

## Расчетная модель нагрузки при взаимодействии профильной фрезы с руслом ремонтируемого мелиоративного канала

Добрынин Ю.А.<sup>1</sup>

Санкт-Петербургская лесотехническая академия

Рассматривается процесс функционирования профильной фрезы при ремонте мелиоративных каналов. Моделирование взаимодействия с грунтом одного ножа фрезы распространяется на другие ножи с учетом особенностей их установки на элементах конструкции фрезы. Полученные аналитические выражения позволяют определить момент сопротивления при работе фрезы и потребные энергозатраты.

**Ключевые слова:** профильная фреза, мелиоративный канал, гидролесомелиоративные машины, энергоёмкость, мощность, резание.

При проведении работ по технической эксплуатации лесосушительных систем предусматривается применение высокопроизводительных машин [1,2], оснащенных рабочим органом типа профильная фреза (копирующая фреза, объемная фреза конусообразной формы). Это позволяет обеспечить высокое качество ремонта мелиоративных каналов с разработкой древесных включений в грунте, равномерный выброс выработанного грунта на берме и за ее пределами, низкое тяговое сопротивление базового трактора, сопровождающееся шадящим взаимодействием гусеничного движителя с эксплуатационным проездом (лесной дорогой), что особенно необходимо при работе на грунтах с низкой несущей способностью, типичных для объектов гидролесомелиорации.

Возможность обработки ремонтируемого канала по всему профилю обуславливает повышенную энергоёмкость технологического процесса его ремонта. В этой связи весьма актуальной для решения является задача разработки математической модели энергоёмкости процесса ремонта канала профильной фрезой, которая позволит определять потребную приводную мощность, параметры рабочего органа и его привода на стадии проектирования гидролесомелиоративной машины.

Обеспечение процесса функционирования профильной фрезы на ремонте мелиоративного канала непосредственно зависит от работы каждого установленного на ней режущего элемента. Потребные энергозатраты суммируются из сопротивлений резанию грунта (отделение стружки от массива), подъема стружки на режущем элементе (ноже) до момента отрыва, когда начинается процесс метания, и разгона

из состояния покоя до скорости метания. Сопротивление резанию  $P_r$  сопровождается сдвигом полосы грунта с сечением, равным передней кромке ножа, и трением режущей кромки по грунту:

$$P_r = k S_r, \quad k = \frac{1 + f \psi_0}{(1 - f_r)} \sigma, \quad (1)$$

где

$S_r$  - площадь сечения кромки ножа фрезы;

$f$  - коэффициент трения ножа по грунту;

$\psi_0$  - доля нормальной реакции от касательной

( $\psi_0 = N/P = 0.3 \dots 0.6$ );

$\sigma$  - удельное сопротивление грунта при сдвиге;

$f_r$  - коэффициент трения грунта по грунту.

Конечная  $A_r$  и элементарная  $\delta A_r$  работы от силы резания, направленной по касательной к траектории ножа, будут определены выражениями:

$$A_r = -P_r S = -k S_r r \varphi, \quad \delta A_r = -k S_r r d\varphi, \quad \varphi \leq \varphi_m \quad (2)$$

где

$r$  - радиус установки ножа на фрезе;

$\varphi$  - угол поворота ножа;

$\varphi_m$  - угол контакта ножа с грунтом.

Аналогично вычисляется конечная и элементарная работа сил сдвига и трения стружки, направленных по нормали к сечению передней кромки ножа:

$$P_n = k S_n, \quad S_n = \delta r \varphi = S_0 \sin \varphi \cdot (r \varphi); \\ A_n = -P_n S = -k S_0 r^2 \varphi^2 \sin \varphi; \quad \varphi \leq \varphi_m; \quad (3) \\ \delta A_n = -k S_0 r^2 (2 \varphi \sin \varphi + \varphi^2 \cos \varphi) d\varphi,$$

где

$\delta$  - радиальная длина стружки;

$S_0$  - шаг фрезы.

Сила трения  $N$  при движении стружки по ножу непосредственно зависит от силы тяжести стружки, определяемой по реакции:

$N = m_\varphi g \cos \gamma_0$  ( $\gamma_0$  - угол наклона образующей конуса фрезы к горизонтالي,  $\gamma_0 = 50 \dots 70^\circ$ ) и центробежной силы инерции  $\Phi_u = m_\varphi \omega^2 r$

$$F_r = f (N + \Phi_u) = f (g \cos \gamma_0 + \omega^2 r) \rho k_i b r S_0 (1 - \cos \varphi), \quad (4)$$

где  $k_i$  - доля выбрасываемой стружки грунта массой

$m_\varphi = k_i \rho V_\varphi = k_i \rho b r S_0 (1 - \cos \varphi)$ , на высоту

$h_\varphi = r_i (1 - \cos \varphi) \cos \gamma_0$ ,

Здесь  $\rho$  - плотность грунта;

$b$  - ширина ножа по передней кромке;

$V_\varphi$  - объем стружки грунта.

Конечная и элементарная работа этой силы на перемещении  $S = r \varphi$ ,  $dS = r d\varphi$ ,  $\varphi \leq \varphi_m$  определится следующим образом:

$$A_r = -F_r S = -f (g \cos \gamma_0 + \omega^2 r) \rho k_i b r^2 S_0 (1 - \cos \varphi) \varphi, \\ \delta A_r = -f (g \cos \gamma_0 + \omega^2 r) \rho k_i b r^2 S_0 (1 + \varphi \sin \varphi - \cos \varphi) d\varphi, \quad (5)$$

<sup>1</sup> Автор - профессор, зав. кафедрой теоретической механики

© Ю.А.Добрынин, 1996

Потенциальная энергия подъема срезанной стружки грунта до момента метания определится как работа ее силы тяжести.

$$A_G = -\Pi = -m_\phi g h_\phi = -k_i \rho b r^2 S_o g \cos \gamma_o (1 - \cos \phi)^2, \\ \delta \Pi = -\delta A_G = -2 k_i \rho b r^2 S_o g \cos \gamma_o (1 - \cos \phi) \sin \phi d\phi, \\ \phi \leq \phi_m. \quad (6)$$

Работа разгона стружки грунта массой  $m_\phi$  от нуля до начальной скорости метания  $v = \phi r = \omega r$  определяется по кинетической энергии

$$T = A_v = 0,5 m_\phi \omega^2 r^2 = 0,5 k_i \rho b r^3 S_o \phi^2 (1 - \cos \phi), \quad (7)$$

Обобщенную инерционную силу вычислим по определению Лагранжа [3]:

$$Q_\phi^\phi = \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} - \frac{\partial T}{\partial \phi} \cong -0,5 k_i \rho b r^3 S_o \phi^2 \sin \phi, \quad (8)$$

а по ней потребную мощность

$$N_\phi^\phi = Q_\phi^\phi \omega = -0,5 k_i \rho b r^3 S_o \omega^3 \sin \phi, \quad \phi \leq \phi_m. \quad (9)$$

Обобщенные силы рассмотренных активных и потенциальных сил вычислим из баланса виртуальных работ [3]:

$$Q_\phi^i = \delta A_\phi^i / \delta \phi, \quad (10)$$

по которым затем определяется мощность

$$N_\phi^i = Q_\phi^i \omega. \quad (11)$$

Так, обобщенную силу, а затем и мощность, необходимую для подъема стружки грунта до начала процесса метания, определим из потенциальной энергии (6):

$$Q_\phi^\Pi = \frac{\partial \Pi}{\partial \phi} = -2 k_i \rho b r^2 S_o g \cos \gamma_o (1 - \cos \phi) \sin \phi, \quad (12)$$

$$N_\phi^\Pi = Q_\phi^\Pi \cdot \omega, \quad \phi \leq \phi_m, \quad \phi \approx \omega t.$$

Имея в виду элементарные работы активных сил (2),(3),(5), запишем обобщенную активную силу, исходя из (10)

$$Q_\phi^a = -[k r S_t + k r^2 S_o (2\phi \sin \phi + \phi^2 \cos \phi) + \dots \\ + f (g \cos \gamma_o + \omega^2 r) \rho k_i b r^2 S_o (1 + \phi \sin \phi - \cos \phi)] \quad (13)$$

и определим соответствующую ей мощность

$$N_\phi^a = Q_\phi^a \cdot \omega.$$

Полученные выражения (9),(12),(13) раскрывают влияние конструктивных и кинематических параметров профильной фрезы на величину приводной мощности. Так, мощность, необходимая для отделения стружки грунта от массива и для ее разгона до начала процесса метания, пропорциональна кубу окружной скорости ножа, а мощность, затрачиваемая на подъем стружки грунта, пропорциональна угловой скорости вращения фрезы и квадрату радиуса установки ножа на фрезу. Отсюда следует, что для снижения энергоемкости процесса ремонта мелиоративных каналов профильной фрезой следует уменьшать угловую скорость фрезы до минимальных значений, способных обеспечивать выполнение технологического процесса и устанавливать рациональную геометрическую форму фрезы. Этого можно достичь пассивным управлением параметрами фрезерного рабочего органа на стадии проектирования и активным управлением режимами фрезерования при проведении ремонтно-эксплуатационных работ на лесосушительных системах. Для малых углов поворота фрезы  $\phi \leq \pi/6$ , когда  $\sin \phi \approx \phi$ ,  $\cos \phi \approx 1$ , для ножей, расположенных на ребрах фрезы, выражение (13) примет вид

$$Q_\phi^a \approx -[k r S_t + r^2 S_o (3k + f W_o \rho k_i b) \phi^2],$$

$$W_o = g \cos \gamma_o + \omega^2 r \quad (14)$$

Обобщенные силы (8),(12),(14) для ножей, расположенных на одном ребре фрезы, отличаются радиусами установки. Вводя максимальный радиус установки резцов  $R$ , удаление  $l_i$   $i$ -го резца на  $j$ -ом ребре от максимальной окружности и угол раствора фрезы  $\gamma$ , получим

$$r_{ij} = R - l_{ij} \cos \gamma. \quad (15)$$

В результате обобщенные силы, приложенные к ножам, установленным на одном ребре профильной фрезы, составят:

$$Q_p^\phi = \sum_{i=1}^6 Q_{\phi,i}^\phi = 0,5 \rho S_o \phi^2 [k_B b \sum_{i=1}^6 r_i^3 \phi + k_T a_T r_T^3 \sin \gamma]; \\ Q_p^\Pi = \sum_{i=1}^6 Q_{\phi,i}^\Pi = -4 \rho S_o g \cos \gamma_o k_T a_T r_T^2 \sin^2 \gamma / 2 \sin \phi;$$



$$Q_p^a = \sum_{i=1}^6 Q_{\phi,i}^a = -k \sum_{i=1}^5 r_i S_r - k_{\Sigma} S_o \sum_{i=1}^5 r_i^2 \varphi - \dots \quad (16)$$

$$\dots - k r_{\tau} S_r - k r_{\tau}^2 S_o (2\varphi \sin \gamma + \varphi^2 \cos \varphi) - \dots$$

$$\dots - f W_o \rho k_{\tau} a_{\tau} r_{\tau}^2 S_o (1 + \varphi \sin \varphi - \cos \varphi),$$

где

$k_b$  - коэффициент выносной способности ножей, установленных на ребрах профильной фрезы ( $k_b = 0,6 \dots 0,9$ );

$k_n$  - коэффициент выносной способности ножей, установленных на торцевой части фрезы и обрабатывающих противоположный откос канала ( $k_n = 0,4 \dots 0,7$ );

$a_{\tau}$  - глубина фрезерования ножами, установленными на торцевой части фрезы;

$$k_{\Sigma} = 3k + f W_o \rho k_b b; \quad 0 < \varphi_m \leq \pi/6;$$

$$0 < \varphi_m \leq \pi - \text{ для торцевой части фрезы.}$$

Рассмотренные обобщенные силы в процессе обработки однородного грунта приблизительно одинаковы по модулю для всех ребер, но смещены относительно первого ребра на угол  $\alpha_j = j \alpha = j \pi/3$ . Суммирование этих сил со сдвигом фаз по формуле

$$Q_i = \sum_{j=1}^5 Q_p^1 = \sum_{j=1}^5 Q_p(\varphi - j \alpha), \quad \varphi = \omega t, \quad \alpha = \pi/3 \quad (17)$$

приводит к периодическим функциям для обобщенных сил, которые можно разложить в ряд Фурье аналитически или провести графическое сложение, учитывая гармоники со значимыми амплитудами. Применяя эти методы суммирования, периодические функции обобщенных сил процесса взаимодействия фрезы с ремонтируемым руслом мелиоративного канала примут конкретный вид:

$$Q_{\phi} = -0,5 \rho S_o \omega^2 [0,1 k_b b \sum_{i=1}^5 r_i^3 \varphi_m^5 (2,5 - \pi \cos 6 \omega t - \dots - 2 \sin 6 \omega t) + 0,1 k_{\tau} a_{\tau} r_{\tau}^3 \varphi_m^7 (2,5 - \pi \cos 6 \omega t - \dots - 2 \sin 6 \omega t)];$$

$$Q_{\phi} = -2 \rho S_o g \cos \gamma_o k_{\tau} a_{\tau} r_{\tau}^2 (2 - 0,01 \cos 6 \omega t); \quad (18)$$

$$Q_a = -k \sum_{i=1}^5 r_i S_r (0,5 - 2/\pi \cos 6 \omega t) - 0,1 k_{\Sigma} S_o \sum_{i=1}^5 r_i^2 (\varphi_m^5)^2 \dots$$

$$\dots (1,7 - \pi \cos 6 \omega t - 2 \sin 6 \omega t) - k r_{\tau} S_r (0,5 + 2/\pi \cos 6 \omega t) + \dots$$

$$\dots 0,5 k S_o r_{\tau}^2 \cos 6 \omega t - f W_o \rho k_{\tau} a_{\tau} r_{\tau} S_o (6 + 0,65 \cos 6 \omega t),$$

а приводная мощность профильной фрезы

$$N_{\phi} = Q_{\phi} \omega \eta_{\phi}, \quad Q_{\phi} = Q_{\phi} + Q_n + Q_a \quad (19)$$

где

$Q_{\phi}$  - обобщенная сила, соответствующая обобщенной координате  $\varphi$ , или суммарный момент сопротивления фрезы;

$\eta_{\phi}$  - коэффициент полезного действия силовой передачи от двигателя базового трактора к фрезе.

На рис. 1 представлены графики изменения обобщенных сил в процессе функционирования профильной фрезы, построенные по зависимостям (18). Приводная мощность, вычисленная по формуле (19) для рабочего органа гидроресомелиоративной машины КЛН - 1,2 при этом изменяется в широком диапазоне от 26 до 81 кВт. Учитывая то обстоятельство, что мощность двигателя базового трактора семейства "Онежец" составляет 73 кВт, становится очевидным, что в тяжелых грунтовых условиях (суглинков) для обеспечения процесса ремонта канала потребуются активное управление рабочим процессом, направленное на уменьшение глубины фрезерования. Адекватность математической модели энергоемкости процесса ремонта (фрезерования) русла осушительного канала профильной фрезой каналоочистительной машины КЛН-1,2 проверена экспериментальным путем в производственных условиях. Так, значение приводной мощности, вычисленное по формуле (19) при  $\rho = 0,8 \text{ г/см}^3$  и  $k = 3 \text{ Н/см}^2$ , составило 32 кВт, а по данным эксперимента - 28 кВт (расхождение данных составляет 14%).

Исходя из анализа зависимостей для обобщенных сил в процессе ремонта канала профильной фрезой (18) и характера их изменения (рисунок), суммарную обобщенную силу (момент сопротивления фрезы) с достаточной для практических расчетов точностью можно представить в виде упрощенного выражения

$$Q_{\phi}(t) = -Q_o + Q \cos Z_p \omega t, \quad (20)$$

$Q_o$  - среднее значение обобщенной силы, соответствующее крутильно-приводному равновесию в трансмиссии привода рабочего органа;

$Q$  - амплитуда колебаний динамической нагрузки;

$Z_p$  - число ребер фрезы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные аналитические выражения (18), (20) представляют собой модели расчетных нагрузок. Они согласуются с данными экспериментальных исследований по энергоемкости процесса ремонта осушительных каналов, а использование их на стадии проектирования позволяет обоснованно подходить к выбору энергетических и конструктивных параметров гидроресомелиоративных машин, оснащенных активным рабочим органом типа профильная фреза.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Добрынин Ю.А. Повышение технического уровня и эффективности производства гидроресомелиоративных работ // Машины и орудия для механизации лесозаготовок и лесного хозяйства: Межвуз. сб. науч. тр. / ЛТА. Л., 1983. С. 46-50.

2. Добрынин Ю.А. Лесомелиоративные машины на базе тракторов повышенной проходимости // Актуальные проблемы осушения лесов на Среднем Урале: Информ.материалы к совещ. 2-4 авг.1989г. Свердловск,1989. С.86-89.

3. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. Т.2. М.: Наука, 1979. 544 с.

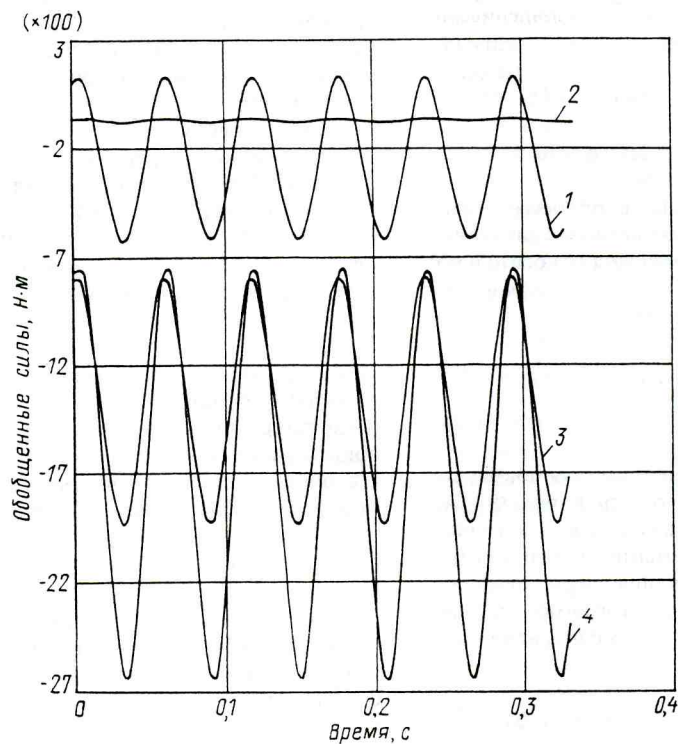


Рис. Изменение обобщенных сил в процессе фрезерования торфяного грунта профильной фрезой для плотности  $\rho=0.6 \text{ г/см}^3$  и удельного сопротивления резанию  $k=2 \text{ Н/см}^2$ : 1 - обобщенная сила разгона стружки грунта  $Q_f$ ; 2 - обобщенная сила, затрачиваемая на подъем стружки  $Q_n$ ; 3 - результирующая обобщенная сила активных сил  $Q_a$ ; 4 - суммарная обобщенная сила (суммарный момент сопротивления фрезы)  $Q_0$ .