% эмульгатора. По заключению специалистов фирмы для широкого применения указанной композиции требуется решение ряда проблем: предотвращение нагара на днище поршня, головки и клапанах, а также на носке распылителя форсунки; требуются мероприятия по улучшению распыливания более вязкого топлива. В Австрии проведены испытания дизеля Streyt WD209 на смеси подсолнечного масла с ДТ при разных их соотношениях. Снижение мощности дизеля при работе на растительном масле по сравнению с ДТ не превышало 10%.

В экономическом отношении наиболее выгодно производить этиловый спирт и растительные масла из сельскохозяйственных культур, а метиловый спирт – как из древесины, так и из ее отходов. Топливные спирты и растительные масла можно использовать для частичной или полной замены традиционных моторных топлив (бензина и дизельного топлива). Особенный интерес представляет получение биотоплива на основе рапсового масла и спиртов, что позволяет полностью исключить потребности топлива нефтяного происхождения.

При работе на биотопливных композициях дизель сохраняет свои функциональные качества. Мощность и экономичность дизеля при этом уменьшается пропорционально снижению энергоемкости и цикловой подачи топлива.

Использование в качестве топлива растительных, или биотоплив, выполненных на основе растительных масел с добавлением дизельного топлива или спиртов, вносит существенные изменения в протекание процесса сгорания. Биотоплива обладают меньшим цетановым числом, то есть меньшей склонностью к самовоспламенению. Поэтому следует ожидать увеличения периода задержки воспламенения.

Несмотря на увеличение периода задержки воспламенения, дизели, работающие на биотопливе, имеют более низкие скорости нарастания давления и меньшую интенсивность тепловыделения.

Применение биотопливных композиций, составленных на основе растительных масел и этилового спирта, сохраняет функциональные свойства дизеля при некотором ухудшении энергетических и экономических показателей, которое пропорционально уменьшению низшей теплотворной способности используемых топлив.

Currently, in almost all industrialized countries, work is underway to create biofuels from vegetable oils (VO). In France, on the basis of the Republic of Moldova, environmentally friendly fuel was created, called the "Diestro". Test results showed a reduction of up to 50% in soot emissions. The company "John-Diere" (USA) tested the diesel model 152 on biofuels from vegetable oil, butanol and ethanol. It was established that when working on biofuel, the diesel

power was preserved, despite the heat of combustion reduced by 19%, in relation to diesel fuel. Good results were shown by a Deutz diesel engine (Germany) F3L413W, which worked on a mixture of 40% DT, 40% PM, 19% water and 1% emulsifier. According to the conclusion of the company's specialists for the widespread use of this composition, a number of problems need to be solved: carbon deposits are prevented on the piston bottom, heads and valves, as well as on the tip of the nozzle atomizer; measures are required to improve the atomization of more viscous fuels. In Austria, the Streyr WD209 diesel engine was tested on a mixture of sunflower oil and diesel fuel at different ratios. The decrease in diesel power when working on vegetable oil compared to diesel fuel did not exceed 10%.

In economic terms, it is most beneficial to produce ethyl alcohol and vegetable oils from crops, and methyl alcohol from both wood and its waste. Fuel alcohols and vegetable oils can be used to partially or completely replace traditional motor fuels (gasoline and diesel fuel). Of particular interest is the production of biofuel based on rapeseed oil and alcohols, which completely eliminates the needs of fuels of petroleum origin.

When working on biofuel compositions, a diesel engine retains its functional qualities. At the same time, the power and efficiency of a diesel engine is reduced in proportion to a decrease in energy intensity and cyclic fuel supply.

The use of vegetable, or biofuels, made on the basis of vegetable oils with the addition of diesel fuel or alcohols, makes significant changes in the course of the combustion process. Biofuels have a lower cetane number, i.e. a lower propensity for self-ignition. Therefore, an increase in the ignition delay period should be expected.

Despite the increase in the ignition delay period, biofuel diesel engines have lower pressure buildup rates and lower heat generation rates.

The use of biofuel compositions based on vegetable oils and ethyl alcohol preserves the functional properties of a diesel engine with some deterioration in energy and economic indicators, which is proportional to a decrease in the lower calorific value of the fuels used.

Ключевые слова: энергия, бензин, дизельное топливо, биотопливо, свойства, растительное масло.

Key words: energy, gasoline, diesel fuel, biofuel, properties, vegetable oil.

Шекихачев Юрий Ахметханович – доктор технических наук, профессор кафедры теоретической механики и физики, ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, г. Нальчик

Тел. 8-928-077-33-77

E-mail: shek-fmep@mail.ru

Батыров Владимир Исметлович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии обслуживания и ремонта машин в АПК, ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, г. Нальчик

Болотоков Анзор Леонидович – старший преподаватель кафедры технологии обслуживания и ремонта машин в АПК, ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, г. Нальчик

Шекихачева Людмила Зачиевна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры землеустройства и экспертизы недвижимости, ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, г. Нальчик

Shekikhachev Yuri Akhmetkhanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Theoretical Mechanics and Physics, FSBEI HE Kabardino-Balkarian SAU, Nalchik

Batyrov Vladimir Ismetlovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technology for Maintenance and Repair of Machines in the AIC, FSBEI HE Kabardino-Balkarian SAU, Nalchik

Bolotokov Anzor Leonidovich – Senior Lecturer, Department of Technology for Maintenance and Repair of Machines in the AIC, FSBEI HE Kabardino-Balkarian SAU, Nalchik

Shekikhacheva Lyudmila Zachievna – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Land Management and Real Estate Expertise, FSBEI HE Kabardino-Balkarian SAU, Nalchik

Введение. При изучении свойств смеси, зависящих только от концентрации ее компонентов, факторное пространство представляет собой правильный симплекс [1]. В этом случае для любой точки области исследований должно выполняться условие нормировки:

$$\sum_{i=1}^q x_i = 1; x_i \geq 0; i = 1, 2, \dots, q, \quad (1)$$

где x_i – концентрация компонентов; q – их число.

При планировании эксперимента для решения задач на диаграммах состав-свойство предполагается, что изучаемое свойство является непрерывной функцией аргументов и может быть с достаточной точностью представлено полиномом.

Поверхности отклика в многокомпонентных системах имеют, как правило, очень сложный характер. Для адекватного описания таких поверхностей необходимы полиномы высоких степеней и, следовательно, большое количество опытов. Обычный полином степени n от q переменных имеет C_{q+n}^n коэффициентов:

$$Y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq q} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq q} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i < j < k \leq q} b_{ijk} x_i x_j x_k + \dots + \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_n \leq q} b_{i_1 i_2 \dots i_n} x_{i_1}^2 x_{i_2}^2 \dots x_{i_n}^2, \quad (2)$$

где $b_0, b_{ij}, b_{ijk}, b_{i_1 i_2 \dots i_n}$ – коэффициенты полинома; x_i, x_j, x_k – воздействующие факторы.

Шеффе предложил описывать свойства смесей приведенными полиномами, получаемыми из выражения (2) с учетом условия нормированности суммы независимых переменных и содержащих значительно меньшее число коэффициентов, а, следовательно, минимальное количество экспериментальных точек.

Коэффициенты полиномов получают, используя свойство насыщенности плана: число экспериментальных точек в нем равно числу оцениваемых параметров в уравнении регрессии. В общем случае полином второй степени для трехкомпонентной смеси, имеющий вид:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2. \quad (3)$$

в приведенной форме с учетом условия $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ запишется следующим образом:

$$Y = \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3, \quad (4)$$

где $\beta_1 = y_1$, $\beta_2 = y_2$, $\beta_3 = y_3$, $\beta_{12} = 4y_{12} - 2y_1 - 2y_2$, $\beta_{13} = 4y_{13} - 2y_1 - 2y_3$,
 $\beta_{23} = 4y_{23} - 2y_2 - 2y_3$.

Приведенный полином неполного третьего порядка для трехкомпонентной смеси имеет вид:

$$Y = \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{123}x_1x_2x_3, \quad (5)$$

где $\beta_{123} = 127y_{123} - 12(y_{12} + y_{13} + y_{23}) + 3(y_1 + y_2 + y_3)$.

После определения коэффициентов уравнения регрессии необходимо провести статистический анализ полученных результатов: проверить адекватность уравнения и построить доверительные интервалы значений отклика, предсказываемые по уравнению регрессии.

При одинаковом числе параллельных опытов на каждом сочетании уровней фактора воспроизводимость процесса проверяется по критерию Кохрена:

$$G = \frac{S_{u_{\max}}^2}{\sum_{u=1}^n S_{u_{\max}}^2} \leq G_{0,05;f_n;f_u}. \quad (6)$$

где $S_u^2 = \frac{\sum_{p=1}^m (Y_{up} - Y_u)^2}{m-1}$ – дисперсия, характеризующая рассеяние результатов опытов на сочетании u уровней факторов; $P = 1, 2, \dots, m$ – число параллельных опытов; $S_{u_{\max}}^2$ – наибольшая из дисперсий в строках плана; $G_{0,5;f_n;f_u}$ – табличное значение критерия Кохрена при 5%-ном уровне значимости; $f_n = n$ – число независимых оценок дисперсии воспроизводимости процесса; $f_m = m - 1$ – число степеней свободы каждой оценки.

Процесс считается воспроизводимым, если неравенство (6) выполняется. При этом дисперсия воспроизводимости определяется по формуле:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^n S_u^2}{n}. \quad (7)$$

Проверку адекватности уравнения регрессии проводят в каждой контрольной точке. Для этого составляют отношение:

$$t = \frac{\Delta Y \sqrt{n}}{S_y \sqrt{1 + \xi}}, \quad (7)$$

где $\Delta Y = |Y_{\text{экс}} - Y_{\text{расч}}|$; n – число параллельных опытов в каждой проверочной точке; $S_y = \sqrt{S_y^2}$ – среднее квадратическое отклонение; ξ – величина, зависящая только от состава смеси.

Величину t , распределенную по закону Стьюдента, сравнивают с табличным значением $t_{p/2k(f)}$, где f – число степеней свободы дисперсии воспроизводимости; p – уровень значимости; k – число проверочных точек.

Гипотеза об адекватности уравнения регрессии принимается, если $t_{\text{экс.}} \prec t_{\text{табл.}}$ для всех контрольных точек.

Методы проведения исследований. На кафедре «Технология обслуживания и ремонта машин в АПК» ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский

ГАУ проведены исследования влияния подачи этанола и воды по впускному трубопроводу, а рапсового масла – в камеру сгорания на мощностные и экологические показатели дизеля Д-240 с планированием эксперимента по симплекс-решетчатому плану Шеффе [2-6].

Штатная топливная система дизеля дооборудовалась топливопроводами увеличенного диаметра, пятиструйными распылителями, двумя подогревателями топлива, двумя переключателями, позволяющими автоматически, в зависимости от температуры биотоплива, производить перепуск топлива по той или иной схеме.

Результаты исследования и их обсуждение. Матрица плана Шеффе и условия проведения опытов для получения математической модели неполной третьей степени представлены в таблице 1, результаты опытов и значения дисперсий S_u^2 в экспериментальных точках – в таблице 2. В каждой точке плана Шеффе было реализовано по два параллельных опыта, среднее значение которых приведено в таблице 2.

Для дизеля Д-240 при подаче этилового спирта и воды на впуске, а рапсового масла – в камеру сгорания определены коэффициенты полиномов и получены следующие уравнения:

$$N_e = 54,99x_1 + 28,43x_2 + 38,9x_3 - 7,18x_1x_2 + 65,94x_2x_3 - 11,64x_1x_2x_3; \quad (8)$$

$$NO_x = 2,715x_1 + 1,974x_2 + 1,778x_3 - 4,098x_1x_2 - 2,73x_1x_3 + 0,548x_2x_3 + 2,19x_1x_2x_3; \quad (9)$$

$$CH_x = 0,1444x_1 + 0,0223x_2 + 0,0322x_3 - 0,2834x_1x_2 - 0,2088x_1x_3 + 0,0250x_2x_3 + 0,8292x_1x_2x_3; \quad (10)$$

$$CO = 1,6954x_1 + 0,0852x_2 + 0,5113x_3 - 2,6196x_1x_2 - 2,485x_1x_3 + 0,5022x_2x_3 + 6,0159x_1x_2x_3; \quad (11)$$

$$C = 0,29x_1 + 0,1256x_2 + 0,108x_3 - 0,448x_1x_2 - 0,0148x_1x_3 + 0,3652x_2x_3 + 0,2487x_1x_2x_3. \quad (12)$$

Таблица 1 – Матрица плана Шеффе и условия опытов для получения математической модели неполной третьей степени

Номер опыта	Индекс отклика	Матрица планирования			Состав смеси %		
		x_1	x_2	x_3	PM	В	ЭС
1	y_1	1	0	0	100	0	0

2	y_2	0	1	0	50	50	0
3	y_3	0	0	1	50	20	30
4	y_{12}	1/2	1/2	0	75	25	0
5	y_{13}	1/2	0	1/2	75	10	15
6	y_{23}	0	1/2	1/2	50	35	15
7	y_{123}	1/3	1/3	1/3	66,67	23,33	10

Таблица 2 – Результаты опытов и значения дисперсий в экспериментальных точках

Номер опыта	Индекс отклика	Параметры оптимизации (в скобках даны значения S_u^2)				
		N_e , кВт	NO_x , мг/л	CH_x , мг/л	CO , мг/л	C , мг/л
1	y_1	54,99 (0,0121)	2,715 (0,0256)	0,1444 (0,000161)	1,6954 (0,0025)	0,2900 (0,000225)
2	y_2	28,43 (0,0121)	1,974 (0,0144)	0,0223 (0,000046)	0,0852 (0,00057)	0,1256 (0,00151)
3	y_3	38,90 (0,0324)	1,778 (0,0484)	0,0322 (0,00176)	0,5113 (0,00176)	0,1080 (0,00160)
4	y_{12}	33,27 (0,0324)	1,320 (0,0841)	0,0125 (0,000025)	0,2354 (0,00193)	0,0958 (0,000566)
5	y_{13}	45,15 (0,0361)	1,564 (0,0074)	0,0361 (0,000038)	0,4821 (0,00302)	0,1953 (0,000581)
6	y_{23}	50,15 (0,0400)	2,013 (0,01416)	0,0335 (0,000061)	0,4238 (0,00230)	0,2081 (0,00073)
7	y_{123}	43,32 (0,0031)	1,539 (0,0164)	0,0341 (0,000020)	0,4754 (0,00291)	0,1729 (0,00040)

Результаты статического анализа и проверки адекватности полученных уравнений приведены в таблице 3. Проверка показала, что процесс воспроизводим, а полученные уравнения неполного третьего порядка адекватны.

Таблица 3 – Результаты статического анализа уравнений регрессии

Параметры	G_p	G_T	S_y^2	$Y_{\text{эксп}}$	Y_p	ΔY	ξ	t_p	t_T
N_e	0,2422	0,5612	0,02358	43,32	43,11	0,210	0,53	1,564	2,365
NO_x	0,3997	0,5612	0,0306	1,539	1,327	0,212	0,53	1,398	2,365
CH_x	0,4248	0,5612	0,000054	0,0341	0,0451	0,011	0,53	1,711	2,365
CO	0,2014	0,5612	0,00214	0,4754	0,4721	0,0033	0,53	1,000	2,365

C	0,2851	0,5612	0,00080	0,1729	0,1587	0,0142	0,53	0,574	2,365
---	--------	--------	---------	--------	--------	--------	------	-------	-------

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о сложности протекающих в цилиндрах дизеля процессах при изменении соотношений совместно подаваемых на впуске этанола и воды, а также рапсового масла. Так, при изменении подачи этанола и воды на впуске и РМ в камеру сгорания в кодовых переменных от 0 до 1 мощность дизеля меняется от 31 до 55 кВт. При этом можно отметить существенные отличия в составах смесей при получении одного и того же диапазона мощности.

Анализ влияния подачи этанола и воды на впуске и РМ в камеру сгорания на содержание окислов азота (NO_x) в отработавших газах (ОГ) дизеля показал, что изменение соотношения подаваемых смесей меняет содержание NO_x в ОГ дизеля в пределах от 1,32 до 1,95 мг/л.

При подаче этанола и воды на впуске, а РМ – в камеру сгорания, концентрация сажи в ОГ дизеля изменяется в пределах от 0,09 до 0,36 мг/л.

При подаче этанола и воды на впуске и РМ – в камеру сгорания содержание в ОГ углеводородов CH_x изменяется от 0,01 до 0,1 мг/л.

Анализ показывает, что повышение допустимой концентрации NO_x всего на 0,07 мг/л значительно увеличивает область получения мощности выше 45 кВт. Второй по степени жесткости наложения ограничений на получение больших мощностей, а, следовательно, и составу смесей следует сажа. Область мощностей выше 45 кВт резко увеличивается при возрастании допустимой дымности ОГ с 0,21 до 0,27 мг/л.

Меньшие ограничения на мощность дизеля накладывают требования по ограничению CO и CH_x в ОГ.

Область применения результатов. Результаты исследования могут быть использованы сельскохозяйственными и ремонтно-обслуживающими предприятиями.

Выводы. Планирование эксперимента с помощью симплекс-решетчатых планов Шеффе позволяет качественно решить задачу установления влияния

подачи этанола, воды и РМ на мощность и содержание в ОГ дизеля основных токсичных компонентов, и выбора наиболее приемлемых составов смесей.

Полученные результаты позволяют прогнозировать содержание токсичных компонентов в ОГ и мощность дизеля в зависимости от состава композиционного биотоплива.

Литература

1. Койчев В.С., Грицай Д.И., Кобозев А.К., Батыров В.И. Перспективные биотопливные смеси в дизельных двигателях // Научная мысль. 2016. № 5. С. 191-196.

2. Kyul E.V., Apazhev A.K., Kudzaev A.B., Borisova N.A. Influence of anthropogenic activity on transformation of landscapes by natural hazards // Indian Journal of Ecology. 2017. Т. 44. № 2. С. 239-243.

3. Батыров В.И. Перспективы перевода автомобильного транспорта на газомоторное топливо / В сборнике: Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК Сборник научных статей XII Международной научно-практической конференции, в рамках XVIII Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал – 2016». 2016. С. 255-259.

4. Шекихачев Ю.А., Батыров В.И., Карданов К.Х. Основные пути повышения стабильности параметров топливоподачи тракторных дизелей // АгроЭкоИнфо. 2018. № 2 (32). С. 55.

5. Батыров В.И., Койчев В.С., Болотоков А.Л. Мощностные и экологические показатели дизеля, работающего на смесевых и композиционных биотопливах // В сборнике: Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК Сборник научных статей XII Международной научно-практической конференции, в рамках XVIII Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал – 2016». 2016. С. 260-267.

6. Батыров В.И., Кадзиков Р.Б. Топливная система дизеля 4С11/12,5 при работе на рапсовом масле // В сборнике: Инновации в агропромышленном комплексе. Материалы VI Межвузовской научно-практической конференции сотрудников и обучающихся аграрных вузов Северо-Кавказского Федерального Округа, посвященной 100-летию со дня рождения профессора З.Х. Шауцукова. 2017. С. 35-36.

References

1. Kojchev V.S., Gricaj D.I., Kobozev A.K., Batoryov V.I. Perspektivnyye biotoplivnyye smesi v dizel'nyh dvigatelyah // Nauchnaya mysl'. 2016. № 5. S. 191-196.

2. Kyul E.V., Apazhev A.K., Kudzaev A.B., Borisova N.A. Influence of anthropogenic activity on transformation of landscapes by natural hazards // Indian Journal of Ecology. 2017. Т. 44. № 2. S. 239-243.

3. Batyrov V.I. Perspektivy perevoda avtomobil'nogo transporta na gazomotornoe toplivo / V sbornike: Aktual'nye problemy nauchno-tekhnicheskogo progressa v APK. Sbornik nauchnyh statej XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, v ramkah XVIII Mezhdunarodnoj agropromyshlennoj vystavki «Agrouniversal – 2016». 2016. S. 255-259.

4. SHekihachev YU.A., Batyrov V.I., Kardanov K.H. Osnovnye puti povysheniya stabil'nosti parametrov toplivopodachi traktornyh dizelej // AgroEkoInfo. 2018. № 2 (32). S. 55.

5. Batyrov V.I., Kojchev V.S., Bolotkov A.L. Moshchnostnye i ekologicheskie pokazateli dizelya, rabotayushchego na smesevykh i kompozicionnykh biotoplivah // V sbornike: Aktual'nye problemy nauchno-tekhnicheskogo progressa v APK. Sbornik nauchnyh statej XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, v ramkah XVIII Mezhdunarodnoj agropromyshlennoj vystavki «Agrouniversal – 2016». 2016. S. 260-267.

6. Batyrov V.I., Kadzokov R.B. Toplivnaya sistema dizelya 4CH11/12,5 pri rabote na rapsovom masle // V sbornike: Innovacii v agropromyshlennom komplekse. Materialy VI Mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoj konferencii cotrudnikov i obuchayushchihsya agrarnyh vuzov Severo-Kavkazskogo Federal'nogo Okruga, posvyashchennoj 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora Z.H. SHaucukova. 2017. S. 35-36.