

ВЫВОДЫ

1. Модернизация землеройных машин инженерного вооружения на основе использования базовых шасси отечественного производства обеспечивает повышение ремонтпригодности и эффективности боевого применения.

2. Модернизация систем приводов рабочего оборудования землеройных машин инженерного вооружения позволит уменьшить массу рабочего оборудования и снизить стоимость изготовления, упростит техническое обслуживание и ремонт землеройных машин инженерного вооружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Машины** инженерного вооружения. Ч. I: Общая характеристика. Машины для преодоления разрушений

и механизации земляных работ: учеб. для курсантов военных училищ инженерных войск / А. В. Ольшанский [и др.]; под ред. А. В. Ольшанского. – М.: Военное изд-во, 1986. – 422 с.

2. **Гидравлическая** система рабочего оборудования землеройной машины: пат. 5586 Респ. Беларусь, МПК (2006) F 16H 61/40, F 15B 11/00 / А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай, Н. Г. Шмуляев, Ю. В. Костко, С. В. Кондрачев, В. Ф. Тамело; заявитель Белорусский национальный технический университет. – № u 20090218; заявл. 2009.03.18; опубл. 2009.10.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 5.

3. **Коробкин, В. А.** Агрегаты дискретного действия гидроприводов строительных и дорожных машин / В. А. Коробкин, А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай // Строительные и дорожные машины. – 2010. – № 5. – С. 43–46.

4. **О перспективных** направлениях создания гидравлических агрегатов приводов строительных и дорожных машин / В. А. Коробкин [и др.] // Наука и техника. – 2012. – № 6. – С. 71–76.

Поступила 13.02.2013

УДК 629.114.2

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ РЕГРЕССИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ТЯГОВЫХ КРИВЫХ МЕТОДОМ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

Канд. техн. наук, доц. РАВИНО В. В., инж. КАЛИНИН Н. В.

Белорусский национальный технический университет

В результате тяговых испытаний колесных и гусеничных тракторов получен богатый экспериментальный материал [1, 2], который позволил установить взаимосвязь между коэффициентом использования сцепного веса $\varphi_{кр} = F_{кр}/G_{сц}$ ($G_{сц}$ – вес трактора, приходящийся на ведущие колеса; для полноприводных колесных и гусеничных тракторов весь вес G трактора используется в качестве сцепного, т. е. $G_{сц} = G$ для создания усилия на крюке $F_{кр}$) и буксованием δ движителя [3].

Экспериментальные зависимости $\varphi_{кр}(\delta)$ используются для определения оптимальных конструктивных параметров трактора и анализа их ходовых систем. Большое практическое значение имеют зависимости $\varphi_{кр}(\delta)$ для построения теоретической тяговой характеристики проектируемого трактора. Однако при выполнении расчетов удобнее пользоваться не массивами данных $\varphi_{кр}(\delta)$, а иметь аналитические выраже-

ния, позволяющие воспроизвести кривую $\varphi_{кр}(\delta)$ во всем диапазоне изменения буксования движителей.

Поскольку сцепной вес, приходящийся на ведущие мосты и колеса трактора, зависит от условий работы, в более общем виде целесообразнее исследовать зависимость буксования колеса не от абсолютного значения развиваемой им касательной силы тяги, а от отношения этой силы к сцепному весу, т. е. от реализуемого коэффициента сцепления φ .

Существует достаточно много формул, описывающих зависимости между φ и буксованием δ или, что то же самое, между F_k и δ . Наиболее распространенной из них является экспоненциальная зависимость [3]

$$\varphi = \varphi_{\max}(1 - e^{-k\delta}), \quad (1)$$

где φ_{\max} и k – постоянные эмпирические коэффициенты, зависящие от почвенного фона и типа применяемых шин.

Также часто используются зависимости, описываемые гиперболическим тангенсом [4, 5], и формула, предложенная Расејка (Magic Formula) [6]

$$\varphi = D \sin(C \arctg(B\delta - E(B\delta - \arctg(B\delta))), \quad (2)$$

где B , C , D , E – вспомогательные коэффициенты.

По мнению ряда авторов [3, 6], зависимость между коэффициентом сцепления φ и буксованием δ наилучшим образом аппроксимируется показательной функцией (1). Для определения коэффициентов, входящих в (1), можно использовать метод средних, если представить (1) в виде уравнения прямой в полулогарифмических координатах [7]. Но этот метод обладает невысокой точностью и применим только для сравнительных расчетов [3]. В [3] изложена методика определения коэффициентов уравнения (1), но она очень громоздкая и имеет узкое применение, ограничивающееся собственно только формулой (1).

Целью настоящей работы является разработка универсальной методики, позволяющей определять неизвестные коэффициенты в уравнениях (1), (2) и других на основании таблицы экспериментальных данных по методу наименьших квадратов. Для удобства сопоставления полученных результатов с существующими методика будет изложена для экспоненциальной зависимости (1).

В качестве исходных данных используются результаты эксперимента, приведенные в [1] для колесного трактора массой 3,4 т, почвенный фон – поле, подготовленное под посев. Поскольку в [1] данные представлены в виде графиков, для оцифровки кривых и составления таблицы полученных результатов воспользуемся программой GetData Graph Digitizer (getdata – graph – digitizer. com). Обработку экспериментальных данных будем проводить в среде Microsoft Excel [8].

Суть методики состоит в следующем. В столбцы А и В, начиная со второй строки, вносятся значения буксования и коэффициента сцепления, полученные в результате проведения эксперимента (рис. 1).

В ячейки Е2 и F2 вводятся произвольные начальные приближения коэффициентов φ_{\max}

и k . В данном случае принимаем их равными единице. Далее, начиная с ячейки С2, записываем аналитическую зависимость $\varphi(\delta)$, т. е. формулу (1). Для ячейки С2 выражение будет следующим:

$$=E\$2*(1-EXP((-1)*F\$2*A2))4.$$

Затем в ячейках, начиная с D2, необходимо вычислить остатки, т. е. разницу между расчетным и экспериментальными значениями коэффициента сцепления φ . Для ячейки D2 выражение будет следующим:

$$=B2-C2.$$

В соответствии с методом наименьших квадратов необходимо подобрать такие значения φ_{\max} и k , чтобы сумма квадратов всех остатков, записанных в столбце D, была минимальной. Поэтому в ячейке G2 следует написать формулу

$$=СУММКВ(D2:D24).$$

Для оценки полученных результатов рассчитаем ошибку по общеизвестной формуле, при этом в ячейку I2 записано количество проведенных замеров

$$=КОРЕНЬ(\$G\$2/(\$I\$2*(\$I\$2-1))).$$

В результате заполнения получилась таблица, представленная на рис. 1. Дополнительно для наглядности построен график зависимости $\varphi(\delta)$ со значениями φ_{\max} и k , равным начальным приближениям, а также на этом графике нанесены экспериментальные точки.

После заполнения всех полей необходимо вызвать надстройку «Поиск решения» и заполнить в соответствии с рис. 2. Для Excel 2010/2013 надстройка «Поиск решения» находится на вкладке «Данные» в группе «Анализ». Если ее там нет, то надстройку необходимо загрузить следующим образом:

- 1) на вкладке «Файл» выбрать команду «Параметры», а затем – категорию «Надстройки»;
- 2) в поле «Управление» выбрать значение «Надстройки Excel» и нажать кнопку «Перейти»;
- 3) в поле «Доступные надстройки» установить флажок рядом с пунктом «Поиск решения» и нажать кнопку «ОК».

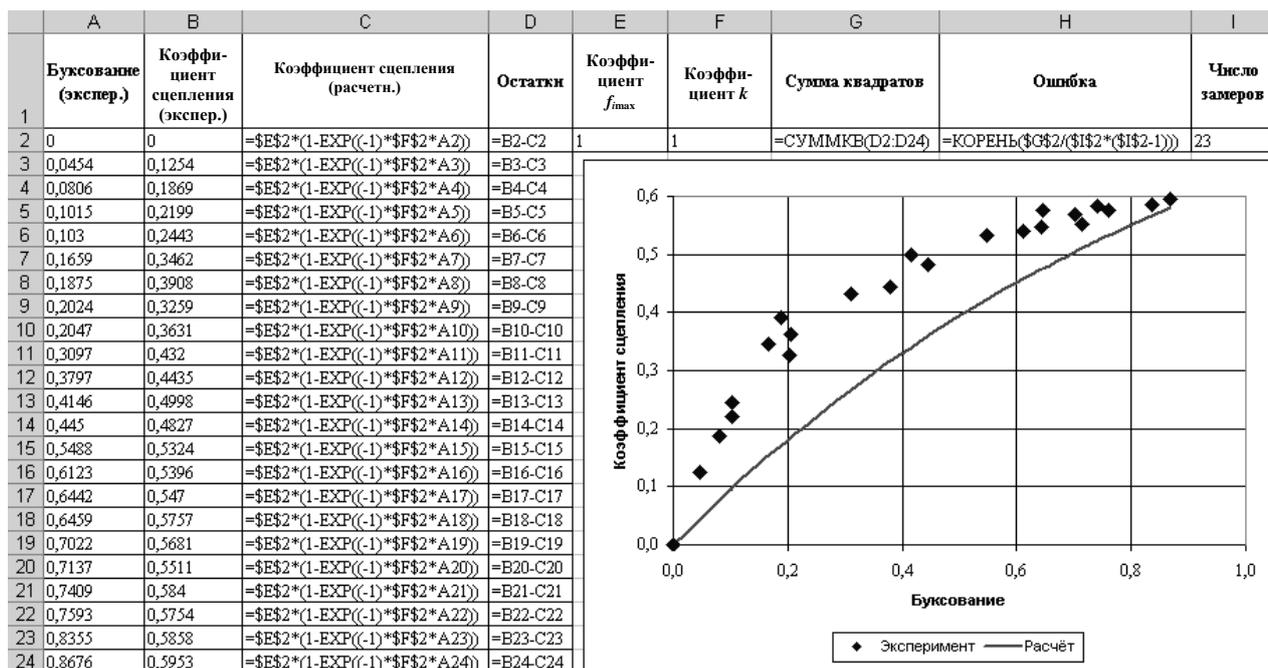


Рис. 1. Исходные данные для определения коэффициентов регрессии

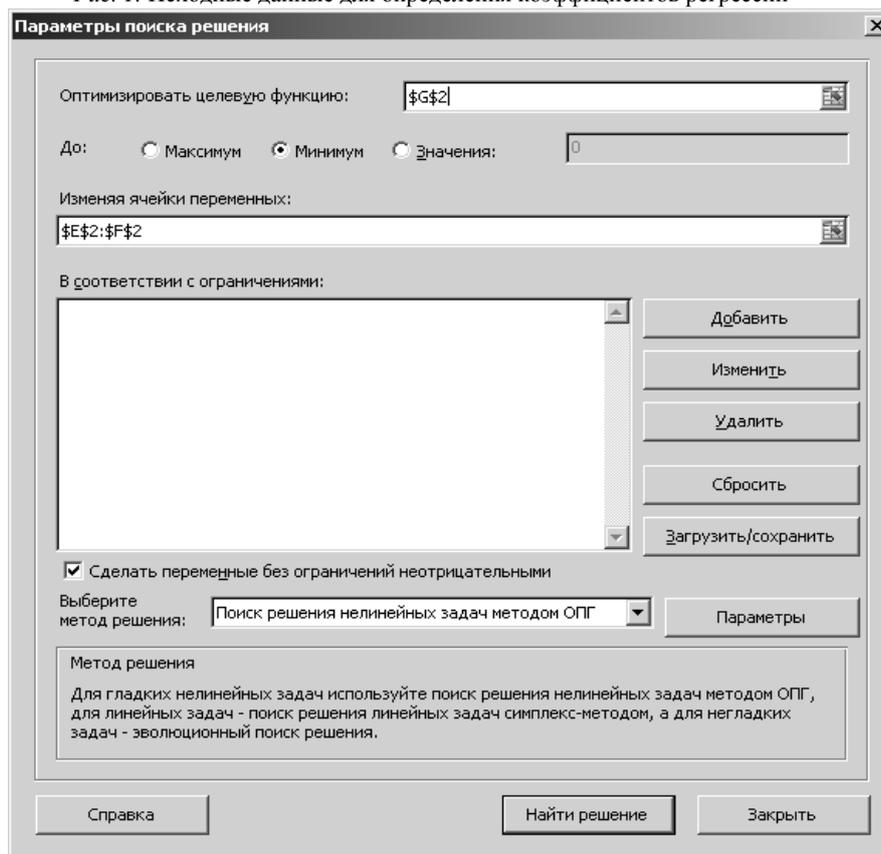


Рис. 2. Заполнение надстройки «Поиск решения» (на примере Excel 2010)

Целевой ячейкой будет G2, равная минимальному значению, а изменяться будут ячейки E2 и F2. После нажатия кнопки «Выпол-

нить» и подтверждения найденных результатов в ячейках E2 и F2 появятся искомые значения коэффициентов соответственно f_{max} и k

(рис. 3). Полученные таким образом результаты хорошо согласуются с приведенными в [3],

что говорит о правильности разработанной методики.

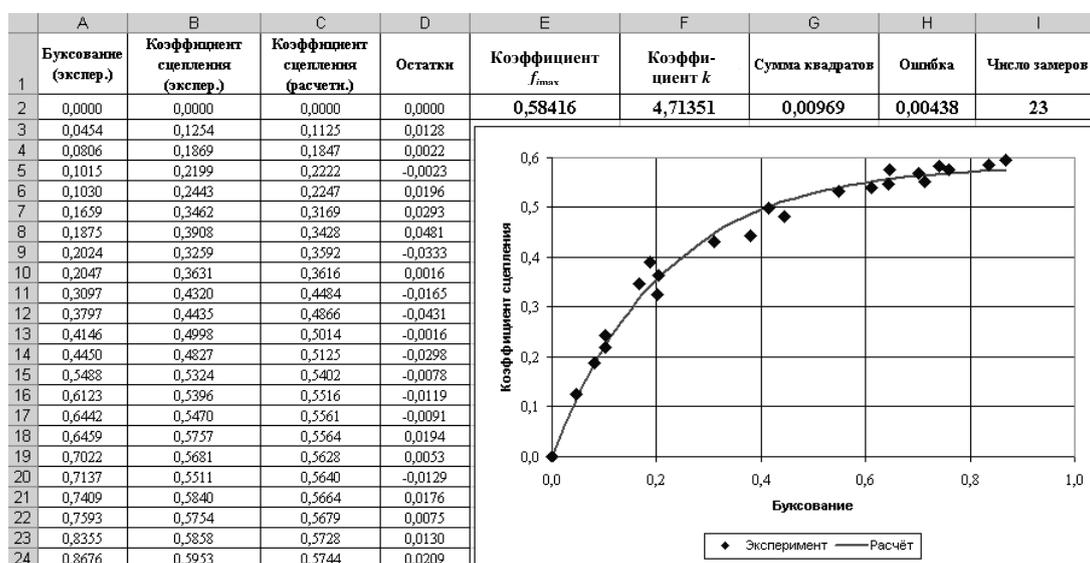


Рис. 3. Результаты расчета по определению коэффициентов регрессии

Рассуждая аналогично, можно найти коэффициенты в зависимости Расаејка или любой другой зависимости. То есть нет необходимости приводить таблицы со значениями коэффициентов различных кривых регрессий, так как их может быть огромное множество, а используя данную методику, можно при наличии экспериментальных данных легко получить коэффициенты для любых формул.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика для определения коэффициентов кривой буксования по результатам экспериментальных исследований методом наименьших квадратов с использованием MS Excel.

2. Отличительной особенностью данной методики является то, что от пользователя не требуется знание языков программирования или специализированных программ статистической обработки данных (например, Statistika), и при этом пользователь в состоянии определять коэффициенты регрессии для уравнений практически любой сложности.

3. Изложенный подход в использовании метода наименьших квадратов может быть легко использован для расчета коэффициентов ре-

грессии методом наименьших квадратов в любой другой области научных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колобов, Г. Г. Тяговые характеристики тракторов / Г. Г. Колобов, А. П. Парфенов. – М.: Машиностроение, 1972. – 153 с.
2. Тяговые характеристики сельскохозяйственных тракторов: альбом-справочник / А. П. Антонов [и др.]. – М.: Россельхозиздат, 1979. – 240 с.
3. Бойков, В. П. Методика аппроксимации кривых буксования показательными функциями / В. П. Бойков, Ю. Е. Атаманов, Ч. И. Жданович // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фізіка-тэхнічных навук. – 2000. – № 1. – С. 120–126.
4. Шумилин, А. В. Математическая модель криволинейного движения гусеничной машины по деформируемому основанию / А. В. Шумилин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1993. – № 5. – С. 8–11.
5. Тракторы: теория / В. В. Гуськов [и др.]; под общ. ред. В. В. Гуськова. – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с.
6. Расаејка, Hans В. Tyre Mechanics and Vehicle Dynamics / Hans В. Расаејка. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. – 621 p.
7. Львовский, Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул: учеб. пособие для вузов / Е. Н. Львовский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 239 с.
8. Лавренов, С. М. Excel: сб. примеров и задач / С. М. Лавренов. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 336 с.

Поступила 10.04.2013