

**С. И. Васильев, канд. техн. наук, доц.; С. П. Ереско, д-р техн. наук, проф.**

ФГАОУ ВПО «СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Красноярск, Россия

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В ГИДРОПРИВОДЕ ТРАНШЕЙНОГО ЭКСКАВАТОРА**

Приводится методика формирования математической модели системы стабилизации давления в гидроприводе траншейного экскаватора с учетом конструктивных параметров рабочего органа, физико-механических характеристик разрабатываемых грунтов и климатических условий эксплуатации.

Появление высокопроизводительных гидравлических машин, повышение номинального давления, применение усовершенствованной контрольно-регулирующей аппаратуры позволило получить качественно новые характеристики исполнительных механизмов, что дало возможность гидрофицировать привод основных исполнительных механизмов экскаваторов непрерывного действия и, как следствие, сгладить пиковые нагрузки на их трансмиссию при разработке мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями.

Привод рабочего оборудования траншейных экскаваторов имеет одномоторный гидравлический привод в сочетании с механической трансмиссией. Опыт эксплуатации как серийно выпускаемых траншейных экскаваторов, так и их опытных образцов обнаруживает общую закономерность – значительные динамические колебания давления в напорной магистрали и магистрали подпитки и, как следствие, малый срок службы трубопроводной и контрольно-регулирующей аппаратуры при разработке мерзлых грунтов [1]. Встраиваемые в систему привода фрикционные муфты предельного момента, предназначенные обеспечить максимальные крутящие моменты на рабочем органе, многочисленные модификации механических предохранительных устройств, не достигают желаемого результата, так как физико-механические характеристики разрабатываемой среды с каменистыми включениями весьма неоднородны.

Из условия реализации процесса резания мерзлых грунтов требуемый приводной момент на валу гидромотора привода ротора:

$$M_p > M_{mc} \cdot K_n + M_c, \quad (1)$$

где  $M_{mc}$  – математическое ожидание момента на режущих зубьях ротора, который зависит от глубины резания грунта;  $K_n$  – коэффициент, зависящий от количества одновременно контактирующих с грунтом зубьев;  $M_c$  – момент сопротивления, учитывающий вариацию гравийно-галечниковых включений и физико-механических свойств сезонно-мерзлого грунта:

$$M_c = P_k \cdot R_r, \quad (2)$$

где  $P_k$  – усилие резания грунта на зубьях ротора;  $R_r$  – радиус установки зубьев относительно вала привода ротора.

Теоретические исследования вероятности распределения фракционного состава включений в грунтах, закономерности распределения темпе-

ратур грунта и его прочности по глубине для рассматриваемых регионов Восточной Сибири [2, 3] позволяют определить влияние свойств сезонно-мерзлых грунтов на формирование нагрузки на режущей кромке ковша:

– для однородного грунта

$$P_k = 8,32(-0,283 + 0,149 \cdot 10^{-1} C - 0,221 \cdot 10^{-4} C^2) \times (-0,419 \cdot 10^{-1} + 0,75 \cdot 10^{-1} h - 0,54 \cdot 10^{-3} h^2) \times (0,178 \cdot 10^{-2} + 0,06b - 0,67 \cdot 10^{-3} b^2) \cdot 10^2 \quad (3)$$

– для грунтов с включениями

$$P'_k = P_k K_v K_\alpha K_\xi \mu \quad (4)$$

где  $K_v$  – коэффициент влияния скорости резания;  $K_\alpha$  – коэффициент, учитывающий влияние угла резания  $\alpha^\circ$ ;  $\mu$  – коэффициент блокированности реза;  $K_\xi$  – коэффициент влияния размера гравийно-галечниковых включений.

Коэффициент влияния скорости резания зависит и от скорости резания ( $V_p$ ) и от шага расстановки резцов ( $t$ ) и от ширины реза ( $b$ ) и от глубины резания ( $h$ )

$$K'_v = (0,9244 + 0,063V_p) \left( 0,98 + 0,023 \frac{t-b}{h} \right), \quad (5)$$

Коэффициент влияния угла резания ( $\alpha^\circ$ )

$$K'_\alpha = (0,456 + 0,068\alpha) \left( 0,98 + 0,03 \frac{t-b}{h} \right). \quad (6)$$

Момент от силы резания грунта, зависящий от силы резания  $P'_k$

$$M_1 = (P'_k) \cdot R_r.$$

Сила резания грунта, зависящая от физико-механических свойств грунта  $C$ , толщины стружки  $h$ , ширины реза  $b$ , скорости резания  $V_p$ , шага расстановки резцов  $t$ , коэффициента блокированности  $\mu$  и размера включений  $\zeta$ . Исследования момента сопротивления резания сезонно-мерзлых однородных грунтов от угла резания при прохождении реза из нижней точки траншеи на дневную поверхность выявили нелинейность зависимости от заднего угла резания (рис. 1)

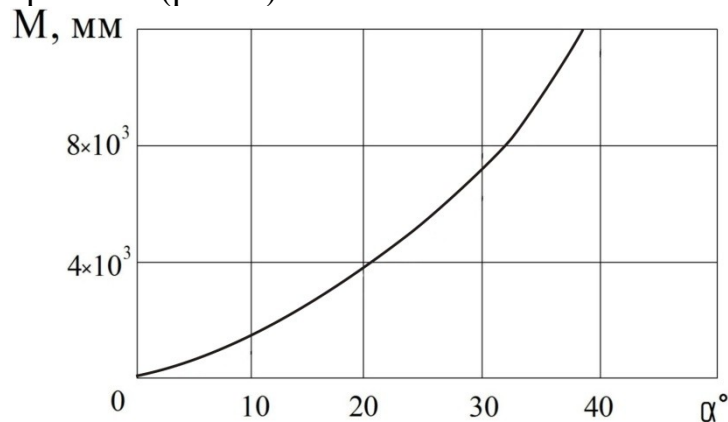


Рис. 1. Зависимость момента сопротивления резания грунта от угла резания

Коэффициент, учитывающий степень блокированности реза определяется по формуле

$$\mu = 0,516 + 0,2622 \left( \frac{t-b}{h} \right). \quad (7)$$

Сопротивление резанию грунтов  $P'_k$  может быть получено аппроксимацией экспериментальных данных (рис. 2, рис. 3)

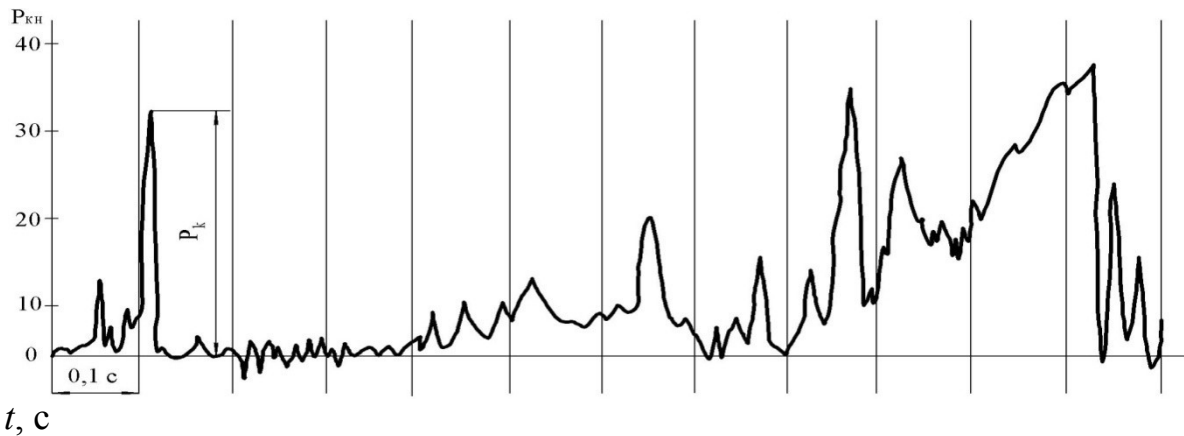


Рис. 2. Оциллограмма нагрузок при разработке мерзлой глины с гравийно-галечниковыми включениями резцом шириной 18 мм

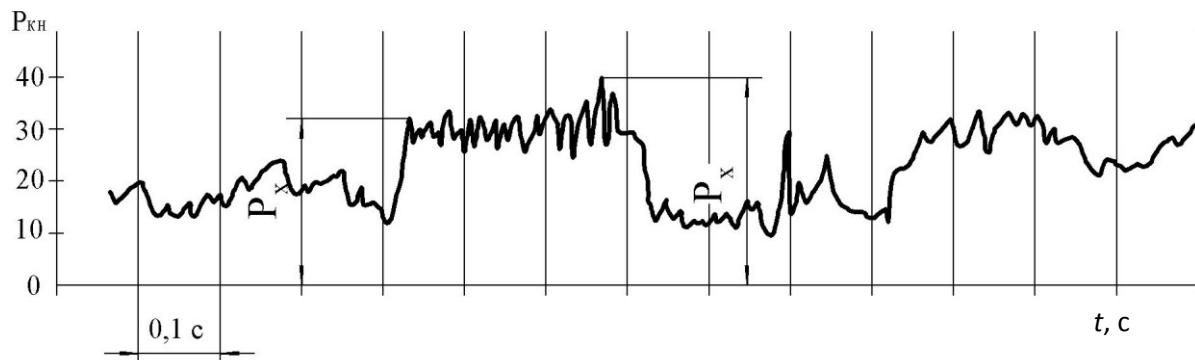


Рис. 3. Оциллограмма нагрузок, возникающих при разрезании включения в среде мерзлой глины резцом шириной 18 мм

Аналитические исследования процесса разработки мерзлых грунтов и результаты их экспериментальных исследований позволяют сформировать уравнения состояния и уравнения связи, составляющие математическую модель системы стабилизации давления гидропривода роторного траншейного экскаватора.

Уравнения состояния:

$$\frac{dP_H}{dt} = q_H \cdot A_1 - \omega_{ГМ} \cdot A_2 - Q_{ПК}(x_{ПК}) \cdot A_3 + Q_{ОК}(x_{ОК}) \cdot A_3 - P_H \cdot A_4;$$

$$\frac{d X_{ПК}}{d\tau} = A_9 \int_0^t (P_H - P_{НП}) - A_{10} \int_0^t \frac{Q_{i\epsilon}^2}{\delta_{i\epsilon}} - A_{11} \cdot X_{ПК} - A_{12} \int_0^t X_{ПК};$$

$$\frac{d\omega_{ГМ}}{dt} = A_{13} \cdot (P_H - P_C) - A_{14} \cdot \omega_{ai} - A_{15} \cdot (P_H - P_C) - A_{30} - A_{16} \cdot \int_0^t \omega_{ai}(t) - A_{17} \cdot \int_0^t \omega_{di}(t);$$

$$\frac{d\omega_{po}}{d\tau} = A_{18} \cdot \int_0^t \omega_{ai}(t) - A_{19} \cdot \int_0^t \omega_{di}(t) - (M_1(\kappa_T) \cdot A_{20} + A_{21} \cdot M_2(h) + A_{21} \cdot M_3(V)).$$

Уравнения связи.

Расход гидравлической жидкости через клапан обратный, зависящий от давления рабочей жидкости  $P_H$  и давления насоса подпитки  $P_{НП}$  (const)

$$Q_{ОК} = B \cdot x_{ОК} \cdot \sqrt{(P_{НП} - P_H)}.$$

Расход гидравлической жидкости через клапан предохранительный, зависящий от давления рабочей жидкости  $P_H$  и давления настройки клапана предохранительного  $P_{ПК}$  (const)

$$Q_{ПК} = A \cdot x_{ПК} \cdot \sqrt{(P_H - P_{ПК})}.$$

Результатом обобщения экспериментальных данных стали зависимости коэффициента прочности  $K_{ГР}$  от основных физико-механических ха-

рактических мерзлого грунта, полученных с использованием методики [3]. Следует отметить, что зависимости даны в двух вариантах: от числа ударов  $C$  и температуры грунта, что позволяет произвести пересчет  $K_{ГР}$  при появлении новых методов оценки состояния грунта.

Для однородных грунтов данная зависимость имеет следующий вид:  

$$K_{ГР} = 3,324(1,038 - 0,0227C + 0,00015C^2) (-0,436 + 1,157H - 0,146H^2) \times$$

$$\times (1,975 - 0,159J_p + 0,00412 J_p^2); \quad (7)$$

$$K_{ГР} = 3,206(0,202 + 0,210t + 0,002t^2) (-0,509 + 1,258H - 0,1380H^2) \times$$

$$\times (1,026 + 0,0181\omega - 0,00082\omega^2) (1,615 - 0,115J_p + 0,00345 J_p^2) \quad (8)$$

при  $C \geq 75$ ;  $0,4 \leq H \leq 4,5$  м.

Для грунтов с гравийно-галечниковыми включениями:  

$$K_{ГР} = 5,841 (11,922 - 0,310C + 0,00203C^2) (-0,912 + 3,106H - 0,405H^2) \times$$

$$\times (0,264 + 0,0375\xi_1 + 0,00044 \xi_1^2) (0,696 + 0,0828\xi_2 - 0,00388 \xi_2^2) \times$$

$$\times (0,687 + 0,199\xi_3 - 0,0943 \xi_3^2) (1,158 + 0,0987J_p - 0,0184 J_p^2) \quad (9)$$

при  $0,5 \leq H \leq 2,5$  м;  $9 \leq \xi_1 \leq 30$  %;  $0 \leq \xi_2 \leq 18$  %;  $0 \leq \xi_3 \leq 6$  %;  $C \geq 75$ .  

$$K_{ГР} = 5,836 (0,354 + 0,240t + 0,0385t^2) (1,005 - 0,00448H + 0,00097H^2) \times$$

$$\times (0,741 - 0,0332\xi_1 + 0,00265 \xi_1^2) (0,685 + 0,0609\xi_2 - 0,00210 \xi_2^2) \times$$

$$\times (0,638 + 0,172\xi_3 - 0,00627 \xi_3^2) (1,090 + 0,199J_p - 0,0301 J_p^2) \quad (10)$$

при  $t \leq -3$  °С,  
 где  $C$  – число ударов плотномера ДорНИИ;  $H$  – глубина промерзания, м;  $J_p$  – число практичности;  $t$  – отрицательная температура грунта, °С;  $\omega$  – влажность грунта, %;  $\xi_1$  – процентное содержание гравийно-галечниковых включений размером от 10 до 30 мм;  $\xi_2$  – то же, от 30 до 70 мм;  $\xi_3$  – то же, свыше 70 мм.

Таким образом, уровень пульсации давления в напорной магистрали, с одной стороны, является косвенным показателем качества стабилизации параметров привода рабочего органа, с другой стороны является откликом системы привода и управления на действующую на рабочий орган нагрузку со стороны разрабатываемой среды. Достижение показателя качества стабилизации параметров привода рабочего органа позволяет перейти к следующему по своему уровню показателю – надежности системы, оцениваемой величиной выносливости каждого из элементов привода и системы гидропривода в целом. Реализация поставленной задачи позволяет определить оптимальный закон изменения рабочего объема гидромотора привода рабочего органа в функции давления (действующей нагрузки) обеспечивающий требуемую выносливость по усталостным напряжениям элементов привода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баловнев, В. И. Моделирование процесса взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В. И. Баловнев. – М. : Высш. шк., 1981. – 335 с.
2. Недорезов, И. А. О грунтовых условиях эксплуатации машин при разработке мерзлых грунтов Сибири / И. А. Недорезов // Строительные и дорожные машины. – 1978. – № 1. – С. 4.
3. Васильев, С. И. Повышение эффективности разработки сезонномерзлых грунтов / С. И. Васильев // Вестн. ТГАСУ. – 2010. – № 1. – С. 194–201.
4. Недорезов, И. А. Прогнозирование трудности разработки грунтов землеройными машинами / И. А. Недорезов // Строительные и дорожные машины. – 2008. – № 4. – С. 43–44.