

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
SERIES OF AGRICULTURAL SCIENCES

ISSN 2224-526X

Volume 6, Number 42 (2017), 243 – 249

V. E. Tarasenko¹, A. A. Zheshko¹, S. Zh. Oralbayev²

¹Educational Institution «Belarusian State Agrarian Technical University», Minsk, Belarus,
e-mail:

²Non-commercial Joint-stock Company «Kazakh National Agrarian University», Almaty, Kazakhstan.
E-mail: ztrs9@yandex.ru, 60sarsen@mail.ru

CONSTRUCTION OF THE REGRESSION MODEL OF THE DIESEL ENGINE PERFORMANCE FOR DEUTZ BF06M1013FC

Abstract. The article represents the sequence for the construction of universal multivariate characteristics aiming to the more complete efficiency evaluation of the diesel engine Deutz BF06M1013FC of the tractor «BELARUS-3022ДЦ» and the choice of its optimal operating modes. In addition, it was found that the specific effective fuel consumption curves can be properly described through the use of the regression model of the second degree as a function of the effective pressure and crankshaft speed of the diesel engine.

Key words: diesel engine, operating mode, fuel, consumption, characteristics.

УДК 621.437.629

В. Е. Тарасенко¹, А. А. Жешко¹, С. Ж. Оралбаев²

¹УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Беларусь,
²НАО «Казахский национальный аграрный университет», Алматы, Казахстан

ПОСТРОЕНИЕ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ ДИЗЕЛЯ DEUTZ BF06M1013FC

Аннотация. В статье с целью наиболее полной оценки экономичности дизеля Deutz BF06M1013FC трактора «БЕЛАРУС-3022ДЦ» и выбора оптимальных режимов его работы представлена последовательность построения универсальной многопараметровой характеристики. При этом установлено, что кривые удельного эффективного расхода топлива могут быть адекватно описаны с помощью регрессионной модели второй степени в функции эффективного давления и частоты вращения коленчатого вала дизеля.

Ключевые слова: дизель, режим, топливо, расход, характеристика.

Введение. На долю сельского хозяйства приходится около 50 % всей энергии, потребляемой в Республике Беларусь, и в этом количестве топливо составляет более 45 % [1]. Весьма важным является то, что сельское хозяйство основывается на использовании нефтяных видов топлива – это дизельное топливо и бензин. Выделим основные аспекты, которые определяют необходимость и неотвратимость экономии используемых, поиска новых альтернативных видов и источников энергии, прежде всего для автотракторных двигателей внутреннего сгорания (ДВС):

– сельское хозяйство полностью зависит от нефти, запасы которой не безграничны, и, следует полагать, что общее истощение нефтяных запасов ограничит возможность поставки ее из других стран и вызовет непредсказуемое увеличение цен. Для стран, не имеющих запасов нефти, наступит весьма сложное время. Конечно, это весьма отдаленная перспектива, но над решением этой проблемы следует работать уже сегодня;

– новейшие научные разработки и технологии, наукоемкие компоненты, на основе которых разрабатываются и создаются современные технологические процессы, машины неизменно будут применены в сельском хозяйстве. Следует полагать, что это приведет к радикальным изменениям в области использования энергии и ее экономии.

Первичной задачей при сжигании топлива является получение наибольшего количества тепловой энергии. Индикаторный КПД показывает, какая доля теплоты преобразуется в индикаторную работу. Экономичность индикаторного цикла характеризуется индикаторным удельным расходом топлива, равным отношению введенного в цилиндры топлива к индикаторной мощности. При этом отношение количества энергии сгорания топлива, превращенной в полезную работу, к полной индикаторной работе введенного в цилиндры двигателя топлива оценивает эффективный КПД, по значению которого определяется расчетное значение эффективного удельного расхода топлива.

Известно [2], что эффективный удельный расход топлива определяется значением эффективного КПД, зависит от индикаторных показателей работы двигателя и механических потерь, т.е. эффективный удельный расход топлива определяется рабочим процессом, принятой конструкцией составляющих компонентов и оценивает экономичность двигателя в целом. Так, увеличение индикаторного КПД на 1 % снижает расход топлива на 5,9 г/(кВт·ч) (или на 2,3 %), при увеличении механического КПД – на 3,4 г/(кВт·ч) (или 1,3 %), эффективного КПД – на 7,3 г/(кВт·ч) (или на 2,9 %), а повышение теплоты сгорания дизельного топлива на 1 % снижает расход топлива на 2,4 г/(кВт·ч) (или на 1,0 %).

Снижение удельного расхода топлива на протяжении длительного периода времени является одной из основных задач развития и модернизации автотракторных ДВС.

В настоящее время внедрение электронных систем управления подачей топлива позволило осуществлять гибкое изменение цикловой подачи, оптимальное регулирование угла опережения впрыска топлива, обеспечивать заданную внешнюю скоростную характеристику дизеля и др. [3, 4]. Однако проводимая высокотехнологичная модернизация топливных систем должна дополняться комплексом компьютерного моделирования как рабочих процессов ДВС, так и режимов их работы с целью обеспечения эффективного функционирования топливной системы в реальных условиях эксплуатации.

Целью настоящей работы явилось на основании серии нагрузочных характеристик дизеля Deutz BF06M1013FC трактора «БЕЛАРУС-3022ДЦ» построение универсальной многопараметровой характеристики данного двигателя, так как по ней можно наиболее полно оценить экономичность ДВС и выбрать оптимальные режимы его работы. Таким образом поставленная цель сводится к построению на плоскости зависимости интересующего параметра (в нашем случае – удельного эффективного расхода топлива, g_e , г/кВт·ч) двигателя одновременно от двух независимых переменных (среднего эффективного давления, p_e , бар и частоты вращения коленчатого вала, n , мин⁻¹).

Основная часть. График универсальной многопараметровой характеристики получается как результат проекции на плоскость XU (p_e , n) сечений поверхности отклика $g_e = f(p_e, n)$ при данных значениях g_e в трехмерном пространстве p_e , n , g_e .

На рисунке 1,а представлена универсальная многопараметровая характеристика ДВС с замкнутыми кривыми удельного эффективного расхода топлива (g_e , г/кВт·ч) как функция среднего эффективного давления (p_e , бар), крутящего момента (T_k , Н·м) и частоты вращения коленчатого вала (n , мин⁻¹).

Точка наименьшего удельного эффективного расхода топлива, обычно именуемая «плюс экономичности», представлена на рисунке 1,а как точка E_p . Эта точка, как правило, определяется при средних оборотах и загрузке в дизельных двигателях порядка 75 % от максимума [5].

Оптимальный режим работы двигателя с точки зрения потребления топлива соответствует точке E_p . Следовательно, при эксплуатации автотракторных ДВС следует придерживаться режимов, соответствующих окрестностям данной точки, т.е. области, очень близкой к ней, что обеспечит минимальное потребление топлива g_{emin} . Область, в которой $g_e < g_{emin}$, считается областью экономичной эксплуатации ДВС.

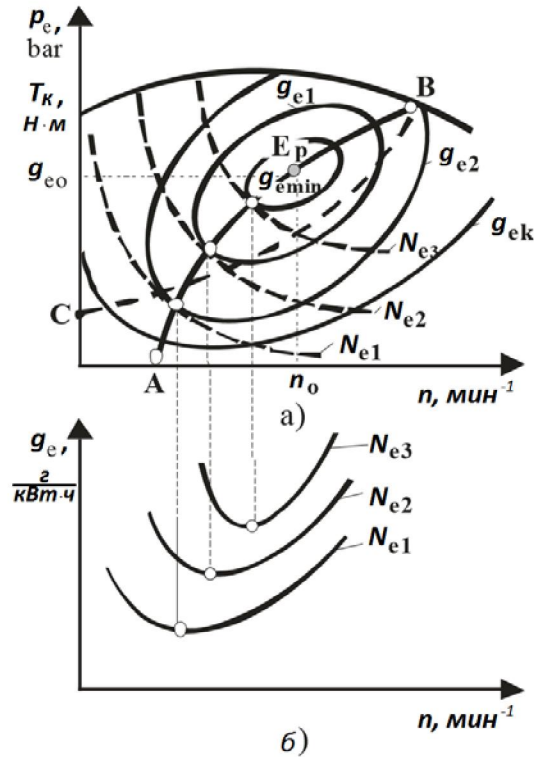


Рисунок 1 – Зависимость расхода топлива в ДВС от ряда параметров:

а) универсальная многопараметровая характеристика ДВС; б) кривые удельного эффективного расхода топлива

Однако, как известно, двигатель часто работает на частичной загрузке, т.е. на частичной характеристике. Каждому значению эффективной мощности N_{ei} , $i = 1, \dots, n$ соответствует отдельная кривая расхода топлива и каждая из них имеет свою точку минимального значения (рисунок 1, б).

Нанося точки минимального удельного расхода топлива на многопараметровую характеристику, можно получить кривую АВ, которая представляет характеристику минимального удельного расхода топлива или режим экономичного функционирования ДВС.

На базе испытательного центра «Трактор» ОАО «МТЗ» проведены испытания дизеля Deutz BF06M1013FC трактора «БЕЛАРУС-3022ДЦ». По результатам испытаний двигателя BF06M1013FC под нагрузкой через задний ВОМ трактора с использованием аттестованного стенда HORIBA DT2100 (№ 177229), позволяющего определять технико-экономические показатели ДВС и его тепловой режим, получены данные для построения серии нагрузочных характеристик. Методика испытаний соответствовала ГОСТ 30747-2001 (ИСО 789-1-90). Расход топлива (кг/ч) определялся с помощью расходомера AVL 733S.

Данные, полученные по результатам снятия серии нагрузочных характеристик, явились основой для построения универсальной многопараметровой характеристики дизеля Deutz BF06M1013FC. Методика построения изложена в источнике [6].

При обработке массива полученных экспериментальных данных выполнено построение точечной диаграммы с гладкими кривыми для формирования матрицы в функции $g_e = f(p_e)$. При этом, двигаясь по оси g_e с постоянным шагом 10 г/кВт·ч в диапазоне 450–230 г/кВт·ч, и уменьшая шаг до 2 г/кВт·ч в диапазоне малых удельных расходов 230–214 г/кВт·ч определялось, какое эффективное давление p_e соответствует данному расходу топлива при текущей частоте вращения. Например, для 2000 мин⁻¹, расходу 320 г/кВт·ч соответствует среднее давление 4,2 бар, а для 2400 мин⁻¹, при расходе 280 г/кВт·ч давление составляет 7,5 бар. Результаты определения точек по точечной диаграмме сведены в матрицу (таблица).

Применительно к первоначальному массиву данных, полученному по результатам снятия ряда нагрузочных характеристик дизеля на наиболее характерных для него частотах вращения, выполнено удаление дубликатов точек матрицы и осуществлена линейная аппроксимация с использо-

Матрица для построения многопараметровой характеристики

g_e , г/кВт·ч	p_e , бар																
	n_1 , мин ⁻¹	n_2 , мин ⁻¹	n_3 , мин ⁻¹	n_4 , мин ⁻¹	n_5 , мин ⁻¹	n_6 , мин ⁻¹	n_7 , мин ⁻¹	n_8 , мин ⁻¹	n_9 , мин ⁻¹	n_{10} , мин ⁻¹	n_{11} , мин ⁻¹	n_{12} , мин ⁻¹	n_{13} , мин ⁻¹	n_{14} , мин ⁻¹	n_{15} , мин ⁻¹	n_{16} , мин ⁻¹	n_{17} , мин ⁻¹
	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400
214											18,2						
216											16,8						
218											14,4						
220									16,5	17,5	12,8						
222								15,9	16,3	16,6	11,8						
224								15,3	14,8	14,8	11						
226								14,5	13,6	12,7	10,4						
228							14,4	13,6	12,7	11,6	9,9						
230	9,0	10	10,6	11,6	12	10,7	12,4	11,6	11,3	10,4	9,6	10,8	14,8	16,4	16,4	16,5	16,5
240	8,0	7,2	9,6	6,4	8,2	8,8	9,8	9,4	9,8	8,8	7,8	9,4	10,2	13,2	15,4	15,4	15,4
250	6,1	5,6	6,4	5,8	6,7	6,9	7,6	7,2	7,8	7,4	6,8	7,7	8,2	9	11,6	13,6	14,4
260	5,2	4,8	5,6	5,3	5,8	6	6,4	6,4	6,8	6,4	5,9	7	7,2	7,6	8,8	11	12,2
270	4,7	4,2	5	5	5,2	5,4	5,6	5,6	6	5,8	5,2	6,1	6	6,8	7,4	7,9	9,6
280	4,4	3,9	4,5	4,6	4,6	4,8	5,5	5,1	5,4	5,2	4,7	5,4	5,6	5,9	6,6	7,2	7,5
290	4,0	3,7	4	4,2	4,2	4,3	4,8	4,7	4,9	4,8	4,4	5,1	5,2	5,4	6	6,2	6,9
300	3,8	3,5	3,7	3,8	3,9	4	4,4	4,4	4,5	4,5	4	4,8	4,8	5	5,6	5,7	6,3
310	3,7	3,3	3,5	3,5	3,6	3,7	4	4,1	4,3	4,2	3,8	4,4	4,4	4,6	5	5,3	5,6
320	3,5	3,2	3,3	3,3	3,3	3,5	3,6	4	4	4	3,6	4	4,2	4,3	4,6	4,9	5,1
330	3,3	3	3,1	3,1	3,1	3,2	3,2	3,7	3,8	3,7	3,3	3,7	3,9	4	4,2	4,6	4,7
340	3,1	2,9	3	2,9	3	3,1	3	3,6	3,5	3,5	3,1	3,5	3,7	3,8	4	4,3	4,5
350	3,0	2,7	2,8	2,8	2,8	3	2,9	3,3	3,4	3,3	3	3,4	3,5	3,6	3,8	4	4,3
360	2,8	2,6	2,7	2,7	2,7	2,9	2,8	3,1	3,2	3,2	2,8	3,2	3,3	3,4	3,6	3,8	4,1
370	2,7	2,5	2,6	2,6	2,6	2,7	2,7	3	3,1	3	2,7	3,1	3,1	3,2	3,4	3,6	3,9
380	2,6	2,3	2,5	2,5	2,5	2,6	2,6	2,9	2,9	2,9	2,5	3	3	3,1	3,2	3,5	3,7
390	2,4	2,2	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,7	2,8	2,8	2,5	2,9	2,8	3	3	3,1	3,6
400	2,1	2,1	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,6	2,7	2,7	2,4	2,8	2,7	2,8	2,8	3,2	3,4
410	2,0	1,9	2,2	2,2													
420			2	2,1													
430			1,9	2													
440			1,8	1,9													
450			1,7	1,8													

ванием пакета прикладных программ MatLab. При этом загруженный в «матричную лабораторию» MatLab массив данных, привел к выводу предупреждения о том, что имеются дубликаты данных «Duplicate x-y data points detected: using average of the z values». Для очистки массива данных от выбросов использовали функцию

$$[junk,i] = \text{unique}(n + \text{sqrt}(-1) \cdot p_e); n = n(i); p_e = p_e(i); g_e = g_e(i).$$

Для аппроксимации данных, представленных в таблице 1, использовали модуль MatLab «Curve fitting tool», в котором указали переменные (n , p_e , g_e), тип модели (polynomial) и получили результат (рисунок 2).

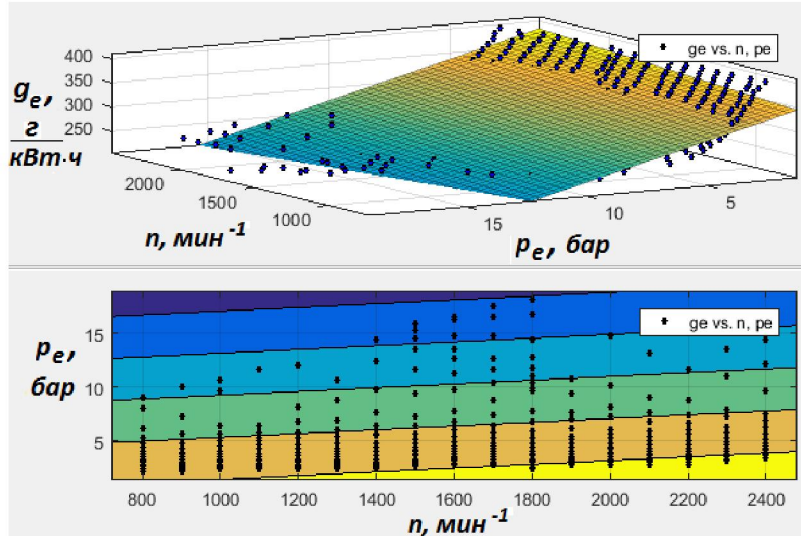


Рисунок 2 – Линейная аппроксимация данных матрицы в MatLab

Линейная аппроксимация позволила определить коэффициент детерминации, который для данной модели имеет довольно низкое значение $R^2 = 0,7005$. Результаты построения линейной множественной регрессии показали также, что полученная модель имеет слабую сходимость результатов.

Дальнейшая работа проводилась с использованием пакета анализа данных Excel. Для повышения точности результатов выполнены расчеты по построению модели в виде степенной функции расхода топлива от рассматриваемых факторов. Однако проведенные расчеты также показали низкое значение коэффициента детерминации, а именно $R^2 < 0,85$, неадекватность модели.

Исходя из анализа литературных источников [5, 7, 8], следует отметить, что статические характеристики двигателя внутреннего сгорания могут быть адекватно описаны с помощью полиномов соответствующей степени. В исследовании [5] регрессионная модель удельного расхода топлива представлена в виде полинома 3-ей степени в функции режимных параметров – эффективного давления p_e и числа оборотов n .

Дальнейшее построение математической модели проводилось среди полиномов соответствующей степени. Как показали расчеты, модель в виде полинома второй степени имеет высокие показатели адекватности.

Воспользовавшись встроенным в MS Excel пакетом анализа, получена следующая регрессионная модель:

$$g_e = 450,9772714 - 0,015532953n + 0,0000170545n^2 - 40,1645538p_e - 0,002058206np_e + 1,790825133p_e^2. \quad (1)$$

При этом коэффициент детерминации равен $R^2 = 0,909$, и так как $R^2 > 0,85$, можно сделать заключение о том, что модель адекватна. Достоверность уровня значимости по Фишеру (значимость $F = 6,57 \cdot 10^{-167}$) значительно меньше 0,05, на основании чего делаем вывод: модель статистически значима. Далее выполнен более подробный расчет и рассчитан критерий Фишера. При этом коэффициент множественной смешанной корреляции равен 0,954573.

Выполнено построение графиков полученной модели (рисунки 3, 4).

Графические построения свидетельствуют о том, что с позиции обеспечения минимальных значений удельного эффективного расхода топлива и максимальных значений среднего эффективного давления целесообразно эксплуатировать рассматриваемый дизель с оборотами коленчатого вала в пределах 1150–1900 мин⁻¹. Оптимальной же областью по оборотам коленчатого вала следует считать 1400–1750 мин⁻¹, когда достигается работа с расходом топлива ниже 220 г/кВт·ч и значением среднего эффективного давления выше 12 бар.

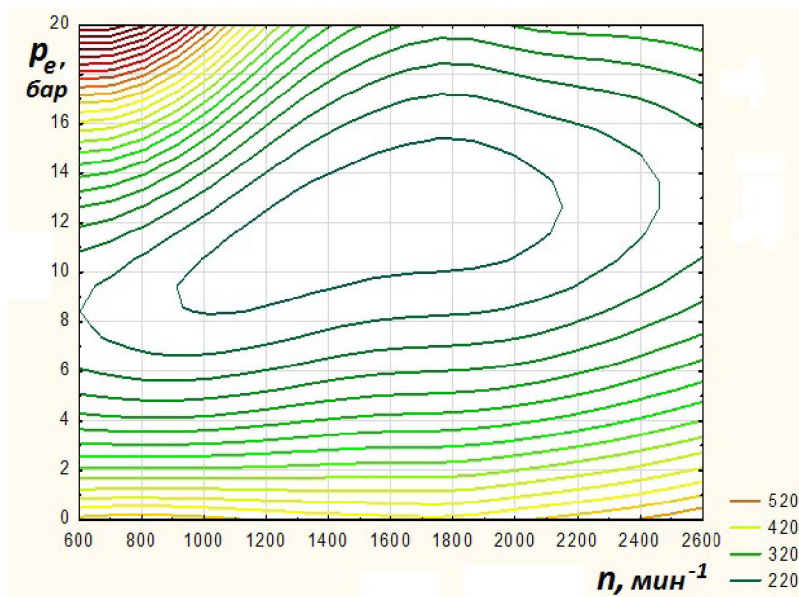


Рисунок 3 – Контурный график полинома второй степени

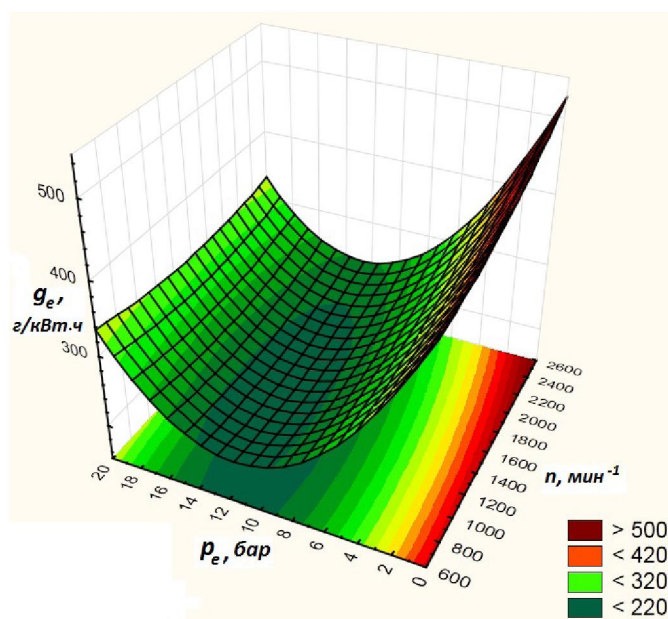


Рисунок 4 – Поверхность отклика полинома второй степени

Заключение. В результате проведенного исследования по определению оптимальных режимов работы двигателя Deutz BF06M1013FC установлено, что кривые удельного эффективного расхода топлива могут быть адекватно описаны с помощью регрессионной модели второй степени в функции эффективного давления и частоты вращения коленчатого вала ДВС, что представляет собой важный результат. Полученная модель второго порядка является существенным преимуществом, так как в ряде работ схожей направленности использованы уравнения третьей степени.

Используя полученные результаты и представленную регрессионную модель удельного эффективного расхода топлива, становится возможным посредством электронного блока управления, который вырабатывает управляющие сигналы, корректировать работу системы питания (дозирование подачи топлива) для перевода двигателя в наиболее экономичный режим. При этом проблема обоснования оптимальных режимов работы актуальна как для рассматриваемого двигателя, так и других автотракторных ДВС.

Особо следует отметить, что приведенная последовательность определения удельного эффективного расхода топлива при различных режимах работы автотракторных ДВС с помощью расширенных многопараметровых характеристик, позволяет добиться показателей работы ДВС, соответствующих минимальному удельному расходу топлива и выполнить согласование с автоматическими трансмиссиями, которые повсеместно внедряются в конструкции современных мобильных сельскохозяйственных машин.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Якубович А.И., зКухаренок Г.М., Тарасенко В.Е. Экономия топлива на тракторах. – Минск: БНТУ, 2009. – 229 с.
- [2] Якубович А.И., зТарасенко В.Е. Направления экономии топлива при эксплуатации трактора // Механика машин, механизмов и материалов. – 2008. – № 1(2). – С. 38-41.
- [3] Грехов Л.В., зИващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей. – М.: Легион-Автodata, 2004. – 344 с.
- [4] Шумовский В.А. Улучшение показателей транспортного дизеля путем совершенствования процессов распыливания топлива и смесеобразования: Дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02. – М., 2016. – 165 с.
- [5] Durković R., zDamjanović M. Regression models of specific fuel consumption curves and characteristics of economic operation of internal combustion engines // Mechanical Engineering. – 2006. – Vol. 4, N 1. – P. 17-26.
- [6] Кухаренок Г.М., Петрученко А.Н., Русецкий И.К. Теория рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания. Лабораторный практикум. – Минск: БНТУ, 2005. – 55 с.
- [7] Крутов В.И. Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект. – М.: Машиностроение, 1978. – 472 с.
- [8] Durković R., Damjanović M. Mathematical models of tractor driving system and traction efficiency // European Automotive Congress – EAEC 2005, Technical sessions powertrain, Beograd, 2005. P. 1-12.

REFERENCES

- [1] Yakubovich A.I., zKukharenok G.M., Tarasenko V.E. Fuel economy in tractors. Minsk: Belarusian National Technical University, 2009. P. 229.
- [2] Yakubovich A.I., zTarasenko V.E. Fuel economy concepts during use of tractors // Mechanics of engines, machinery and materials. 2008. N 1(2). P. 38-41.
- [3] Grekhov L.V., zIvaschenko N.A., Markov V.A. Fuel injection equipment and operating systems of diesel engines: College textbook. M.: Legion-Avtodata, 2004. P. 44.
- [4] Shumovsky V.A. Performance improvement of a transport diesel engine through the improvement of fuel pulverization and carburetion processes: Ph.D. thesis in Engineering Science: 05.04.02. M., 2016. P. 165.
- [5] Durković R., Damjanović M. Regression models of specific fuel consumption curves and characteristics of economic operation of internal combustion engines // Mechanical Engineering. 2006. Vol. 4, N 1. P. 17-26.
- [6] Kukharenok G.M., Petruchenko A.N., Rusetsky I.K. Theory of work processes of internal-combustion engines. Laboratory course. Minsk: Belarusian National Technical University, 2005. P. 55.
- [7] Krutov V.I. Internal-combustion engine as the controlled system. M.: Machine industry, 1978. P. 472.
- [8] Durković R., Damjanović M. Mathematical models of tractor driving system and traction efficiency // European Automotive Congress – EAEC 2005, Technical sessions powertrain, Beograd, 2005. P. 1-12.

В. Е. Тарасенко¹, А. А. Жешко¹, С. Ж. Оралбаев²

¹«Беларусь мемлекеттік аграрлық техникалық университеті» БМ-і, Минск, Беларусь,

²«Қазақ ұлттық аграрлық университеті» КЕАҚ-ы, Алматы, Қазақстан

DEUTZ BF06M1013FC ДИЗЕЛЬ ЖҰМЫСЫНЫҢ РЕГРЕССИОНДЫҚ МОДЕЛІН ТҰРҒЫЗУ

Аннотация. Мақалада «БЕЛАРУС-3022ДЦ» тракторының Deutz BF06M1013 FC дизелі үнемділігін анағұрлым толыққанды бағалау және оның жұмысының оптималды режимдерін таңдау мақсатында көп-параметрлі эмбебап сипаттамасын тұрғызу тізбектілігі берілген. Бұл жағдайда жанармайдың меншікті тиімді шығыны қысықтарының тиімді қысым мен дизель иінбілігінің айналу жиілігі функциясының екінші дәрежелі регрессиондық моделі көмегімен адекватты сипатталуы мүмкін екендігі айқындалған.

Түйін сөздер: дизель, режим, жанар май, шығын, сипаттама.