

## **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА КОПАНИЯ ГРУНТА КОВШАМИ ДРАГЛАЙНА ПОД ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ**

Копание грунтов рабочими органами землеройных машин в подводных условиях имеет свои особенности. Когда глубина резания грунтов под водой ковшом драглайна становится значительной (более 7 м), влияние гидростатического давления на процесс копания возрастает. Иными словами, увеличение гидростатического давления водной среды (глубина погружения рабочего органа) приводит к изменению формы стружкообразования. Ощутимой становится сила тяжести столба жидкости, действующая на поверхность массива грунта, в том числе в зоне взаимодействия грунта с рабочим органом. Создавшаяся от

гидростатического давления водной среды пригрузка препятствует выпиранию призмы грунта вверх, и стружка грунта начинает в виде ленты скользить по рабочей поверхности отвала, плотно прижимаясь к ней за счет действия гидростатического давления [1].

В соответствии с представленной расчетной схемой к поверхностям стружки грунта, рабочего органа и на массив грунта действует равномерно распределенная нагрузка – гидростатическое давление  $p$ . По мере движения отвала в зоне резания грунта развивается напряжение сжатия грунта перед отвалом. При достижении предель-

ного значения напряжения происходит сдвиг грунта по поверхности скольжения, которая принята в виде плоскости, расположенной под углом  $\psi$  к направлению движения режущей кромки отвала. Установлено, что угол скольжения при воздействии гидростатического давления несколько изменяется по сравнению с обычными (традиционными) условиями резания на воздухе:

$$\psi = \psi_{tr} - k \cdot p,$$

где  $\psi_{tr}$  – угол скольжения при традиционном, сухом резании;  $k$  – коэффициент, учитывающий изменение угла сдвига от действия гидростатического давления и грунтовых условий;  $p$  – гидростатическое давление водной среды.

Касательная составляющая сопротивления резанию грунта  $P_{рез}$  режущим элементом драглайна на базе формул, полученных в работе [2], и с учетом условия блокирования резания имеет вид

$$P_{рез} = H_L \cdot b \cdot p \cdot K_S \times \left( \frac{(\cos \alpha + tg \varphi \cdot \cos \xi \cdot \cos \psi) \cdot tg \delta}{\sin \alpha} \right) + b \cdot h \cdot ctg \psi \cdot \mu \times (p + C_o - p \cdot tg \psi) + \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \rho_x \cdot S_x \cdot v^2, \quad (1)$$

где  $H_L$  – высота подъема грунта;  $K_S$  – коэффициент смачивания поверхности передней грани режущей части драглайна, который характери-

зует степень совершенства рабочего органа (для идеального рабочего органа  $K_S \Rightarrow 0$ );  $h$  – глубина резания;  $b$  – ширина ножа;  $C_o$  – удельное сцепление грунта;  $\psi$  – угол скольжения грунта;  $\alpha$  – угол резания;  $\varphi$  – угол трения грунта по грунту;  $\delta$  – угол трения грунта об нож;  $\gamma$  – плотность грунта;  $\mu$  – коэффициент, зависящий от степени блокировки стружки при резании грунта ковшом драглайна;  $C_x$  – коэффициент гидродинамического сопротивления;  $\rho_c$  – плотность среды;  $S_x$  – проекция площади сечения ковша драглайна на плоскость, перпендикулярную направлению движения;  $v$  – скорость копания.

Из анализа схем взаимодействия драглайна с грунтом и зависимостей, описывающих процессы копания грунтов в подводной среде, вытекает, что одним из путей повышения эффективности копания грунта ковшом драглайна под гидростатическим давлением является использование водной среды для водяной смазки трущихся поверхностей между рабочими поверхностями рабочего органа и грунтовой стружки.

Схема взаимодействия модернизированного режущего элемента ковша драглайна с грунтом в подводной среде, когда гидростатическое давление водной среды значительное, представлена на рис. 1. Особенности предложенного режущего инструмента ковша драглайна являются максимальное снижение режущей части кромки ножа и обеспечение водной смазкой контакти-

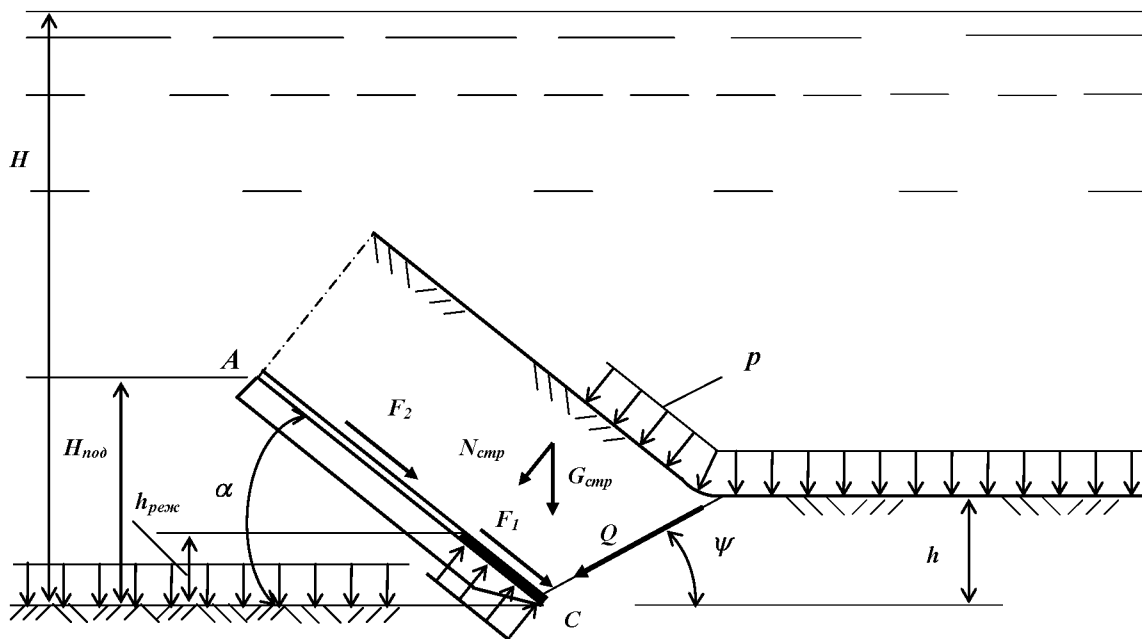


Рис. 1. Схема резания грунта ножом драглайна в подводных условиях (гидростатическое давление значительное,  $p > p_{кр}$ )

рующей поверхности между передней гранью режущего элемента ковша драглайна и грунтовой стружки.

Режущий инструмент ковша драглайна имеет у режущей кромки ножа прикрепленную к передней грани металлическую пластину, обеспечивающую рельефность рабочей грани ножа (рис. 1). Область резания грунтов режущим инструментом ковша драглайна, таким образом, состоит из двух зон. В зоне *I*, расположенной ближе к режущей кромке, определяемой размером по направлению движения грунтовой стружки  $l_1 = h_{\text{рез}} / \sin \alpha$ , резание грунтов происходит в условиях, когда на контактирующую поверхность водная среда не поступает. В зоне *II*, являющейся поверхностью подъема грунтовой стружки до уровня дна ковша драглайна и определяемой длиной  $l_2 = (H_{\text{под}} - h_{\text{рез}}) / \sin \alpha$ , резание грунтов происходит тогда, когда обеспечивается возможность проникания водной среды на контактирующую поверхность между рабочей гранью ножа и грунтовой стружкой с тыльной стороны ножа драглайна через отверстия, а также с боковых сторон ножа ковша драглайна.

Сопротивление перемещению грунтового пласта по передней грани ножа драглайна, определяемое трением грунтовой стружки о поверхность ножа ковша, можно представить как

$$F = F_1 + F_2,$$

где  $F_1, F_2$  – сопротивление трению грунта соответственно для зон *I* и *II*.

Как было оговорено, зона *I* расположена вблизи режущей кромки ножа драглайна и характеризуется резанием грунта при отсутствии проникания водной среды в зону разрушения. В зоне *II* процесс перемещения грунтовой стружки происходит при условиях обеспечения проникания водной среды (гидростатического давления) на контактирующую поверхность между грунтовым пластом и передней гранью ножа драглайна.

В соответствии с представленной расчетной схемой взаимодействие с грунтом рабочего органа сила трения в зоне *I* равно

$$F_1 = a \frac{1}{\cos \alpha} \cdot L \cdot p \cdot \text{tg} \delta,$$

в зоне *II* определяется

$$F_2 = L \cdot b \frac{1}{\cos \alpha} \cdot h_c \cdot \cos \alpha \cdot \gamma \cdot \text{tg} \delta = L \cdot b \cdot h_c \cdot \gamma \cdot \text{tg} \delta_1.$$

где  $L$  – ширина рабочего органа;  $a$  – горизонтальная проекция зоны режущей кромки рабочего

органа;  $b$  – горизонтальная проекция зоны контакта перфорированной поверхности с грунтом;  $h_c$  – толщина стружки;  $\alpha$  – угол резания;  $\gamma$  – плотность грунта;  $\delta_1$  – угол трения между грунтом и ножом при наличии водной смазки;  $p$  – гидростатическое давление;  $\delta$  – угол внешнего трения грунта.

Сила трения  $F$ , возникающая в процессе перемещения грунтового пласта по передней грани рабочего органа, нагружает в виде нормальной составляющей  $F \cdot \cos \xi$  поверхность скольжения грунта перед режущей кромкой. Принимаем за основу теории разрушения грунтов рабочими органами землеройных машин зависимость, полученную Кулоном и развитую Мором [3], согласно которой разрушение грунтов наступает в тот момент, когда касательные напряжения  $\tau$  достигают величины, определяемой выражением

$$\tau = C_0 + \sigma \cdot \text{tg} \varphi,$$

где  $C_0$  – удельное сопротивление сдвигу грунта;  $\sigma$  – нормальное напряжение, возникшее в поверхности скольжения грунта;  $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта.

Таким образом, касательная составляющая сопротивления копания грунтов ковшом драглайна, оснащенным перфорированной поверхностью, при воздействии гидростатического давления равна

$$P_t = \left[ c_0 \cdot L \cdot h \cdot \frac{1}{\cos \psi} + \left( b \cdot h_c \cdot \gamma \cdot \text{tg} \delta_1 + a \frac{1}{\cos \alpha} \cdot p \cdot \text{tg} \delta \right) L \cdot \cos \xi \cdot \text{tg} \varphi \right] \cos \psi,$$

где  $\xi$  – угол между плоскостью передней грани ножа и нормалью к поверхности скольжения грунта  $\xi = 180^\circ - (90^\circ + \alpha + \psi)$  или  $\xi = 90^\circ - (\alpha - \psi)$ .

Перемещение грунтовой стружки внутри ковша (рис. 2) сопровождается трением  $F_2$  грунтовой стружки о ковш, обусловленным действием силы тяжести грунтовой стружки  $G_{zp}$  и гидростатического давления  $p$ , распределенного на поверхности грунтового пласта. Сопротивление от трения рабочего органа о грунт  $P_{mp}$  может быть определено как

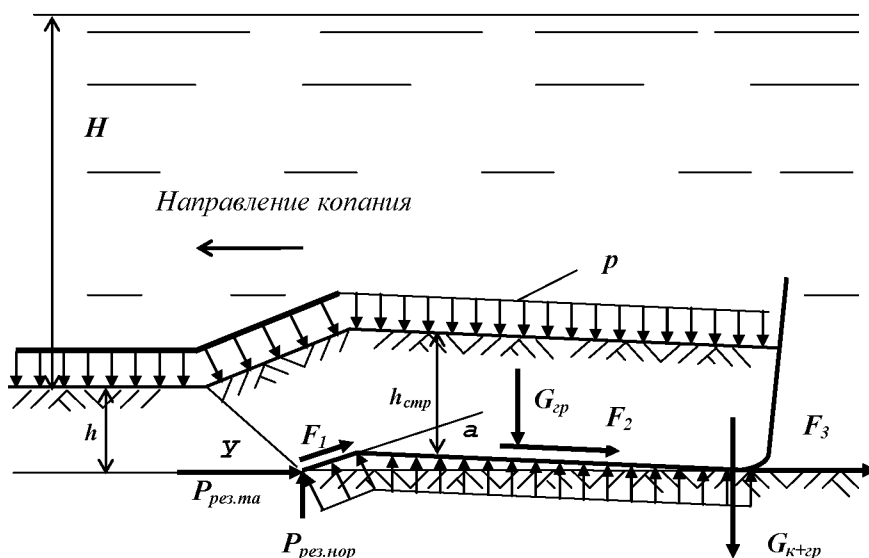
$$P_{mp} = (G_{zp} + p \cdot b \cdot L) \cdot \text{tg} \delta,$$

где  $G_{zp}$  – сила тяжести грунтовой стружки, находящейся внутри ковша:

$$G_{zp} = b \cdot L \cdot h_{мп} \cdot \gamma_{zp}.$$

Тогда

Рис. 2. Схема копания грунта ковшом драглайна в подводных условиях (гидростатическое давление значительное,  $p > p_{cp}$ )



$$P_{mp} = b \cdot L (h_{смп} \cdot \gamma_{сп} + p) \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (2)$$

где  $p$  – гидростатическое давление, действующее на поверхность грунтовой стружки;  $b$  и  $L$  – соответственно ширина и длина ковша драглайна;  $\operatorname{tg} \delta$  – коэффициент трения грунта по стали;  $\gamma_{сп}$  – объемный вес грунта.

Как видно из приведенных зависимостей сопротивления трению грунта о ковш, наиболее ощутимыми факторами при копании грунта ковшом драглайна в водной среде являются гидростатическое давление и коэффициент трения грунта по материалу ковша (по стали). В ходе экспериментальных исследований установлено существенное снижение сопротивления трению при обеспечении в конструкции ковша возможности поступления водной среды на контактирующую поверхность между ковшом и грунтовой стружкой.

На основе результатов исследований предложен модернизированный ковш, имеющий перфорированные поверхности, через отверстия которых может поступать водная среда с наружной стороны ковша на внутреннюю. По мере движения грунтовой стружки она увлекает собой водную среду. Таким образом, между поверхностью ковша драглайна и грунтовым пластом образуется водная прослойка, которая существенно снижает коэффициент трения между ними. При этом гидростатическое давление, действующее с наружной поверхности грунтового пласта, выравнивается действием гидростатического давления, действующего с тыльной его стороны.

Тогда сопротивление от трения ковша о грунт для модернизированного ковша, обеспечивающего водную «смазку» контактирующей поверхности в зоне перемещения грунтовой стружки по ковшу, математически может описано выражением

$$P_{mp} = b \cdot L \cdot h_{смп} \cdot \operatorname{tg} \delta_1,$$

где  $\operatorname{tg} \delta_1$  – коэффициент трения грунта о ковш драглайна при наличии водной «смазки».

При перемещении грунтовых пластов в полости ковша драглайна между ними возникает взаимодействие, осуществляющее дополнительное сопротивление наполнению ковша грунтом. Передний грунтовой пласт, перемещаясь вверх, оказывает пассивное давление на грунт в ковше и на задние грунтовые пласты. Одновременно грунтовые пласты, расположенные в тыльной части ковша драглайна, создают дополнительную пригрузку на передний пласт грунта. Поскольку грунтовые пласты в ковше при его заполнении находятся в разрыхленном состоянии, то водная среда оказывает на грунтовые пласты взвешивающее воздействие. Общее сопротивление наполнению ковша грунтом в подводной среде следует определять по зависимости

$$P_{нан} = b \cdot h_{смп} \cdot H_{ковш} \cdot (\gamma_{сп} - \gamma_в), \quad (3)$$

где  $b$  – ширина резания;  $h_{смп}$  – толщина стружки;  $H_{ковш}$  – высота наполнения ковша драглайна;  $\gamma_{сп}$  и  $\gamma_в$  – объемная масса соответственно грунта и водной среды.

Окончательно имеем математическую модель определения сопротивления копании грунта ковшом драглайна в подводных условиях как сумму

$P_{кон} = P_{рез} + P_{тр} + P_{нат}$  из приведенных зависимостей (1), (2) и (3):

$$P_{кон} = H_L \cdot b \cdot p \cdot K_S \cdot \left( \frac{(\cos \alpha + \operatorname{tg} \varphi \cdot \cos \xi \cdot \cos \psi) \cdot \operatorname{tg} \delta}{\sin \alpha} \right) +$$

$$+ b \cdot h \cdot \operatorname{ctg} \psi \cdot \mu \cdot (p + C_o - p \cdot \operatorname{tg} \psi) + \frac{1}{2} \cdot C_X \cdot \rho_X \cdot S_X \cdot v^2 +$$

$$+ b \cdot L (h_{стр} \cdot \gamma_{зр} + p) \cdot \operatorname{tg} \delta + b \cdot h_{стр} \cdot H_{кови} \cdot (\gamma_{зр} - \gamma_e).$$

Для определения сопротивления копанью грунта в подводных условиях модернизированным ковшом драглайна получена зависимость

$$P'_{рез} = \left[ C_0 \cdot L \cdot h \cdot \frac{1}{\cos \psi} + \left( b \cdot h_c \cdot \gamma_{зр} \cdot \operatorname{tg} \delta_1 + \right. \right.$$

$$\left. + \frac{1}{\cos \alpha} \cdot a \cdot p \cdot \operatorname{tg} \delta \right) \cdot L \cdot \cos \xi \cdot \operatorname{tg} \varphi \right] \cdot \cos \psi +$$

$$+ b \cdot L \cdot h_{стр} \cdot \operatorname{tg} \delta_1 + b \cdot h_{стр} \cdot H_{кови} \cdot (\gamma_{зр} - \gamma_e).$$

Из изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Разработаны математические модели, достаточно полно отражающие физическую сущность процессов копания грунтов ковшом драглайна с учетом влияния гидростатического давления водной среды.

2. Представленные материалы могут служить основой для расчета параметров рабочих органов

землеройных машин ковшового типа, работающих в подводной среде, в том числе при значительных глубинах разработки грунта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Недорезов И.А., Тургумбаев Ж.Ж. Исследование процесса резания грунтов под гидростатическим давлением // Строительные и дорожные машины. 1979. № 5. С. 8-9.
2. Недорезов И.А., Тургумбаев Ж.Ж. Моделирование процессов разрушения грунтов в особых условиях. Бишкек: Кыргызстан, 2000. 153 с.
3. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. М.: Машиностроение, 1968. 376 с.

#### Резюме

Судагы күштің қысымымен пайда болған жүктеме жер қабатын жоғары призма тәрізді жиналудан сақтайды және су астындағы жер қабатының жаңқалары лента түрінде ұңғының жоғарғы жұмыс беттеріне судағы күштің қысымымен қатты жабысып сырғанады.

#### Summary

It is possible to receive dependence resistance to cutting atrips by a knife sailing excavating machine in underwater conditions, when hydrostatic pressure appointed, according to the circuit submitted in figure 2.

УДК 621.878.11

Кыргызский государственный  
технический университет,  
г. Бишкек

Поступила 17.03.06г.