

УДК 621.437.629

В.Е. ТАРАСЕНКО, канд. техн. наук, доц.
заведующий кафедрой «Технологии и организация технического сервиса»¹
E-mail: trs9@yandex.ru

А.А. ЖЕШКО, канд. техн. наук, доц.
доцент кафедры¹
E-mail: azeshko@gmail.com

М.Д. БОБРИКОВ
инженер¹

¹Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 12.06.2017.

ПОСТРОЕНИЕ МНОГОПАРАМЕТРОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИЗЕЛЯ DEUTZ BF06M1013FC

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, основа которой сформирована данными ряда нагрузочных характеристик рассматриваемого дизеля по результатам испытаний на базе испытательного центра «Трактор» ОАО «МТЗ» с использованием аттестованного стенда HORIBA DT2100. На основании анализа путей достижения наибольшей топливной экономичности, а также работ отечественных и зарубежных ученых в этой области, отмечается, 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. Представлена полученная в ходе выполнения работы регрессионная модель удельного эффективного расхода топлива в виде полинома функции, аргументами которой являются параметры рабочего режима: среднее эффективное давление и частота вращения коленчатого вала дизеля.

Ключевые слова: дизель, режим, модель, топливо, расход, давление, 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 раз-

рабатываются 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, 10], что эффективный удельный расход топлива определяется значением эффективного КПД, зависит от индикаторных показате-

лей 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 %).

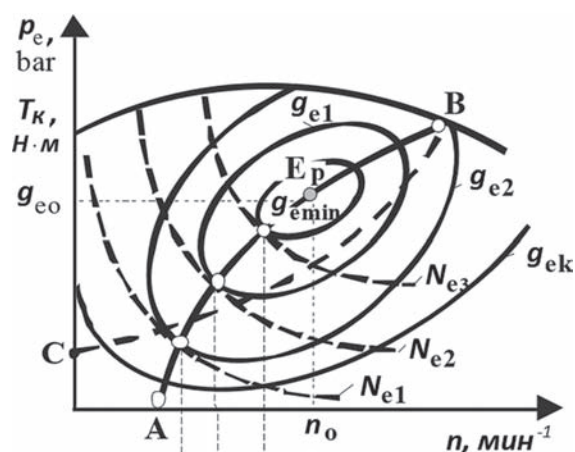
Снижение удельного расхода топлива на протяжении длительного периода времени является одной из основных задач развития и модернизации автотракторных ДВС. В настоящее время внедрение электронных систем управления подачей топлива позволило осуществлять гибкое изменение цикловой подачи, оптимальное регулирование угла опережения впрыска топлива, обеспечивать заданную внешнюю скоростную характеристику дизеля и др. [6, 7, 9]. 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 является на основании серии нагрузочных характеристик дизеля Deutz VF06M1013FC 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 графической интерпретации 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).

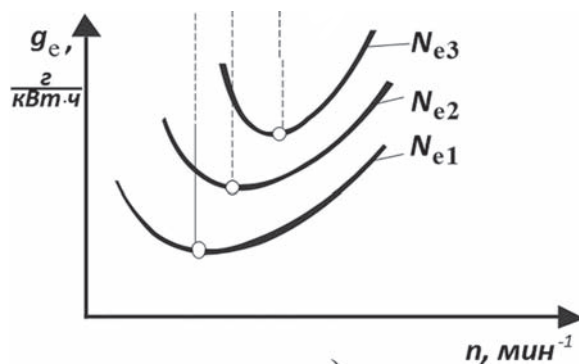
Основная часть. График универсальной многопараметровой характеристики получается как результат проекции на плоскость XU (p_e, n) сечений поверхности отклика $g_e = f(p_e, n)$ при данных значениях g_e в трехмерном пространстве p_e, n, g_e .

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 «полюс экономичности», представлена на рисунке 1 а как точка E_p . Эта точка, как правило, определяется



а



б

Рисунок 1 — Зависимость расхода топлива в ДВС от ряда параметров [3]: а — универсальная многопараметровая характеристика ДВС; б — кривые удельного эффективного расхода топлива

при средних оборотах и загрузке в дизельных двигателях порядка 75 % от максимума [3].

Оптимальный режим работы двигателя с точки зрения потребления топлива соответствует точке зрения 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.

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 (см. рисунок 1 б).

Нанося точки минимального удельного расхода топлива на многопараметровую характеристику, можно получить кривую AB , 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 [4].

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

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

$$n = n(i); p_e = p_e(i); g_e = g_e(i).$$

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

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 сходимос-ть результатов.

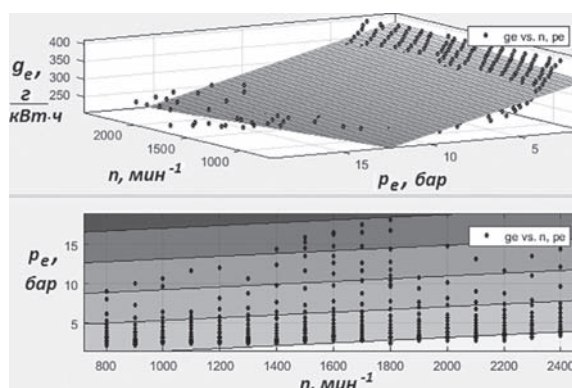


Рисунок 2 — Линейная аппроксимация данных матрицы в MatLab

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 [3, 5, 8, 11], следует отметить, что статические характеристики двигателя внутреннего сгорания могут быть адекватно описаны с помощью полиномов соответствующей степени. В исследовании [3] регрессионная модель удельного расхода топлива представлена в виде полинома 3-й 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:

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

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 и 4).

Графические построения свидетельствуют о том, что с позиции обеспечения минимальных значений удельного эффективного расхода топлива и максимальных значений среднего эффектив-

Таблица — Матрица для построения многопараметровой характеристики

| g_e , г/кВт·ч | p_e , бар | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | n_{1^*} | n_{2^*} | n_{3^*} | n_{4^*} | n_{5^*} | n_{6^*} | n_{7^*} | n_{8^*} | n_{9^*} | n_{10^*} | n_{11^*} | n_{12^*} | n_{13^*} | n_{14^*} | n_{15^*} | n_{16^*} | n_{17^*} |
| | мин ⁻¹ | мин ⁻¹ | мин ⁻¹ | мин ⁻¹ | мин ⁻¹ | мин ⁻¹ | мин ⁻¹ | мин ⁻¹ | мин ⁻¹ | мин ⁻¹ | мин ⁻¹ | мин ⁻¹ | мин ⁻¹ | мин ⁻¹ | мин ⁻¹ | мин ⁻¹ | 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 | | | | | | | | | | | | | |

ного 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.

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, т. к. 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

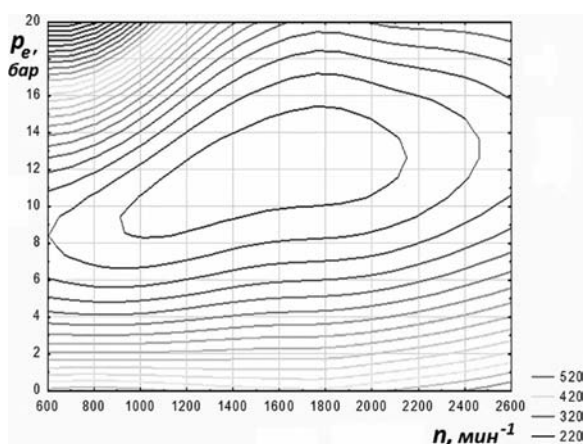


Рисунок 3 — Контурный график полинома второй степени

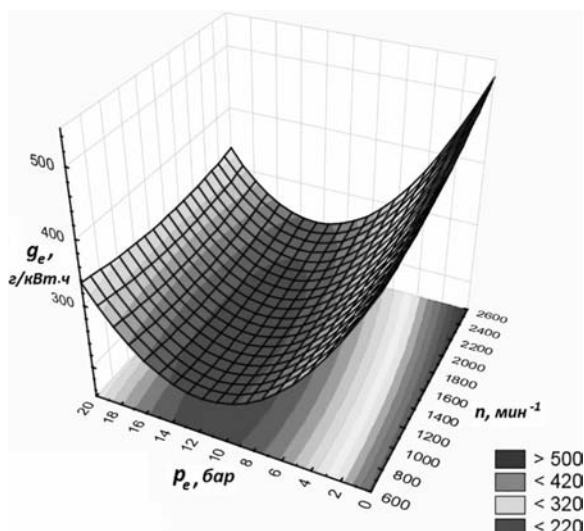


Рисунок 4 — Поверхность отклика полинома второй степени

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.

Список литературы

1. Якубович, А.И. Экономия топлива на тракторах / А.И. Якубович, Г.М. Кухаренок, В.Е. Тарасенко. — Минск: БНТУ, 2009. — 229 с.
2. Якубович, А.И. Направления экономии топлива при эксплуатации трактора / А.И. Якубович, В.Е. Тарасенко // Механика машин, механизмов и материалов. — 2008. — № 1(2). — С. 38–41.
3. Durkovi, R. Regression models of specific fuel consumption curves and characteristics of economic operation of internal combustion engines / R. Durkovi, M. Damjanovi // Mechanical Engineering. — 2006. — Vol. 4, № 1. — Pp. 17–26.
4. Кухаренок, Г.М. Теория рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания. Лабораторный практикум / Г.М. Кухаренок, А.Н. Петрученко, И.К. Русецкий. — Минск: БНТУ, 2005. — 55 с.
5. Крутов, В.И. Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект / В.И. Крутов. — М.: Машиностроение, 1978. — 472 с.
6. Грехов, Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учеб. для вузов / Л.В. Грехов, Н.А. Ивашенко, В.А. Марков. — М.: Легион-Автодата, 2004. — 344 с.
7. Шумовский, В.А. Улучшение показателей транспортного дизеля путем совершенствования процессов распыливания топлива и смесеобразования: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / В.А. Шумовский. — М., 2016. — 165 с.
8. Durkovi, R. Mathematical models of tractor driving system and traction efficiency / R. Durkovi, M. Damjanovi // European Automotive Congress – EAEC 2005, Technical sessions powertrain. — Beograd, 2005. — Pp. 1–12.
9. Тарасенко, В.Е. Анализ топливных систем дизелей с электронным управлением топливоподачей / В.Е. Тарасенко, А.А. Жешко // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». — Минск, 2016. — Вып. 50. — С. 52–57.
10. Двигатели внутреннего сгорания: теория рабочих процессов: учеб. для вузов: в 3-х кн. / В.Н. Луканин [и др.]; под ред. В.Н. Луканина и М.Г. Шатрова. — 3-е изд., испр. и перераб. — М.: Высш. шк., 2007. — Кн. 1. — 479 с.
11. Крутов, В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателями внутреннего сгорания / В.И. Крутов. — 5-е изд., доп. и перераб. — М.: Машиностроение, 1989. — 416 с.

TARASENKO V.E., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Department “Technologies and Technical Service Management”¹

E-mail: trs9@yandex.ru

ZHESHKO A.A., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Associate Professor¹

E-mail: azeshko@gmail.com

BOBRIKOV M.D.

Engineer¹

¹Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus

CONSTRUCTION OF THE MULTI-PARAMETER DIESEL DEUTZ BF06M1013FC DEFINITION

The sequence of creation of the engine universal characteristic for the purpose of an assessment of profitability of the diesel Deutz BF06M1013FC of tractor "BELARUS-3022DTS" and the choice of optimum power setting is stated in the paper. The data of load characteristics of the considered engine are obtained by results of tests in the test center "Traktor" of "MTZ" with use of the certified HORIBA DT2100 stand. Based on the analysis of ways of achievement of the greatest fuel profitability, and also publications of domestic and foreign scientists in this area, it is marked that curves of specific effective fuel consumption can be adequately described by means of regression model of the second level as effective pressure and rotating speed of a crankshaft of the diesel. The regression model of specific effective fuel consumption received in the course of work in the form of a polynomial of function which arguments are parameters of an operating mode is provided: mean effective pressure and rotating speed of a crankshaft of the diesel.

Keywords: diesel, mode, model, fuel, consumption, pressure, characteristic

References

1. Yakubovich A.I., Kuharenok G.M., Tarasenko V.E. *Ekonomiya topliva na traktorah* [Economy of fuel on tractors]. Minsk, BNTU, 2009. 229 p.
2. Yakubovich A.I., Tarasenko V.E. Napravleniya ehkonomii topliva pri ehkspluatatsii traktora [Fuel economy directions in the operation of a tractor]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2008, no. 1(2), pp. 38–41.
3. 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, no. 1, pp. 17–26.
4. Kuharenok G.M., Petruchenko A.N., Ruseckij I.K. *Teoriya rabochih processov dvigatelej vnutrennego sgoraniya. Laboratornyj praktikum* [Theory of work processes of internal combustion engines. Laboratory practical work]. Minsk, BNTU, 2005. 55 p.
5. Krutov V.I. *Dvigatel vnutrennego sgoraniya kak reguliruemyy obekt* [Internal combustion engine as an adjustable object]. Moscow, Mashinostroenie, 1978. 472 p.
6. Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Toplivnaya apparatura i sistemy upravleniya dizelej* [Fuel equipment and control systems for diesel engines]. Moscow, Legion-Avtodata, 2004. 344 p.
7. Shumovskij V.A. *Uluchshenie pokazatelej transportnogo dizelya putem sovershenstvovaniya processov raspylivaniya topliva i smeseobrazovaniya. Diss. kand. tekhn. nauk* [Improving the performance of the transport diesel by improving the processes of fuel atomization and mixture formation. D. Sc. Thesis]. Moscow, 2016. 165 p.
8. Durković R., Damjanović M. Mathematical models of tractor driving system and traction efficiency. *Proc. European Automotive Congress*. Belgrade, 2005, pp. 1–12.
9. Tarasenko V.E., Zheshko A.A. Analiz toplivnyh sistem dizelej s ehlektronnym upravleniem toplivopodachej [Analysis of diesel fuel systems with electronic fuel management]. *Trudy RUP "NPC NAN Belarusi po mekhanizatsii selskogo hozyajstva" "Mekhanizatsiya i ehlektifikatsiya selskogo hozyajstva"* [Proc. of SUE "SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization" "Mechanization and electrification of agriculture"]. Minsk, 2016, no. 50, pp. 52–57.
10. Lukanin V.N., Shatrov M.G. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: teoriya rabochih processov* [Internal combustion engines: the theory of work processes]. Moscow, Vysshaya shkola, 2007. 479 p.
11. Krutov V.I. *Avtomaticheskoe regulirovanie i upravlenie dvigatelej vnutrennego sgoraniya* [Automatic control and management of internal combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie, 1989. 416 p.