

## Нагруженность траков в гусеничном обводе

**Лесковец Игорь Вадимович,**

канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой  
«Строительные, дорожные, подъемно-  
транспортные машины и оборудование»  
Белорусско-Российского университета

E-mail: le@bru.by

**Леоненко Олег Викторович,**

канд. техн. наук, начальник учебно-  
методического управления Белорусско-  
Российского университета

E-mail: leonenko@bru.by

**Бужинский Александр Дмитриевич,**

канд. техн. наук, начальник отдела менеджмента  
качества Белорусско-Российского  
университета

E-mail: bauer\_mogilev@tut.by

В статье отмечается, что существующие методики выбора параметров элементов гусеничного обвода не позволяют установить причины быстрого износа траков. Изложены теоретические предпосылки для анализа сил, действующих на траки во время работы гусеницы. Представлено описание вычислений, позволяющих определить характеристики траков во время движения машины. Проанализированы характеристики траков, расположенных в разных местах гусеничного обвода машины. Установлено, что силы, действующие на траки отличаются более, чем в пять раз, в зависимости от места расположения конкретного трака.

**Ключевые слова:** бульдозер, гусеничный движитель, траки, характеристики траков, математическая модель, программное обеспечение.

Гусеничный бульдозер – одна из основных машин, применяемых в строительстве и горнодобывающей промышленности. Основные преимущества данных машин – это высокие тяговые усилия и малое давление на грунт. Вместе с преимуществами такие машины имеют и существенные недостатки, один из которых – быстрый износ элементов гусениц, что требует частой их замены и определяет высокую стоимость эксплуатации. Предпосылками к быстрому износу является работа гусениц в тяжелых условиях, в твердой абразивной среде. Очевидно, что кроме условий эксплуатации на работоспособность гусениц оказывают влияние конструктивные особенности гусеничного обвода. Современные теории, на основании которых произ-

### TRUCK LOAD IN THE TRACK CHAIN

**Igor V. Leskovets,**

Candidate of Science, Technical, Associate professor

**Oleg V. Leonenko,**

Candidate of Science, Technical

**Alixandr D. Buzhinski,**

Candidate of Science, Technical

State institution of higher professional education  
«Belarusian-Russian University»

The paper shows that the existing procedures for the selection of parameters of track chain elements do not make it possible to establish the causes of rapid wear of racks. The theoretical background for the analysis of the forces acting on the track during tracks movement is given. The description of the calculations to determine the parameters of the tracks during the caterpillar operation is presented. The characteristics of tracks located in different places of the track chain of the vehicle are analyzed. It was found that the forces acting on the tracks differ by more than five times, depending on the location of a particular track.

**Keywords:** bulldozer, caterpillar mover, tracks, track characteristics, mathematical model, software.

Mechanization of Construction

водится выбор параметров элементов гусеничного обвода [1, 2, 3], предлагают учитывать натяжение гусеничной цепи для расчета сил, возникающих при взаимодействии траков и колес. Для более точного определения сил, действующих в гусеничном обводе во время работы машины, возможно использование динамического анализа [4], позволяющего получить характеристики нагружения траков. Часть исследований, посвященных данной тематике предполагает моделирование гусеничного обвода, как гибкой ленты, что не позволяет установить направление и значения сил, действующих в траках в зависимости от их расположения и вариантов взаимодействия с колесами и опорной поверхностью.



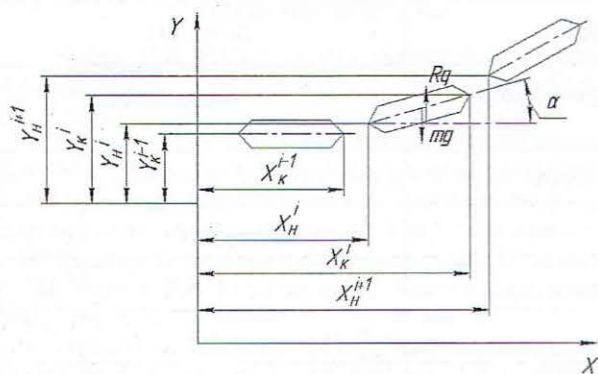


Рис. 1. Схема для определения расстояний между центрами шарниров соседних траков по осям абсцисс и ординат

Для анализа сил, возникающих в траках при их взаимодействии во время работы гусеничного движителя, авторами использовано программное обеспечение [5], основанное на рассмотрении гусеничного обвода, состоящего из элементов: траков, направляющих, ведущих, опорных, поддерживающих колес и их подвесок.

Силы взаимодействия между траками определяются на основании схемы (рис. 1).

На рис. 1 приняты следующие обозначения:

$X_H^{i+1}$  – абсцисса левого шарнира последующего,  
 $X_K^{i-1}$  – абсцисса правого шарнира предыдущего,  
 $Y_H^{i+1}$  – ордината левого шарнира последующего,  
 $Y_K^{i-1}$  – ордината правого шарнира предыдущего трака.

Для определения сил, действующих на трак, используется система уравнений:

$$\frac{d^2 X_{\text{ТРК}}}{dt^2} = (F_x^{i+1} - F_x^{i-1}) / m_{\text{ТРК}},$$

$$\frac{d^2 Y_{\text{ТРК}}}{dt^2} = (F_y^{i+1} + F_y^{i-1} - m_{\text{ТРК}}g + R_q) / m_{\text{ТРК}},$$

$$\frac{d^2 \varphi_{\text{ТРК}}}{dt^2} = (F_y^{i+1} \cdot \sin(\alpha) L_{\text{ТРК}} / 2 - F_y^{i-1} \cdot \sin(\alpha) L_{\text{ТРК}} / 2 -$$

$$- F_x^{i+1} \cdot \cos(\alpha) h_{\text{ТРК}} / 2 + F_x^{i-1} \cdot \sin(\alpha) h_{\text{ТРК}} / 2) / J_{\text{ТРК}},$$

где  $\alpha$  – текущий угол наклона трака к направлению отсчета углов (рад),  $X_{\text{ТРК}}$  – текущая абсцисса трака,  $Y_{\text{ТРК}}$  – текущая ордината трака,  $m_{\text{ТРК}}$  – масса трака,  $L_{\text{ТРК}}$  – длина трака,  $J_{\text{ТРК}}$  – момент инерции трака; силы  $F_x$  и  $F_y$  определяются по выражениям:

$$F_x = C_{\text{ТРК}}(X_H^{i+1} - X_K^{i-1}) - r_{\text{ТРК}} \cdot \left( \frac{dX_{\text{ТРК}}^i}{dt} - \frac{dX_{\text{ТРК}}^{i-1}}{dt} \right) -$$

$$- C_{\text{ТРК}}(X_H^i - X_K^{i-1}) + r_{\text{ТРК}} \cdot \left( \frac{dX_{\text{ТРК}}^i}{dt} - \frac{dX_{\text{ТРК}}^{i-1}}{dt} \right),$$

$$F_y = C_{\text{ТРК}}(Y_H^{i+1} - Y_K^{i-1}) - r_{\text{ТРК}} \cdot \left( \frac{dY_{\text{ТРК}}^i}{dt} - \frac{dY_{\text{ТРК}}^{i-1}}{dt} \right) -$$

$$- C_{\text{ТРК}}(Y_H^i - Y_K^{i-1}) + r_{\text{ТРК}} \cdot \left( \frac{dY_{\text{ТРК}}^i}{dt} - \frac{dY_{\text{ТРК}}^{i-1}}{dt} \right).$$

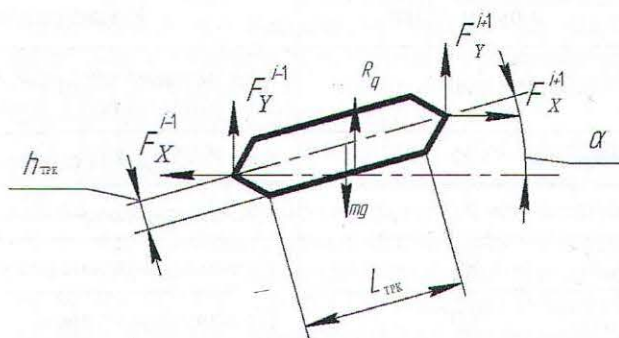


Рис. 2. Динамическая модель трака, расположенного между опорными колесами

Значения сил  $F_x$  и  $F_y$  определяются на основании рис. 2.

На основании данных теоретических подходов, подробные сведения о которых изложены в [6–9], проведен анализ сил, возникающих при работе гусеничного движителя.

Исследования, выполненные авторами с помощью программного обеспечения, основанного на интегральной математической модели гусеничного бульдозера, позволили получить качественную и количественную картину нагружения траков. Вычислительные эксперименты проведены с моделью бульдозера на базе трактора «Беларус 1502» массой с бульдозерным оборудованием 13,9 т. На рис. 3 представлен фрагмент работы программного обеспечения при имитации бульдозера в статическом положении. Машина находится в состоянии покоя.

Пояснения к рис. 3. На каждый трак действуют силы натяжения от соседних траков, которые взаимно компенсируются. На рисунке в масштабе изображены все силы. Наибольшие значения имеют силы, которые вызваны взаимодействием траков с колесами гусеничного движителя. В таблице представлены значения сил, действующих на траки.

Результаты вычислительных экспериментов показывают, что силы, действующие на трак в пределах гусеничного обвода, отличаются более, чем в пять раз. Наибольшие силы действуют при нахождении траков под опорными колесами, на направляющем и ведущем колесах.

На рис. 4 представлен фрагмент работы программного обеспечения при вычислительном эксперименте в момент, когда крутящий момент на ведущем колесе равен 11,4 кН·м, скорость машины 0,8 м/с. Направления сил, действующих на траки, несколько отклоняются от направлений сил при нахождении машины в статическом положении и изменяются значения сил.

Таким образом, интерес для анализа представляют характеристики сил, действующих на траки в процессе начала движения, ускорения, движения с постоянной скоростью и выполнения технологических операций. На рис. 4 представлены характеристики сил, действующих на траки от начала движения до достижения машиной скорости



Номер трака	Место расположения	Сила, кН
4	Под первым опорным колесом (нумерация колес слева – направо)	5,2
12	Под последним опорным колесом	6,2
21	На направляющем колесе	10,7
26	На поддерживающем колесе	1,8
40	На ведущем колесе	9,5

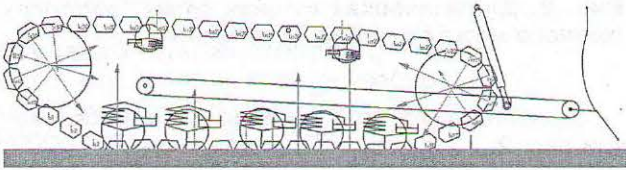


Рис. 3. Фрагмент работы программного обеспечения

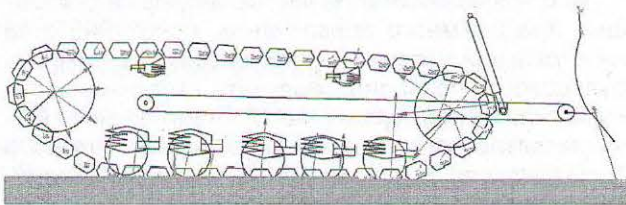


Рис. 4. Фрагмент работы программного обеспечения при скорости машины 0,8 м/с

0,9 м/с. Для анализа приняты траки с номерами 4, 16 и 27. Четвертый трак движется из-под первого опорного колеса, заходит на ведущее колесо, затем выходит на верхнюю провисающую ветвь. Шестнадцатый трак перемещается с передней провисающей ветви, проходит под последним и предпоследним опорными колесами. Двадцать седьмой трак перемещается с верхней провисающей ветви, проходит по направляющему колесу. Процесс исследован в течение 9 с, в течение нарастания крутящего момента.

В процессе движения машины четвертый трак (штриховая линия на рис. 5) перемещается из-под последнего опорного колеса на ведущее колесо, вдоль радиуса этого колеса и выходит на верхнюю провисающую ветвь. По мере продвижения трака, в связи с ростом крутящего момента на ведущем колесе, увеличивается результирующая сила, действующая на трак. Эта сила стабилизируется при значении около 10 кН во время нахождения трака на ведущем колесе; при выходе трака на верхнюю провисающую ветвь сила, действующая на трак, снижается и ее значение составляет менее 1 кН. Значения сил, действующих на 16-й трак (бледная штриховая линия), имеют скачки при переезде через трак опорных колес, в эти моменты нагрузки на

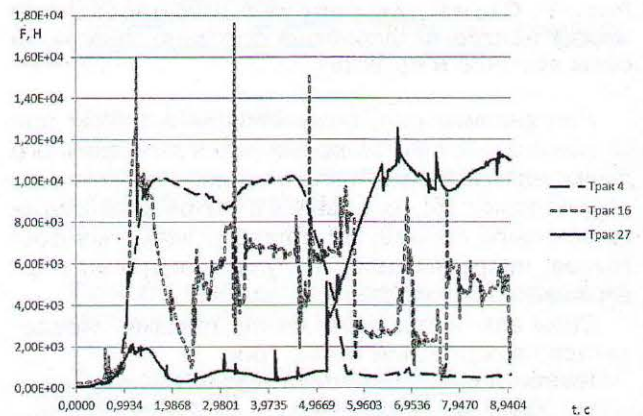


Рис. 5. Характеристики сил, действующих на траки во время начала движения

траки максимальные и значения сил достигают 16 кН; во время нахождения траков между колесами значения сил изменяются в пределах от 2 до 6 кН. Наименьшие нагрузки 27-й трак испытывает при нахождении на верхней провисающей ветви; при заходе трака на направляющее колесо, нагрузки на него растут и достигают 12 кН.

### Заключение

Исследования, проведенные с помощью имитационной модели, позволили получить характеристики сил, действующих на траки в процессе начала движения машины, во время нарастания крутящего момента на ведущем колесе.

Максимальные силы, действуют на траки во время прохождения по ним опорных колес машины. Местами значительных нагрузок являются ведущее и направляющие колеса. Максимальные значения результирующих сил, действующих на траки, практически не превышают сил натяжения гусеничного обвода, однако направления действия внешних сил меняются в процессе движения траков на 180°.

Предлагаемые теоретические положения и программное приложение предоставляют возможность на стадии проектирования определять значения сил, действующих на траки, для проведения последующих расчетов на прочность, надежность и долговечность.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Носов Н.А.** Расчет и конструирование гусеничных машин / Н. А. Носов [и др.]. Л. : Машиностроение, 1972. 560 с.
2. **Барский И.Б.** Конструирование и расчет тракторов / И. Б. Барский. М. : Машиностроение, 1980. 335 с.
3. **Гуськов В.В.** Тракторы. Теория. В 2 ч. / В.В. Гуськов. Минск : Выш. шк., 1987. Ч. 2. 384 с.
4. **Пастух С.Н.** Динамика машин : учеб. пособие / С.Н. Пастух, Р.А. Кустаров. М. : Военно-инж. акад., 2005. 189 с.
5. **Лесковец И.В.** Программа для расчета характеристик гусеничных машин для земляных работ с отвальными рабочими органами. / Национальный центр интеллектуальной собственности Республики Беларусь // Свидетельство о регистрации компьютерной программы № 404 от 14.03.2012 г.
6. **Лесковец И.В.** Математическая модель гусеничного движителя / И.В. Лесковец // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. 2006. № 4. С. 15–26.
7. **Лесковец И.В.** Параметры элементов имитационной модели гусеничного движителя / И.В. Лесковец // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Машиностроение. 2006. № 4. С. 58–63.
8. **Лесковец И.В.** Методы моделирования гусеничных машин / И. В. Лесковец, В. В. Береснев // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. 2007. № 1. С. 26–32.
9. **Лесковец И.В.** Определение скоростей траков в имитационной модели гусеничного движителя / И.В. Лесковец // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. Разд. Механизация и сельскохозяйственное машиностроение. 2007. № 2. С. 134–139.

## REFERENCES

1. **Nosov N.A.** Raschet i konstruirovaniye gusenichnykh mashin / N.A. Nosov [i dr.]. L. : Mashinostroenie, 1972. 560 s. (Nosov N.A. Calculation and design of tracked vehicles / N. A. Nosov [and other]. L.: Mechanical engineering, 1972. 560 p.)
2. **Barskij I.B.** Konstruirovaniye i raschet traktorov / I.B. Barskij. M.: Mashinostroenie, 1980. 335 s. (Barskij I.B. Design and calculation of tractors / I.B. Barskij L.: Mechanical engineering, 1980. 335 p.)
3. **Gus'kov V.V.** Traktory. Teoriya : v 2 ch. / V. V. Gus'kov. Minsk :Vysh. shk., 1987. CH. 2. 384 s. (Gus'kov, V.V. Tractors. Theory: in 2 parts /V.V. Gus'kov. Minsk :Graduate school., 1987. P. 2. 384 p.)

4. **Pastukh S.N.** Dinamikamashin :ucheb. posobie / S.N. Pastukh, R.A. Kustarov. M.: Voенно-inzh. akad., 2005. 189 s. (Pastukh S.N. Dynamics of machines: a tutorial / Pastukh S.N., Kustarov R.A. M. Military Engineering Academy, 2005. 189 p.)

5. **Leskovets I.V.** Programma dlya rascheta kharakteristik gusenichnykh mashin dlya zemlyanykh rabot s otval'nymi rabochimi organami. / Natsional'nyj tsentr intellektual'noj sobstvennosti Respubliki Belarus' // Svidetel'stvo o registratsiikomp'yuternoj programmy № 404 ot 14.03.2012g.( I.V. Leskovets Programm for calculating the characteristics of traced vehicles eartmoving work with damp bodies. / National Center of intellectual Property of the Republic of the Belarus // The certificate of registration of a computer program number № 404 ot14.03.2012 g.)

6. **Leskovets I.V.** Matematicheskaya model' gusenichnogo dvizhitelya / I.V. Leskovets // Vestn. Belarus.-Ros. un-ta. 2006. № 4. S. 15–26. (Leskovets I.V. Mathematical model of caterpillar tracks / i.V. Leskovets Bulletin of the Belarusian-Russian University Ser. Engineering Scientific theory journal. 2006. № 4 (12). pp. 15–26.)

7. **Leskovets I.V.** Parametryehlementov imitatsionnoj modeli gusenichnogo dvizhitelya / I.V. Leskovets // Vestn. Brest. gos. tekhn. un-ta. Ser. Mashinostroenie. 2006. № 4. S. 58–63.(Leskovets, I. V. Parameters element simulation model of caterpillar mover / I.V. Leskovets Bulletin of the Brest State University Ser. Engineering Scientific theory journal 2006 № 4 (40). pp. 58 – 63.)

8. **Leskovets I.V.** Metod y modelirovaniya gusenichnykh mashin / I. V. Leskovets, V. V. Beresnev // Vestn. Belarus.-Ros. un-ta. 2007. № 1. S. 26–32. (Leskovets I.V. Modeling techniques tracked vehicles // Leskovets I.V., Beresnev V.V. Bulletin of the Belarusian-Russian University Scientific-methodical journal 2007. № 1 (14) pp. 26–32.)

9. **Leskovets I.V.** Opredelenie skorostej trakov v imitatsionnoj modeli gusenichnogo dvizhitelya / I.V. Leskovets // Vestn. Belarus.gos. s.-kh. akad. Razd. Mekhanizatsiya i sel'skokhozyajstvennoemashinostroenie. 2007. № 2. S. 134–139. (Leskovets I.V. Determining the speed of trucks in the simulation model of caterpillar tracks / I.V. Leskovets Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy Mechanization and agricultural machinery. 2007. № 2. pp. 134 – 39.)