

АНАЛИЗ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЭКСКАВАТОРОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ТРАНСДЮСЕРОВ

На основании экспериментальных данных составлено уравнение регрессии, определяющее приведенный коэффициент трения при смерзании грунта с металлической поверхностью рабочего органа. Предложено использовать приведенный коэффициент трения при определении производительности экскаваторов с учетом действия интенсификаторов.

Ключевые слова: термоакустический метод, пьезокерамический трансдьюсер, коэффициент трения, коэффициент пропорциональности, сопротивление копанью.

Техническая производительность экскаватора с учетом налипания грунта определяется сопротивлением [1]:

$$B_{г.ч.} = \frac{3600 \cdot q \cdot K_p \cdot k_H \cdot k_{нал}}{t_{ц}}, \quad (1)$$

где q – емкость ковша, м³; K_p – коэффициент влияния разрыхления грунта, $K_p=1/k_p$; k_p – коэффициент разрыхления грунта; k_H – коэффициент наполнения ковша; $t_{ц}$ – продолжительность цикла, с.; $k_{нал}$ – коэффициент налипаемости на внутреннюю поверхность скольжения влажного грунта, $k_{нал}=0,7 \dots 1,0$;

$$k_{нал} = \frac{q - q_H}{q},$$

где q_H – объем грунта, налипшего на внутреннюю поверхность ковша, м³; $q - q_H$ – фактический объем грунта, выгружаемого из ковша, м³.

В результате устранения адгезии грунта можно достичь повышения производительности экскаваторов за счет снижения усилия копания, увеличения объема набираемого грунта и сокращения времени цикла, т. к. не будет затрат времени на очистку ковша.

Для определения сопротивления грунта копанью ковшом экскаватора Н.Г. Домбровским [1] предложена формула:

$$P = P_p + P_T + P_{п},$$

где P_p – сопротивление грунта резанию, Н; P_T – сопротивление трению рабочего органа о грунт, Н; $P_{п}$ – сопротивление перемещению призмы волочения и движению грунта в ковше, Н.

Переходя к удельным сопротивлениям, это уравнение можно записать в виде:

$$K = K_p + K_T + K_{п},$$

где слагаемые, соответственно, те же.

По данным И.А. Недорезова [2], для ковшей экскаваторов доля сопротивлений $K_{п}$ и K_T к величине K_p может составлять примерно от 70 % до 30 %, в зависимости от прочности грунта, снижаясь с ее повышением.

Применяемые в настоящее время средства борьбы с примерзанием грунта в ковшах экскаваторов либо частично, либо полностью устраняют сопротивление трению грунта в ковше.

Силовое взаимодействие между контактирующими поверхностями твердых тел приводит не только к появлению сил, нормальных к поверхности раздела (силы адгезии), но и сил, касательных к поверхности раздела (сил трения), проявляющихся при попытке вызвать взаимное смещение соприкасающихся тел. Поэтому адгезия тесно связана с внешним трением.

По данным Р.П. Заднепровского [3], сила трения составляет от 30 % до 60 % общего сопротивления копанью. Сила трения грунта по поверхности скольжения с учетом адгезии определяется зависимостью [4]:

$$P_T = F = f \cdot P + f_1 \cdot \rho_{п} \cdot S, \quad (2)$$

где P – равнодействующая сил нормального давления контакта, Н; $\rho_{п}$ – удельная сила прилипания, Па; f – коэффициент пропорциональности для деформационной составляющей силы трения; f_1 – коэффициент пропорциональности для адгезионной составляющей силы трения; S – площадь контакта, м².

Следует отметить, что ряд исследователей считают силы притяжения между поверхностями единственной причиной внешнего трения. Например, согласно теории трения Терцаги-Боудена [5], сила трения равна прочности на сдвиг адгезионных связей, образовавшихся в точках истинного контакта, и определяется формулой:

$$P_T = F = \tau \cdot S, \quad (3)$$

где τ – сопротивление сдвигу, Па; S – площадь контакта, м².

Приравнивая правые части уравнений (2) и (3), имеем:

$$\tau \cdot S = f \cdot P + f_1 \cdot \rho_{п} \cdot S, \quad (4)$$

откуда сопротивление сдвигу:

$$\tau = \frac{f \cdot P + f_1 \cdot \rho_{п} \cdot S}{S}. \quad (5)$$

Анализ формулы (5) показывает, что сопротивление (напряжение) сдвигу грунта по металлической поверхности состоит из деформационной (fP) и адгезионной ($f, \rho_{п}, S$) составляющих и зависит от давления и площади контакта, свойств поверхностей сдвига, скорости перемещения образца.

* - автор, с которым следует вести переписку.

Разделив обе части уравнения (4) на равнодействующую сил нормального давления контакта P , получим:

$$f_{\text{пр}} = \frac{\tau \cdot S}{P} = f + f_1 \cdot \rho_{\text{п}} \frac{S}{P}. \quad (6)$$

Коэффициент пропорциональности, или приведенный коэффициент трения $f_{\text{пр}}$ учитывает особенности сдвига при определении силы трения грунта по металлической поверхности, а его величина включает деформационную и адгезионную составляющие и зависит от тех же параметров, что и сопротивление сдвигу, а именно: времени t и давления P контакта, влажности W и дисперсности D грунта, температуры в плоскости сдвига T , состояния поверхности металла.

Будем считать, что формула (5) определяет и сопротивление сдвигу при примерзании грунта к поверхности скольжения. Тогда коэффициент пропорциональности $f_{\text{пр}}$ будет учитывать влияние адгезии при отрицательной температуре и определяется приравнением аналитической зависимости (5) с экспериментальной зависимостью, полученной нами опытным путем, где

$$\tau = f(D, F, P, W, T, t). \\ \text{С учетом зависимости в натуральном виде:} \\ \tau_{\text{н.в.}} = 66770,25D + 10,95p_{\text{п}} + 16,96W - 1,34T + \\ + 7,79t - 6,52 \cdot 10^6 D^2 - 0,81p_{\text{п}}^2 - 0,09W^2 + \\ + 0,042T^2 - 0,1t^2 - 409,5D \cdot p_{\text{п}} - 718W \cdot D + \\ + 484,5D \cdot T + 182,5p_{\text{п}} \cdot t + 0,09W \cdot p_{\text{п}} - \\ - 0,07p_{\text{п}} \cdot T - 0,36W \cdot T - 0,11 \cdot T - 648,92. \quad (7)$$

При термоакустическом воздействии с применением пьезокерамических трансдюсеров в натуральном виде:

$$\tau_{\text{т.а.в.}} = 4,42 + 0,15\rho_{\text{п}} + 0,2W + 0,58T - \\ - 0,07t + 330,5D - 24D \cdot T + 59D \cdot t + \\ + 0,001\rho_{\text{п}} \cdot W - 0,01\rho_{\text{п}} \cdot T - 0,03W \cdot T - \\ - 19 \cdot 10^4 D^2 - 0,01\rho_{\text{п}}^2 - 0,02W^2 - 0,01t^2. \quad (8)$$

Напряжение сдвига τ , площадь S и давление контакта P поддаются измерению, что дает возможность экспериментально определить приведенный коэффициент трения $f_{\text{пр}}$ при смерзании

грунта с металлической поверхностью рабочего органа.

С учетом зависимости:

$$f_{\text{пр}} = (66770,25D + 10,95p_{\text{п}} + 16,96W - \\ - 1,34T + 7,79t - 6,52 \cdot 10^6 D^2 - 0,81p_{\text{п}}^2 - \\ - 0,09W^2 + 0,042T^2 - 0,1t^2 - 409,5D \cdot p_{\text{п}} - \\ - 718W \cdot D + 484,5D \cdot T + 182,5p_{\text{п}} \cdot t + \\ + 0,09W \cdot p_{\text{п}} - 0,07p_{\text{п}} \cdot T - 0,36W \cdot T - \\ - 0,11 \cdot T - 648,92) \cdot \frac{S}{P}. \quad (9)$$

При термоакустическом воздействии с применением пьезокерамических трансдюсеров:

$$f_{\text{пр}} = (4,42 + 0,15\rho_{\text{п}} + 0,2W + 0,58T - \\ - 0,07t + 330,5D - 24D \cdot T + 59D \cdot t + \\ + 0,001\rho_{\text{п}} \cdot W - 0,01\rho_{\text{п}} \cdot T - 0,03W \cdot T - \\ - 19 \cdot 10^4 D^2 - 0,01\rho_{\text{п}}^2 - 0,02W^2 - 0,01t^2) \cdot \frac{S}{P}. \quad (10)$$

Результаты расчета коэффициента пропорциональности по зависимости (10) при частоте вибрации 21,8 кГц и амплитуде 0,005 мм представлены в таблице 1.

Данные величины $f_{\text{пр}}$ определены при следующих значениях внешних факторов: дисперсность грунта $D=5 \cdot 10^{-3}$ мм, давление прижатия $\rho_{\text{п}}=20$ кПа, влажность $W=17,5\%$, время контакта $t=20,5$ мин (1230 с), равнодействующая сил нормального давления контакта $P=200\text{Н}$, площадь контакта $S=0,01\text{м}^2$.

Анализ полученных значений коэффициента пропорциональности $f_{\text{пр}}$ показывает, что с понижением температуры контактирующих поверхностей от $+5^\circ\text{C}$ до -35°C $f_{\text{пр}}$ возрастает при термоакустическом воздействии в 3 раза.

Абсолютные значения приведенного коэффициента трения $f_{\text{пр}}$ при термоакустическом воздействии меньше, чем величина $f_{\text{пр}}$ без внешнего воздействия в среднем в 25 раз, увеличиваясь с понижением температуры. С понижением температуры

Таблица 1

Ориентировочные значения коэффициента пропорциональности $f_{\text{пр}}$ в зависимости от температуры в плоскости сдвига

| Температура, °C | +5 | -5 | -15 | -25 | -35 |
|--|------|------|------|-------|-------|
| Без внешнего воздействия | 2,43 | 6,09 | 9,33 | 12,44 | 14,53 |
| При термоакустическом воздействии с применением пьезокерамического трансдюсера | 0,19 | 0,29 | 0,39 | 0,48 | 0,58 |

кратность снижения $f_{пр}$ при термоакустическом воздействии возрастает.

Используя зависимости (9), (10), можно определить значения коэффициента пропорциональности при требуемых значениях внешних факторов (в зависимости от условий эксплуатации) и рассчитать силу трения грунта по металлической поверхности рабочего органа с учетом адгезии при смерзании и при термоакустическом воздействии с применением пьезокерамического трансдюсера.

Сопротивление копанию и энергоемкость процесса разработки грунта ковшом экскаватора в значительной степени определяются явлениями, протекающими при движении вырезанной из массива стружки грунта в плоскости сдвига.

Одним из критериев оценки эффективности работы оборудования является показатель его удельной энергоемкости. Удельная энергоемкость процесса сдвига грунта по металлической поверхности рабочего органа при смерзании определяется следующим выражением (11) [6]:

$$N_{уд} = \frac{N_{СУММ}}{S_{СДВ}}, \quad (11)$$

где $N_{СУММ}$ – суммарная мощность, затрачиваемая на процесс сдвига, кВт; $S_{СДВ}$ – площадь сдвигаемого образца, м².

Суммарные затраты мощности на процесс сдвига при тепловом воздействии (12):

$$N_{ТЕПЛ} = N_{Н.Э.} \cdot K_B + N_{СДВ}, \quad (12)$$

где $N_{Н.Э.}$ – мощность нагревательных элементов, кВт; K_B – коэффициент, учитывающий эффективное время работы элементов; $N_{СДВ}$ – мощность, затрачиваемая на сдвиг, кВт.

$$N_{СДВ} = \frac{A}{t} = \frac{P_C \cdot L}{t},$$

где A – работа, затрачиваемая на сдвиг, кДж; t – продолжительность сдвига, с; P_C – сопротивление сдвигу при соответствующем воздействии (по результатам эксперимента), кН; L – перемещение образца, м.

Суммарные затраты мощности при термоакустическом воздействии (13):

$$N_{ТАВ} = N_{ТИ} \cdot K_B + N_{ИС} + N_{СДВ}, \quad (13)$$

где $N_{ТИ}$ – суммарная мощность термоакустических излучателей, кВт; $N_{ИС}$ – мощность источника (генератора) ультразвуковых колебаний, кВт.

Суммарные затраты мощности на процесс сдвига при акустическом воздействии (14):

$$N_{АВ} = N_{АИ} \cdot K_B + N_{ИС} + N_{СДВ}, \quad (14)$$

где $N_{АИ}$ – мощность акустического излучателя, кВт [7].

Суммарные затраты мощности на процесс сдвига при вибрационном низкочастотном воздействии (15):

$$N_{ВН} = N_{ВВ} \cdot K_B + N_{СДВ}, \quad (15)$$

где $N_{ВВ}$ – мощность привода вибрационных возбудителей колебаний, кВт.

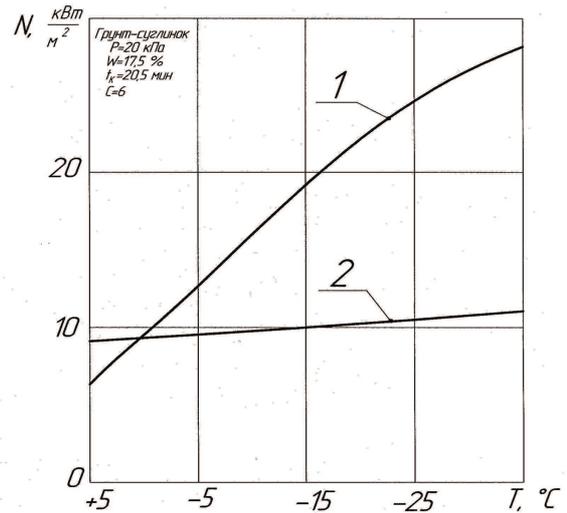


Рис. 1. Зависимость удельной энергоемкости процесса сдвига грунта по металлической поверхности от температуры в плоскости сдвига:

1 – без внешнего воздействия; 2 – при термоакустическом воздействии ($F=21,8$ МГц; $A=0,005$ мм; $T=20^\circ\text{C}$; $t_{возд}=15$ с).

Результаты расчетов зависимости удельной энергоемкости процесса сдвига грунта по металлической поверхности при смерзании от температуры в плоскости сдвига представлены в виде графиков зависимостей $N_{уд} = f(T)$ на рис. 1. Анализ полученных зависимостей показал, что удельная энергоемкость процесса сдвига при термоакустическом воздействии меньше в 2 ... 3 раза удельной энергоемкости без внешнего воздействия.

Примеры технических решений устройств с применением пакетных пьезокерамических трансдюсеров, установленных на ковшах экскаваторов, показаны на рис. 2 и рис. 3. В конструкции использованы низкочастотные пьезокерамические преобразователи 1 (ПП1-01/18), размещенные в выфрезерованных отверстиях передней стенки 2 ковша и закрепленные на ней центральным болтом 3. Кроме продольных колебаний пакета, передающихся центральному болту 3, происходит его нагрев в результате разогрева пьезокерамики. Таким образом, поверхность центрального болта $\varnothing 50$ мм является одновременно источником теплового и колебательного воздействия, что значительно снижает адгезию грунта на внутреннюю поверхность передней стенки ковша. Количество пакетных излучателей (например, типа ПП1-01/18, резонансная частота 18 кГц, мощность одного пакета 0,25 кВт) для ковша экскаватора вместимостью 4 м³ составляет 24 единицы.

Применение пьезокерамических трансдюсеров более выгодно с точки зрения компактности и равномерности расположения по поверхности рабочего органа, чем, к примеру, использование существующих на данный момент средств для обогрева ковша или вибрационного воздействия.

Преобразователи размещены в основных местах налипания грунта, что дает наибольший эффект в борьбе с адгезией.

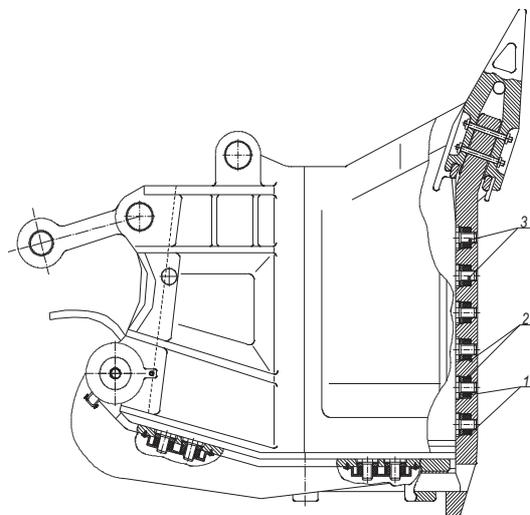


Рис. 2. Ковш экскаватора с прямой лопатой, оборудованный пакетными пьезокерамическими трансдюсерами

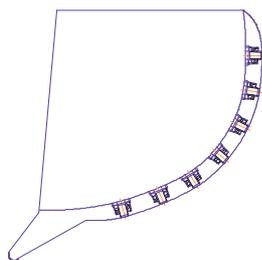


Рис. 3. Ковш экскаватора с обратной лопатой, оборудованный пакетными пьезокерамическими трансдюсерами

Литература

1. Домбровский, Н. Г. Строительные машины : учебник: в 2 ч. / Н. Г. Домбровский, М. П. Гальперин. – М.: Высш. шк., 1985. – Ч. 2. – 224 с.
2. Недорезов, И. А. Интенсификация рабочих процессов землеройно-транспортных машин и совершенствование их рабочих органов / И. А. Недорезов // Исследование машин для земляных работ : сб. науч. тр. – М.: Транспорт, 1989. – С. 5-11.
3. Заднепровский, Р. П. Теория трения скольжения. / Р. П. Заднепровский. – Волгоград: Офсет, 2005. – 51с.
4. Федоров, Д. И. Рабочие органы землеройных машин / Д. И. Федоров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.
5. Bowden, F. P. Friction and Lubrication of Solids / F.P. Bowden, D. Tabor. – Oxford, 1964.
6. Баловнев, В. И. Оценка технико-экономической эффективности дорожно-строительных машин на этапе проектирования / В. И. Баловнев, А. Б. Ермилов. – М. : МАДИ, 1984. – 102 с.
7. Донской, А. В. Ультразвуковые электротехнологические установки / А.В. Донской, О.К. Келлер, Г.С Кратыш. – Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1992. – 208 с.