

В. Е. Тарасенко¹, А. А. Жешко²

¹УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

²РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

г. Минск, Республика Беларусь

email: trs9@yandex.ru;

azeshko@gmail.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

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. Получена 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.

V. E. Tarasenko¹, A. A. Zheshko²

¹Educational establishment «Belarusian state agrarian technical university»

²RUE «SPC NAS of Belarus for Agriculture Mechanization»

Minsk, Republic of Belarus

e-mail: trs9@yandex.ru;

azeshko@gmail.com

DETERMINATION OF ECONOMIC OPERATING MODES OF AUTOTRACTOR ENGINES

In article 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, 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.

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 – дизельного топлива и бензина. 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 надо 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 сложное время. Конечно, это весьма отдаленная перспектива, но над решением проблемы следует работать уже сегодня;

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

Известно [2, 3], что эффективный удельный расход топлива определяется значением эффективного КПД, зависит от индикаторных показателей работы двигателя и механических потерь, то есть эффективный удельный расход топлива определяется рабочим процессом, принятой конструкцией составляющих компонентов и позволяет оценить экономичность двигателя в целом. Так, при увеличении индикаторного КПД на 1 % расход топлива снижается на 5,9 $\text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ (или на 2,3 %), механического КПД – на 3,4 $\text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ (или 1,3 %), эффективного КПД – на 7,3 $\text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ (или на 2,9 %), а повышение теплоты сгорания дизельного топлива на 1 % снижает расход топлива на 2,4 $\text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ (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. [4, 5, 6]. Однако проводимая высокотехнологичная модернизация топливных систем должна дополняться комплексом компьютерного моделирования как рабочих процессов ДВС, так и режимов их работы для 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, так как по ней можно наиболее полно оценить экономичность ДВС и выбрать оптимальные режимы его работы. Поставленная цель сводится к построению графической интерпретации на плоскости зависимости интересующего параметра (в нашем случае – удельного эффективного расхода топлива, g_e , $\text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$) двигателя одновременно от двух независимых переменных (среднего эффективного давления, p_e , бар , и частоты вращения коленчатого вала, n , мин^{-1}).

Основная часть

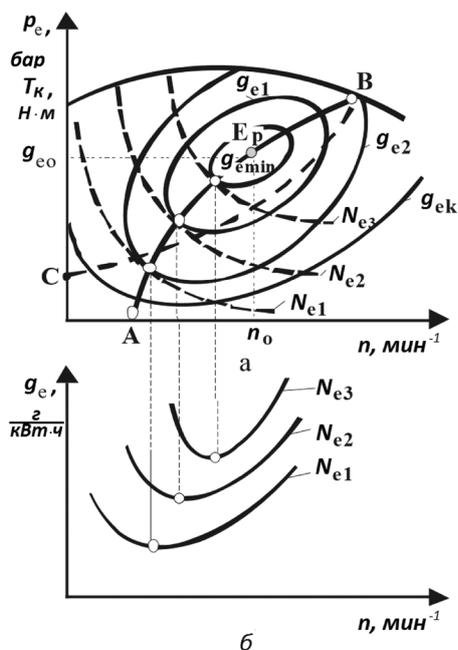
График универсальной многопараметровой характеристики получается как результат проекции на плоскость XU (p_e , n) сечений поверхности отклика $g_e = f(p_e, n)$ при данных значениях g_e в трехмерном пространстве p_e , n , g_e .

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

Точка наименьшего удельного эффективного расхода топлива, обычно именуемая «полюс экономичности», представлена на рисунке 1а как точка E_p . Эта точка, как правило, определяется при средних оборотах и загрузке в дизельных двигателях порядка 75 % от максимума [7].

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

Однако, как известно, двигатель часто работает на частичной загрузке, то есть на частичной характеристике. Каждому значению эффективной мощности N_{ei} , $i = 1, \dots, n$, соответствует отдель-



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

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

ная кривая расхода топлива, и каждая из них имеет свою точку минимального значения (рисунок 1б).

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.

Результаты исследований

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 [8].

При обработке массива полученных экспериментальных данных выполнено построение точечной диаграммы для формирования матрицы в функции $g_e = f(p_e)$ (рисунок 2). При этом при движении по оси g_e с постоянным шагом 10 г/кВт·ч в диапазоне 450...230 г/кВт·ч и уменьшении шага 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

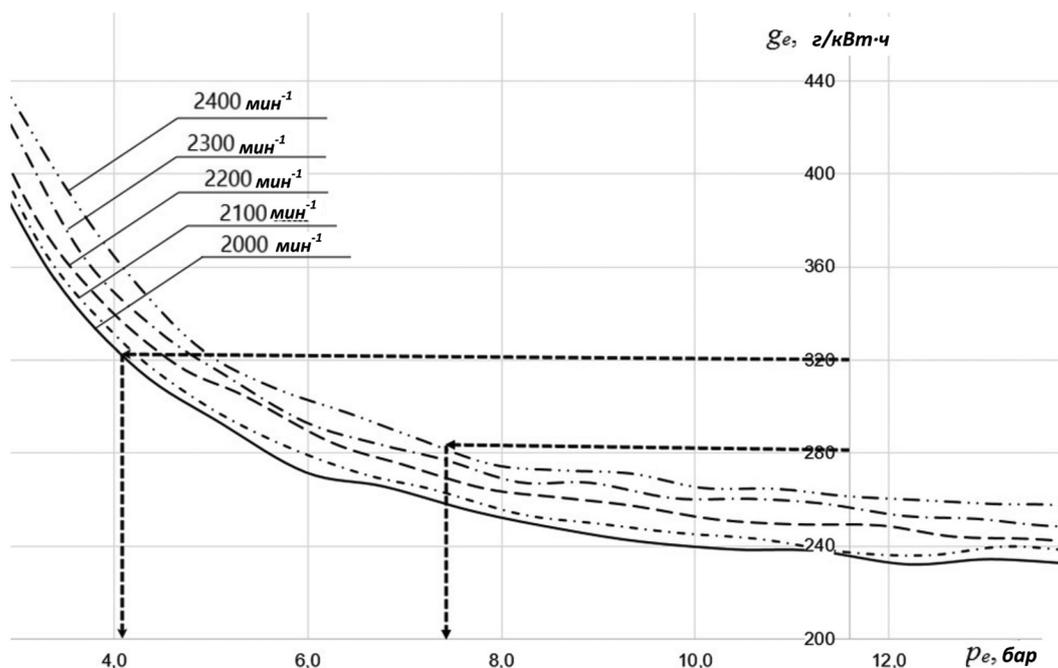


Рисунок 2. – Диаграмма для формирования матрицы в функции $g_e = f(p_e)$

ния. Например, для 2000 мин^{-1} расходу $320 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ соответствует среднее давление $4,2 \text{ бар}$, а для 2400 мин^{-1} при расходе $280 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ давление составляет $7,5 \text{ бар}$. Результаты определения точек по диаграмме (рисунок 2) сведены в матрицу.

Применительно к первоначальному массиву данных, полученному по результатам снятия ряда нагрузочных характеристик дизеля на наиболее характерных для него частотах вращения, осуществлена линейная аппроксимация с использованием пакета прикладных программ MatLab. Для аппроксимации представленных данных использовали модуль MatLab «Curve fitting tool», в котором указали переменные (n, p_e, g_e), тип модели (polynomial) и получили результат (рисунок 3).

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.

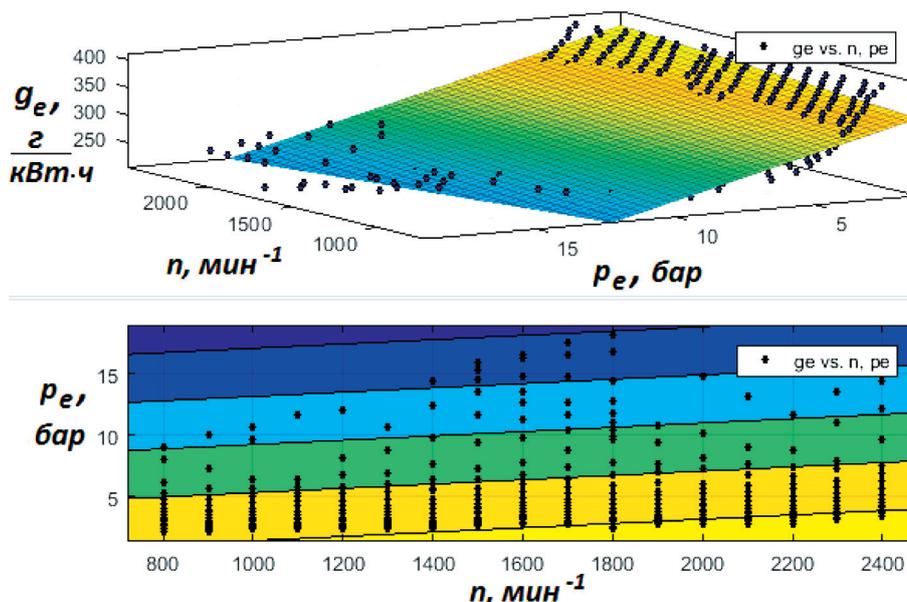


Рисунок 3. – Линейная аппроксимация данных матрицы в MatLab

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 [7, 9, 10, 11], следует отметить, что статические характеристики двигателя внутреннего сгорания могут быть адекватно описаны с помощью полиномов соответствующей степени. В исследовании [7] 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.

Использование встроенного в MS Excel пакета анализа позволило получить следующую регрессионную 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 $F = 6,57 \cdot 10^{-167}$) существенно меньше $0,05$, на основании чего делаем вывод: модель стати-

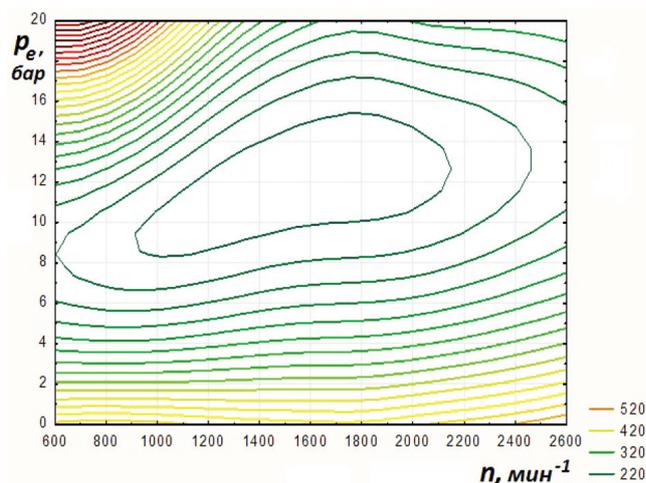


Рисунок 4. – Контурный график полинома второй степени

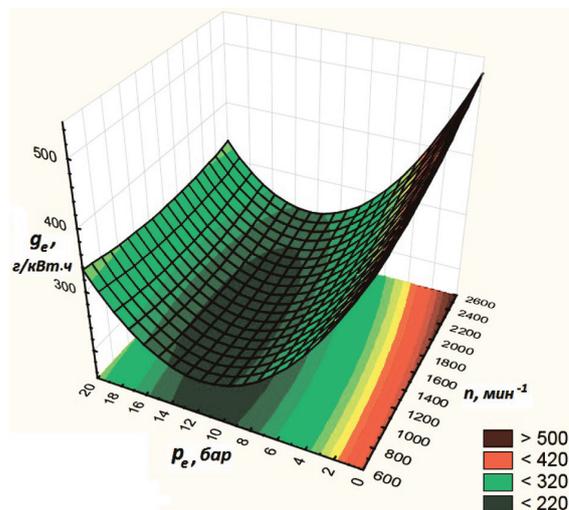


Рисунок 5. – Поверхность отклика полинома второй степени

стически значима. Далее выполнен более подробный расчет и рассчитан критерий Фишера. При этом коэффициент множественной смешанной корреляции равен 0,954573.

Построены графики полученной модели (рисунок 4 и 5).

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 $\text{г/кВт}\cdot\text{ч}$ и значением среднего эффективного давления выше 12 бар .

Заключение

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 двигателя Deutz BF06M1013FC, что позволяет определять оптимальные режимы работы. Приведенная модель второго порядка является существенным преимуществом, так как в ряде работ схожей направленности использованы уравнения третьей степени.

Полученные результаты в совокупности открывают дополнительные возможности посредством электронного блока управления, вырабатывающего управляющие сигналы, корректировать работу системы питания (дозирование подачи топлива) для перевода двигателя в наиболее экономичный режим.

Предложенная последовательность определения оптимальных режимов работы применима как для ДВС, устанавливаемых на тракторах и самоходных сельскохозяйственных машинах широкого диапазона мощности, так и для автомобильных. Также она 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. Экономия топлива на тракторах: монография / 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. Двигатели внутреннего сгорания: теория рабочих процессов: учеб. для вузов: в 3 кн. / В. Н. Луканин [и др.]; под ред. В. Н. Луканина и М. Г. Шатрова. – 3-е изд., перераб. и испр. – М.: Высшая школа, 2007. – Кн. 1. – 479 с.

4. Грехов, Л. В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учебник для вузов / Л. В. Грехов, Н. А. Иващенко, В. А. Марков. – М.: Легион-Автодата, 2004. – 344 с.
5. Шумовский, В. А. Улучшение показателей транспортного дизеля путем совершенствования процессов распыливания топлива и смесеобразования: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / В. А. Шумовский. – Москва, 2016. – 165 с.
6. 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.
7. Durković, R. Regression models of specific fuel consumption curves and characteristics of economic operation of internal combustion engines / R. Durković, M. Damjanović // Mechanical Engineering. – 2006. – Vol. 4, № 1. – Pp. 17–26.
8. 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.
9. Крутов, В. И. Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект / В. И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1978. – 472 с.
10. Durković, R. Mathematical models of tractor driving system and traction efficiency / R. Durković, M. Damjanović // European Automotive Congress – EAEC 2005, Technical sessions powertrain, Beograd, 2005. – Pp. 1–12.
11. Крутов, В. И. Автоматическое регулирование и управление двигателями внутреннего сгорания / В. И. Крутов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 416 с.

УДК 621.436.004.67

Поступила в редакцию 21.09.2017
Received 21.09.2017

В. Г. Андруш, Л. А. Хвоцинская

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: andrush.v.g@gmail.com; e-mail: ludmila.ark@gmail.com;*

РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ СЕЛЕКТИВНОМ УСТАНОВЛЕНИИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОБКАТКИ ДВИГАТЕЛЕЙ

В статье получены формула определения необходимой продолжительности обкатки в зависимости от средней скорости изменения мощности механических потерь, мощности механических потерь в начале обкатки и температуры масла, а также алгоритм селективного установления продолжительности режимов приработки, что позволяет сократить среднее время обкатки не менее чем на 15 % с экономией топливно-энергетических ресурсов по сравнению с рациональным режимом.

Ключевые слова: ремонт, дизель, обкатка стендовая, контроль, техническое состояние, мощность, механические потери, режим, приработка.

V. G. Andrush, L. A. Hvoschinskaya

*Educational establishment «Belarusian state agrarian technical university»
Minsk, Republic of Belarus
e-mail: andrush.v.g@gmail.com; e-mail: ludmila.ark@gmail.com;*

RESOURCE CONSERVATION BY THE SELECTIVE SETTING OF THE LENGTH OF THE RUNNING ENGINES

Was obtained formula for determining the necessary duration of running in depending the average speed of changing of mechanical losses power, the mechanical losses power at the beginning of running in, the oil temperature. The algorithm for selective establishing the duration of the regime of diesel engine alignment has been obtained. All this allows to decrease the average duration of the after repair stand running in not less than 15 % with fuel-energy resources saving in comparison with the rational mode.

Keywords: repair, diesel, stand running in, control, technical state, power, mechanical losses, regime, alignment.

Введение

В сельскохозяйственных организациях Республики Беларусь эксплуатируется около 80 тысяч дизельных двигателей, в том числе: на тракторах – 41 тыс., зерноуборочных комбайнах – 10 тыс., автомобилях – 20 тыс., кормоуборочных комбайнах и другой специальной технике – 9 тыс. [1].