

$$\begin{aligned}
 P_{K1} = & \left(1 + \operatorname{ctg} \alpha_p \cdot \operatorname{tg} \delta\right) \cdot A_1 \cdot B \cdot h \left[\frac{\gamma \cdot g \cdot h}{2} + C_w \cdot \operatorname{ctg} \rho \cdot \left(1 - \frac{1}{A_1}\right) + \right. \\
 & \left. + \frac{\sin \alpha_p}{K_\psi} \cdot A \cdot \frac{H^2}{h} \cdot K \cdot \arcsin \frac{1}{2 \cdot K} \cdot \left(1 + \operatorname{tg} \delta \cdot \arcsin \frac{1}{2 \cdot K}\right) + \gamma_p \cdot g \cdot H \right] + \\
 & \gamma_p \cdot g \cdot \cos^2 \rho \cdot \frac{B \cdot H^2}{2}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Исследования процессов были проведены в направлении снижения сопротивления передвижению грунта по отвалу.

Выводы:

На основе теории предельного состояния сыпучей среды со сцеплением сформированы математические модели для исследуемых рабочих органов по определению составляющих сопротивления копания: сопротивления резанию грунта, сопротивления подъему вырезаемого пласта по отвальной поверхности, сопротивления призме волочения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баймолдаев Т.А., Кабашев А.Р. Теоретические основы копания селевых грунтов цепным рабочим органом бульдозера. Строительные и дорожные машины. 2006.

УДК 621.8.78

Козбагаров Рустем Ашимович – к.т.н., доцент (Алматы, КазАТК)

Оразбаева Аяулым Нурсолтановна – соискатель (Алматы, КазАТК)

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАБОЧИХ ОРГАНОВ БУЛЬДОЗЕРА С ГРУНТАМИ ПРИ НАЛИЧИИ УПЛОТНЕННОГО ЯДРА

При выполнении технологических операций разработки, транспортирования, переработки различных материалов достижение поставленной цели осуществляется в результате воздействий рабочих органов. Известны различные способы разрушения материальной среды, например, для грунтов: механический (силовое воздействие инструмента); гидравлический (разрыв струей воды или всасывание со дна водоема вместе с водой); взрывной (разрушение давлением газов при воспламенении взрывчатых веществ); физический (воздействие ультразвука, тока высокой частоты, температуры); химический (перевод грунта в жидкое или газообразное состояние); комбинированный (сочетание взрывного или физического с механическим, электрогидравлический, пневматический, термомеханический). На грунт может воздействовать твердое тело (рабочий орган), жидкость или газ при статическом, динамическом (ударном), вибрационном или физико-механическом воздействии. Таким образом, воздействие инструмента на обрабатываемую среду может осуществляться непосредственно рабочим органом, а также через рабочее тело (вода, газ) или физическое поле, т.е. опосредованно. Наиболее распространено непосредственное воздействие рабочего органа на обрабатываемую среду.

Математическая модель активного взаимодействия может быть получена на основе рассмотрения двух возможных перемещений или воздействий элементов

рабочих органов на материал: касательного и нормального к поверхности липкой породы. В зависимости от угла воздействия или заострения рабочего органа схема может быть двух видов, которые отличаются наличием или отсутствием уплотненного ядра, дополняющего рабочий орган.

Влияние скорости перемещения для любой схемы взаимодействия на возникающие сопротивления проявляется по поверхностям скольжения и рабочего органа бульдозера. Этот показатель учитывают так же, как и при пассивном взаимодействии, коэффициентом влияния скорости /1,2/.

Для модели активного взаимодействия может быть принят за основу метод поэлементного расчета сопротивлений /3,4/. При этом необходимо принять следующие допущения: призмы материала, ограниченные плоскостями скольжения, при взаимодействии не подвергаются уплотнению, а являются как бы «затвердевшими телами»; плоскости скольжения имеют прямую форму и выходят на свободную поверхность под углом, равным $\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$, где φ - угол внутреннего трения липкой породы.

Рассмотрим схему (см. рисунок 1) активного взаимодействия при касательном перемещении рабочего органа и угле его наклона $\alpha \geq \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$, т. е. когда образуется уплотненное ядро.

Аналогичным образом может быть разработана модель взаимодействия и определены сопротивления при воздействии рабочего органа бульдозера под углом $\alpha \geq \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$, т. е. когда образуется уплотненное ядро. Этот случай является общим, поэтому введем также в рассматриваемую схему давление призмы волочения на разрабатываемый материал. Расчетная схема дополняется еще одной призмой, которую образует уплотненное ядро, и распределенной нагрузкой. Сопротивление может быть найдено при решении системы уравнений, составленной из условия равновесия призм материала, ограниченных плоскостями скольжения.

Из условия равновесия уплотненного ядра

$$\begin{aligned} \sum x &= N_1 \sin \alpha + (N_1 \operatorname{tg} \rho + \operatorname{tg} \rho K_{v_1} p_1 S_1) \cos \alpha - N_2 \operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi K_{v_2} p_2 S_2 - N_3 \sin \varepsilon - \\ &- (N_3 \operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi K_{v_2} p_2 S_3) \cos \varepsilon = 0; \\ \sum y &= N_3 \cos \alpha - (N_1 \operatorname{tg} \rho + \operatorname{tg} \rho K_{v_1} p_1 S_1) \sin \alpha + N_2 - N_3 \cos \varepsilon + (N_3 \operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi K_{v_2} p_2 S_3) \sin \varepsilon - G = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Приведем подобные члены уравнений и перенесем члены, не содержащие неизвестных сил, в правую часть

$$\begin{aligned} N_1 (\sin \alpha + \operatorname{tg} \rho \cos \alpha) - N_2 \operatorname{tg} \varphi - N_3 (\sin \varepsilon + \operatorname{tg} \varphi \cos \varepsilon) &= -\operatorname{tg} \rho K_{v_1} p_1 S_1 \cos \alpha + \operatorname{tg} \varphi K_{v_2} p_2 S_2 + \\ &+ \operatorname{tg} \varphi K_{v_2} p_2 S_3 \cos \varepsilon; \\ N_1 (\cos \alpha - \operatorname{tg} \rho \sin \alpha) + N_2 - N_3 (\cos \varepsilon - \operatorname{tg} \varphi \sin \varepsilon) &= \operatorname{tg} \rho K_{v_1} p_1 S_1 \sin \alpha - \operatorname{tg} \rho K_{v_1} p_1 S_1 \sin \alpha - \\ &- \operatorname{tg} \varphi K_{v_2} p_2 S_2 \sin \varepsilon = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

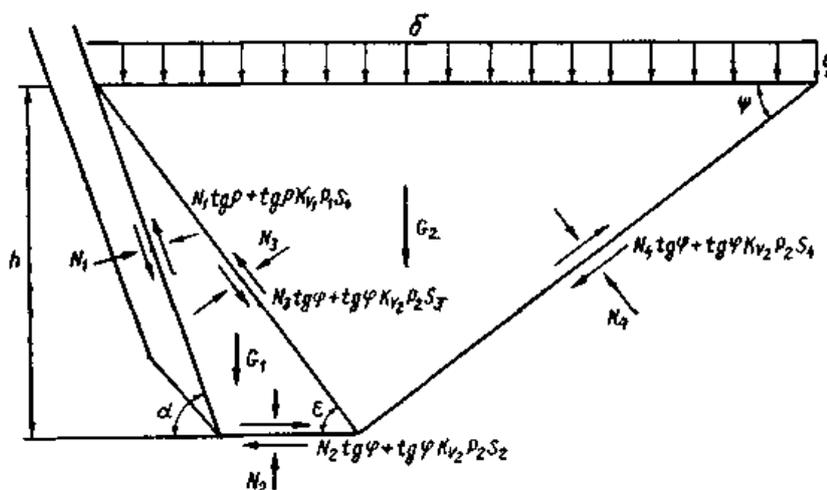


Рисунок 1 – Физическая модель активного взаимодействия при наличии уплотненного ядра

Или, произведя тригонометрические преобразования, находим:

$$N_1 \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos \rho} - N_2 \operatorname{tg} \varphi - N_3 \frac{\sin(\varepsilon + \varphi)}{\cos \varphi} = -\operatorname{tg} \rho K_{v_1} p_1 S_1 \cos \alpha + \operatorname{tg} \varphi K_{v_2} p_2 (S_2 + S_3 \cos \varepsilon);$$

$$N_1 \frac{\cos(\alpha + \rho)}{\cos \rho} + N_2 - N_3 \frac{\cos(\varepsilon + \varphi)}{\cos \varphi} = \operatorname{tg} \rho K_{v_1} p_1 S_1 \sin \alpha - \operatorname{tg} \varphi K_{v_2} p_2 S_3 \sin \varepsilon + G. \quad (3)$$

Из условия равновесия призмы, ограниченной плоскостями скольжения внутри материала:

$$\sum x = N_3 \sin \varepsilon + (\operatorname{tg} \varphi K_{v_2} p_2 S_3 + N_3 \operatorname{tg} \varphi) \cos \varepsilon - N_4 \sin \psi - (N_4 \operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi K_{v_2} p_2 S_4) \cos \psi = 0;$$

$$\sum y = N_3 \cos \varepsilon - (N_3 \operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi K_{v_2} p_2 S_3) \sin \varepsilon + N_4 \cos \psi - (N_4 \operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi K_{v_2} p_2 S_4) \sin \psi - G - q S_5 = 0. \quad (4)$$

Или

$$N_3 \frac{\sin(\varepsilon + \varphi)}{\cos \varphi} - N_4 \frac{\sin(\psi + \varphi)}{\cos \varphi} = \operatorname{tg} \varphi K_{v_2} p_2 S_3 \cos \varepsilon + \operatorname{tg} \varphi K_{v_2} p_4 \cos \psi;$$

$$N_3 \frac{\cos(\varepsilon + \varphi)}{\cos \varphi} + N_4 \frac{\cos(\psi + \varphi)}{\cos \varphi} = \operatorname{tg} \varphi K_{v_2} p_2 S_3 \sin \varepsilon + \operatorname{tg} \varphi K_{v_2} p_2 S_4 \sin \psi + G_2 + q S_5. \quad (5)$$

Значения сил тяжести призм материала при толщине слоя h и ширине рабочего органа бульдозера b могут быть найдены следующим образом:

$$G_1 = \frac{1}{2} \gamma b h^2 (\operatorname{ctg} \varepsilon - \operatorname{ctg} \alpha) = \frac{1}{2} \gamma b h^2 \frac{\sin(\varepsilon - \alpha)}{\sin \varepsilon \sin \alpha}; \quad (6)$$

$$G_2 = \frac{1}{2} \gamma b h^2 (\operatorname{ctg} \varepsilon - \operatorname{ctg} \psi) = \frac{1}{2} \gamma b h^2 \frac{\sin(\psi + \varepsilon)}{\sin \psi \sin \varepsilon}; \quad (7)$$

$$\text{При } \psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \text{ и } \varepsilon = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}; \quad G_2 = \gamma b h^2 \frac{1}{\cos \varphi}. \quad (8)$$

Площади скольжения равны:

$$S_1 = \frac{bh}{\sin \alpha}; \quad (9)$$

$$S_2 = bh(ctg \varepsilon - ctg \alpha) = \frac{bh \sin(\alpha - \varepsilon)}{\sin \varepsilon \sin \alpha}; \quad (10)$$

$$S_3 = \frac{bh}{\sin \varepsilon}; \quad (11)$$

$$S_4 = \frac{bh}{\sin \psi}; \quad (12)$$

$$S_5 = bh(ctg \varepsilon + ctg \psi) = \frac{bh \sin(\varphi + \varepsilon)}{\sin \psi \sin \varepsilon} = \frac{2bh}{\cos \varphi}. \quad (13)$$

Сила N_3 может быть найдена из системы (5). Решаем ее методом исключения неизвестной N_4 . Для этой цели первое уравнение системы умножаем на $\cos(\psi + \varphi)$, а второе - на $\sin(\psi + \varphi)$ и почленно складываем:

$$N_3 [\sin(\varepsilon + \varphi) \cos(\psi + \varphi) \sin(\psi + \varphi)] = K_{v_2} p_2 [-S_3 (\cos \varepsilon \cos(\psi - \varphi) - \sin \varepsilon \sin(\psi + \varphi))] + S_4 [\cos \psi \cos(\psi + \varphi) + \sin(\psi + \varphi)] \sin \varphi + (G_2 + qS_5) \cdot \cos \varphi \sin(\psi + \varphi) \quad (14)$$

или

$$N_3 \sin(\varepsilon + \psi + 2\varphi) = K_{v_2} p_2 \sin \varphi [-S_3 \cos(\varepsilon + \psi + \varphi) + S_4 \cos \varphi + (G_2 + qS_5) \cdot \cos \varphi \cdot \sin(\psi + \varphi)]. \quad (15)$$

Подставляя значения S_3 , S_4 , S_5 и G_2 из выражений (11), (12), (13) и учитывая, что $\varepsilon = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$ и $\varphi = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$, получаем

$$N_3 = 2bh \left(K_{v_2} p_2 \frac{tg \varphi \cdot \sin(\varepsilon + \varphi)}{\cos 2\varphi} + \left(\frac{\gamma h}{2} + q \right) \frac{\sin(\psi + \varphi)}{\cos 2\varphi} \right). \quad (16)$$

Для определения силы N_1 решим систему (3). Исключим неизвестную N_2 . Для этого второе уравнение системы почленно умножим на $tg \varphi$ и сложим с первым:

$$N_1 \left(\frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos \rho} + \frac{\cos(\alpha + \rho)}{\cos \rho} tg \varphi \right) = N_3 \left(\frac{\sin(\varepsilon + \varphi)}{\cos \varphi} + \frac{\cos(\varepsilon + \varphi)}{\cos \varphi} tg \varphi \right) + tg \varphi K_{v_1} p_1 S_1 (\sin \alpha tg \varphi - \cos \alpha) + K_{v_2} p_2 tg \varphi (S_2 + S_3 \cos \varepsilon - S_3 \sin \varepsilon tg \varphi) + G_1 tg \varphi \quad (17)$$

или

$$N_1 = N_3 \frac{\sin(\varepsilon + 2\varphi) \cos \rho}{\sin(\alpha + \rho + \varphi) \cos \varphi} + K_{v_1} p_1 S_1 \frac{\sin \rho \cos(\alpha + \varphi)}{\sin(\alpha + \rho + \varphi)} + K_{v_2} p_2 \frac{tg \varphi \cos \rho [S_2 \cos \varphi + S_3 \cos(\alpha + \varphi)]}{\sin(\alpha + \rho + \varphi)} + G_1 \frac{\sin \varphi \cos \rho}{\sin(\alpha + \rho + \varphi)}. \quad (18)$$

Подставляя в правую часть (18) значение N_3 , S_1 , S_2 , S_3 и G_3 из выражений (16), (8) – (11), получаем

$$N_1 = bh \left(\frac{1}{2} \gamma h a_1^1 + K_{v_1} p_1 a_2^1 + K_{v_2} p_2 a_3^1 + q a_4^1 \right), \quad (19)$$

где

$$a_1^1 = \frac{\cos \rho}{\sin(\alpha + \rho + \varphi)} \left(\frac{2 \sin(\psi + \varphi) \sin(\varepsilon + 2\varphi)}{\cos \varphi \cos 2\varphi} + \frac{\sin(\varepsilon + \alpha) \sin \varphi}{\sin \varepsilon \sin \alpha} \right); \quad (20)$$

$$a_2^1 = \frac{\sin \rho \cos(\alpha + \varphi)}{\sin \alpha \sin(\alpha + \rho + \varphi)}; \quad a_4^1 = \frac{2 \sin(\psi + \varphi) \sin(\varepsilon + 2\varphi) \cos \rho}{\cos 2\varphi \cos \varphi \sin(\alpha + \rho + \varphi)}; \quad (21)$$

$$a_3^1 = \frac{\cos \rho \operatorname{tg} \varphi}{\sin(\alpha + \rho + \varphi)} \left(\frac{2 \sin(\psi + \varphi) \sin(\varepsilon + 2\varphi)}{\cos \varphi \cos 2\varphi} + \frac{\sin(\varepsilon + \alpha) \cos \varphi (\varepsilon - \varphi) \sin \alpha}{\sin \varepsilon \sin \alpha} \right). \quad (22)$$

Значение сопротивления по направлению перемещения может быть найдено суммированием проекций на него сил N_1 и $N_1 \operatorname{tg} \rho + \operatorname{tg} \rho K_{v_1} p_1 S_1$. Как и в предыдущей схеме, данное сопротивление находится по формуле

$$P_{01} = N_1 \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos \rho} + K_{v_1} p_1 S_1 \cos \alpha \operatorname{tg} \rho.$$

Подставляя значение N_1 и учитывая, что $S_1 = \frac{bh}{\sin \alpha}$ и $\varepsilon = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$, $\psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$, получаем

$$P_{01} = bh \left(\frac{\gamma h}{2} A_1 + K_{v_1} p_1 A_2 + K_{v_2} p_2 A_3 + q A_4 \right), \quad (23)$$

где

$$A_1 = \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\sin(\alpha + \rho + \varphi)} \left(\frac{2 \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{5\varphi}{2}\right)}{\cos \varphi \cos 2\varphi} - \frac{\sin \varphi \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \sin \alpha} \right); \quad (24)$$

$$A_2 = \frac{\sin \rho \sin \varphi}{\sin \alpha \sin(\alpha + \rho + \varphi)}; \quad (25)$$

$$A_3 = \frac{\sin(\alpha + \rho) \operatorname{tg} \varphi}{\sin(\alpha + \rho + \varphi)} \left(\frac{2 \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{5\varphi}{2}\right)}{\cos \varphi \cos 2\varphi} + \frac{\sin\left(\alpha - \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \sin \alpha} \right); \quad (26)$$

$$A_4 = \frac{2 \sin(\alpha + \rho) \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{5\varphi}{2}\right)}{\cos \varphi \cos 2\varphi}. \quad (27)$$

Коэффициенты рассчитываем в зависимости от соотношения α и φ по формулам, полученным по той или иной схеме. В результате можно найти коэффициенты с учетом наличия или отсутствия уплотненного ядра.

Выводы

Таким образом, процессы взаимодействия рабочих органов бульдозера с грунтами представляют собой совокупность или сочетание элементарных взаимодействий - активного (рабочего органа на среду) и пассивного (среды на рабочий

орган), каждое из которых может происходить при относительном перемещении или без такового. Коэффициенты определяем в зависимости от соотношения α и φ по формулам, полученным по схеме, который указаны выше. В результате можно найти коэффициенты с учетом наличия или отсутствия уплотненного ядра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин. М., 1981, 335 с.
2. Ветров Ю.А., Кархов А.А., Кондра А.С., Станевский В.П. Машины для земляных работ. Киев, Высшая школа, 1981, 383 с.
3. Заднепровский Р.П. Результаты снижения трения и прилипания влажных грунтов при разработке землеройными машинами // М., Строительные и дорожные машины, 1973, №5, с. 31-33.
4. Стогов В.Н., Плюхин Д.С., Ефимов Г.Н. Погрузочно-разгрузочные машины. М., Транспорт, 1977, 240 с.

УДК 621.438 и 504.3.054

**Кибарин Андрей Анатольевич – к.т.н., доцент (Алматы, АИЭС)
Касимов Арман Салемович – старший преподаватель (Алматы, АИЭС)
Ходанова Татьяна Викторовна – старший преподаватель (Алматы, АИЭС)**

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АГРЕГАТОВ ГТК-10 НА КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЯХ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА

Техническое состояние газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на компрессорных станциях (КС), установленных более 30 лет назад, несмотря на проводимые ремонты, далеко от лучших показателей. В процессе эксплуатации заметно снизились располагаемые мощности действующих агрегатов ГТК-10, в настоящее время они ниже паспортных на 2000-4000 кВт. Для многих ГПА достигнут предел по наработке, и их необходимо демонтировать, однако, они продолжают работать.

При испытаниях агрегатов ГТК-10-2 и ГТК-10-4 было проведено подробное сравнение результатов эксперимента с паспортными данными. Основным контролируемым параметром при испытаниях газотурбинных установок была температура газов перед турбиной высокого давления (ТВД), поэтому в большинстве графиков рассматривается влияние именно этой величины на характеристики ГПА. При приведении результатов испытаний к нормальным условиям, использовались требования нормативных документов.

Испытания на ГТК-10 проводились в диапазоне температур перед ТВД 600-770 °С.

На рисунке 1 представлена зависимость КПД агрегатов ГТК-10-4 от температуры газов на входе в турбину по паспортной характеристике и фактические КПД, полученные в результате испытаний на компрессорных станциях магистрального газопровода «Средняя Азия Центр». Как видно из рисунка 1 КПД многих газотурбинных установок значительно отличается от паспортной характеристики и составляет не более 20 % на режимах, близких к номинальному. Только для модернизированных ГПА КПД находится на уровне 26-28 %.