

Шепель Т.В., аспирант  
(ГВУЗ «НГУ»)

## МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОПАНИЮ ПЛАСТИЧНЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ

Шепель Т.В., аспирант  
(ДВНЗ «НГУ»)

## МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ КОПАНИЮ ПЛАСТИЧНИХ ВОДОНАСИЧЕНИХ ҐРУНТІВ

Shepel T.V., Doctoral Student  
(State HEE "National Mining University")

## MODEL FOR DETERMINING THE DIGGING FORCE AT EXCAVATION THE PLASTICITY WATERLOGGED SOILS

**Аннотация.** Статья направлена на разработку нового метода расчёта нагрузок на исполнительные органы ковшового типа при разработке пластичных водонасыщенных грунтов. Актуальность темы обусловлена необходимостью совершенствования методов прогнозирования рабочих нагрузок на исполнительные органы грунторазрабатывающих машин с учётом особенностей свойств разрабатываемой грунтовой среды в подводных условиях.

Предлагаемый метод расчёта основан на использовании реологической модели течения вязкопластической среды Бингама-Шведова. Результаты наблюдений процесса копания водонасыщенных грунтов позволили предложить модель заполнения ковша. Введены понятия состояния предельного заполнения ковша и предельных параметров заполнения. Разработана математическая модель для определения сопротивления заполнению ковша при копании пластичных водонасыщенных грунтов с учётом их реологических и физико-механических свойств. Предлагаемый метод расчёта позволяет повысить точность прогнозирования рабочих нагрузок на ковшовые исполнительные органы при разработке подводных месторождений полезных ископаемых.

**Ключевые слова:** подводная разработка, землеройная машина, копание, водонасыщенный грунт.

### Введение

Прогнозирование рабочих нагрузок на исполнительные органы землеройных машин, предназначенных для работы в особых условиях эксплуатации, позволяет значительно повысить эффективность их применения, а также сократить материальные и временные затраты на освоение новой техники.

К особым условиям эксплуатации можно отнести разработку грунтов под водой при проведении дноуглубительных работ, строительстве гидротехнических сооружений, прокладке коммуникаций, разработке подводных месторождений твёрдых полезных ископаемых. В последнем случае добычные работы могут производиться на глубинах в несколько тысяч метров (добыча железомарганцевых конкреций со дна Мирового океана, глубоководных органо-минеральных, металлоносных илов и т.д.).

Наличие водной среды оказывает значительное влияние на процесс копания грунта. Поэтому вопросы, связанные с определением нагрузок на исполнительные органы землеройных машин при разработке грунтов под водой требуют более детального рассмотрения.

### Анализ последних исследований

Определению нагрузок на исполнительные органы грунторазрабатывающих машин при подводной разработке грунтов посвящены работы многих исследователей.

Для определения усилия сопротивления копанью влажных грунтов, как правило, используют формулу Н.Г. Домбровского (рис. 1):

$$P_k = P_p + P_m + P_n,$$

где  $P_p$  – сопротивление грунта резанию;  
 $P_m$  – сопротивление трению рабочего органа о грунт;  
 $P_n$  – сопротивление перемещению призмы волочения и движению грунта в ковше.

Применительно к разработке подводных месторождений В.И. Баловнев предложил учитывать влияние гидростатического давления следующим образом [1]:

$$P_k = \frac{P_R}{P_{01}} (P_p + P_m + P_n),$$

где  $P_R/P_{01}$  – соотношение силы копания под гидростатическим давлением  $P_R$  к силе копания в атмосферных условиях  $P_{01}$ , определяемых по результатам физического моделирования в барокамере.

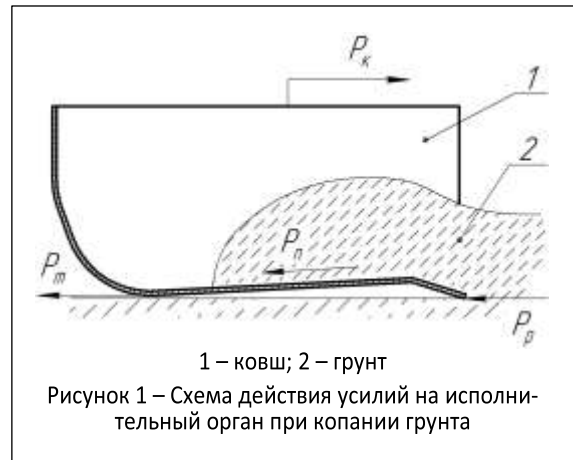
Д.Д. Тургумбаев исследовал процесс разработки глубоких траншей под слоем глинистого раствора при строительстве подземных сооружений способом «стена в грунте». Согласно результатам проведенных исследований, сопротивление копанью грунта плоским отвалом предложено определять по зависимости:

$$P_k = P_p + P_m + P_R.$$

Исследования, проведенные в Киевской академии строительства и архитектуры (ныне Киевский национальный университет строительства и архитектуры), показали независимость прочностных свойств и сопротивления разрушению полностью водонасыщенных грунтов с различной фильтрационной способностью от гидростатического давления [1].

М.К. Сукачем [1], В.Г. Моисеенко, А.А. Карошкиным, В.А. Лобановым, С.П. Огородниковым, А.И. Коптеловым и др. исследователями предложены математические модели для определения сил резания грунта под водой для различных типов и режимов работы землеройных машин, в том числе с использованием вибрационного воздействия [2]. Однако опыт разработки грунта на суше показывает, что для отвально-ковшовых рабочих органов (бульдозеров, скреперов, экскаваторов) доля составляющих  $P_m$  и  $P_n$  в общем балансе сопротивлений может составлять от 30 до 70 % в зависимости от прочности грунта [3]. Причём с уменьшением прочности грунта доля указанных составляющих увеличивается. Следовательно, при копании слабых водонасыщенных грунтов долю усилия резания в общем балансе сопротивлений следует ожидать намного меньшей доли сопротивления перемещению грунта в ковше. Поэтому определение нагрузок на исполнительный орган, обусловленных силами вязкого трения срезаемого пласта о стенки ковша, требует проведения отдельных исследований.

**Целью** настоящей работы является разработка математической модели для определения усилия сопротивления копанью слабых водонасыщенных грунтов ковшовым исполнительным органом.



## Изложение основного материала исследований

В работе [4] приведено условие, при котором процесс резания пластичного водонасыщенного грунта ножом землеройной машины переходит в процесс его раздвигания без отделения стружки:

$$p_0 \geq 2\tau_0, \quad (1)$$

где  $p_0$  – давление пригрузки на поверхность донного грунта от призмы волочения;

$\tau_0$  – граничное напряжение грунта сдвигу.

Условие (1) показывает, что при некоторых параметрах призмы волочения процесс заполнения ковша прекращается. Следовательно, параметры грунтового кома в ковше также ограничены. В дальнейшем состояние заполнения, при котором выполняется условие (1), будем обозначать как состояние предельного заполнения ковша, а параметры, соответствующие такому состоянию (длина и высота грунтового кома в ковше, время заполнения и т.п.) – соответственно предельными параметрами заполнения.

Согласно принятым обозначениям, заполнение ковша при копании осуществляется в промежутке времени  $0 < t < t_{пр}$  ( $t_{пр}$  – предельное время заполнения). При разработке пластичных водонасыщенных грунтов большая часть работы расходуется на преодоление сил межслоевого трения грунта вследствие контакта срезаемого пласта со стенками ковша, остальная часть – на разрушение структурных связей частиц грунта при его резании и деформировании. При  $t \geq t_{пр}$  изменение геометрических параметров грунтового кома и призмы волочения не происходит и вся работа затрачивается на перемещение призмы волочения и раздвигание грунта перед ковшом в стороны, образуя так называемые валики (рис. 2). В последнем случае усилие копания принимает максимальное значение.



Рисунок 2 – Фрагмент прорези, демонстрирующий переход резания пластичного водонасыщенного грунта в его раздвигание

Определим усилие копания в момент времени  $t = t_{пр} - dt$ , где  $dt$  – бесконечно малый промежуток времени. В этом случае все ещё происходит заполнение ковша, а усилие копания  $P_k$  бесконечно близко приближается к своему максимальному значению:

$$P_k(t_{пр} - dt) \rightarrow P_k(t_{пр}) = P_{k\max}.$$

В дальнейшем будем рассматривать лобовую грань режущей части и внутреннюю нижнюю стенку ковша как одну поверхность. При этом усилие резания полагаем намного меньшим сопротивления заполнению ковша, поэтому усилие сопротивления копанию будет определяться выражением:

$$P_k = P_3 + P_m + P_{2\partial}, \quad (2)$$

где  $P_3$  – сопротивление перемещению грунта в ковше (сопротивление заполнению);

$P_{2\partial}$  – гидродинамическое сопротивление перемещению срезанного грунта в воде.

Сопротивление заполнению можно определить по следующему выражению:

$$P_3 = 2P_{бок} + P_{дн}, \quad (3)$$

где  $P_{бок}$  и  $P_{дн}$  – поверхностные усилия, обусловленные трением срезаемого пласта соответственно о боковую и нижнюю стенки ковша.

В работе [1] показано, что при разработке пластичных водонасыщенных грунтов в поступающем в ковш потоке грунта можно условно выделить зону вязкого течения грунта I и зону твёрдых участков II (рис. 3). При трении о поверхность в потоке грунта возникают касательные напряжения  $\tau$ , величина которых в зоне I определяются уравнением Бингама-Шведова:

$$\tau = \tau_0 + \eta_{пл} dv/dn, \quad (4)$$

где  $\eta_{пл}$  – пластическая вязкость грунта;

$dv/dn$  – градиент скорости деформирования вдоль нормали к стенке ковша  $n$ .

Поверхностные усилия  $P_{пов}$  определяются выражением:

$$P_{пов} = \int_S \tau dS, \quad (5)$$

где  $S$  – площадь поверхности контакта.

Лабораторные исследования по резанию пластичных водонасыщенных грунтов моделью ковша как в атмосферных условиях, так и под толщей воды показали, что в процессе копания в ковше формируется грунтовый ком, форма которого близка к эллиптической. Поэтому при проведении дальнейших расчётов необходимо учитывать изменение скорости частиц грунта вдоль стенок при заполнении ковша в промежутке времени от  $0^\circ$  до  $t_{пр}$ .

Для упрощения задачи кривую, описывающую контур грунтового кома в ковше, зададим уравнением окружности (рис. 4):

$$r(\alpha) = R,$$

где  $R$  – радиус контура.

При копании за промежуток времени  $dt$  объем грунта, поступившего в ковш, будет составлять:

$$dV = k_{pz} h_0 v_0 b dt, \quad (6)$$

где  $k_{pz} = V/V_{общ}$  – коэффициент распределения грунта, характеризующий отношение объема грунта  $V$ , поступающего в ковш, к общему объёму срезанного грунта

$$V_{общ} = V + V_{пв};$$

$V_{пв}$  – объем призмы волочения;

$h_0$  – глубина резания;

$v_0$  – скорость резания;

$b$  – ширина ковша.

При этом частицы грунта из т.  $M$  переместятся в т.  $M_1$ , преодолев расстояние  $dr$ . Определим величину  $dr$  из следующего уравнения:

$$V(t + dt) - V(t) = dV,$$

или, подставив формулу для определения объема четверти цилиндра, с учётом (6), получим равенство:

$$\frac{1}{4} \pi b (r + dr)^2 - \frac{1}{4} \pi b r^2 = k_{pz} h_0 v_0 b dt. \quad (7)$$

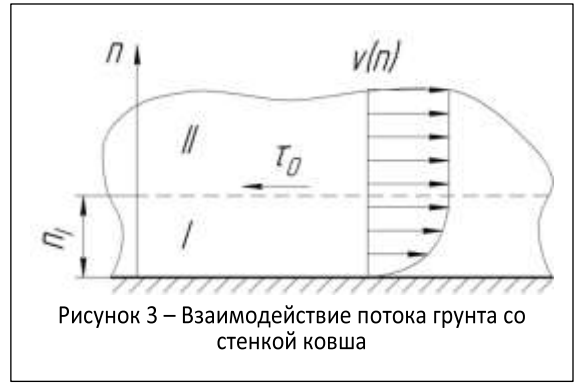


Рисунок 3 – Взаимодействие потока грунта со стенкой ковша



Рисунок 4 – Схема для расчёта скорости движения частиц грунта при формировании грунтового кома в ковше

Единственным корнем уравнения (7), имеющим физический смысл, является:

$$dr = \sqrt{r^2 + \frac{4}{\pi} k_{pz} h_0 v_0 dt} - r. \quad (8)$$

Разложим правую часть равенства (8) в ряд Тейлора, ограничиваясь тремя первыми членами (до бесконечно малых первого порядка). После преобразований окончательно получим:

$$dr = \frac{2k_{pz} h_0 v_0}{\pi r} dt,$$

откуда можно определить мгновенную скорость перемещения частиц  $v_R$ :

$$v_R(r) = \frac{dr}{dt} = \frac{2k_{pz} h_0 v_0}{\pi r}, \quad (9)$$

где  $r \geq h_0$ , поскольку значение скорости  $v_R$  в рассматриваемой задаче не должно превышать скорости резания  $v_0$ .

В общем случае изменение скорости частиц грунта в направлении нормали к стенке ковша описывается уравнением параболы вида [5]:

$$v(n) = An^2 + Bn + C, \quad (10)$$

где  $n$  – нормальное расстояние от стенки ковша до рассматриваемой точки;

$A$  и  $B$  – коэффициенты;

$C$  – свободный член.

Из условия прилипания частиц грунта к стенке ( $v(0) = 0$ ) получим  $C = 0$ .

На границе разделения зон I и II скорость перемещения частиц грунта равна скорости движения связной области:

$$v(n_1) = v_R, \quad (11)$$

где  $n_1$  – толщина зоны текучести грунта.

Подставив значение производной  $dv(n)/dn$  в выражение (4) можно записать зависимость величины касательных напряжений  $\tau = f(n)$ :

$$\tau(n) = \tau_0 + \eta_{nn} (2An + B). \quad (12)$$

Условие равенства касательных напряжений на границе разделения текучей и связной областей граничному напряжению на сдвиг имеет вид:

$$\tau(n_1) = \tau_0, \quad (13)$$

Решая совместно уравнения (10) и (12) с учётом граничных условий (11) и (13) определяем значения коэффициентов  $A$  и  $B$ . Окончательно функция (10) примет вид:

$$v(n) = -\frac{v_R}{n_1^2} n^2 + \frac{2v_R}{n_1} n. \quad (14)$$

Подставив значения коэффициентов  $A$  и  $B$  в (12) получим выражение:

$$\tau(n) = \tau_0 + \eta_{nn} \left( -\frac{2v_R}{n_1^2} n + \frac{2v_R}{n_1} \right). \quad (15)$$

Величина касательных напряжений у стенки ковша будет равна:

$$\tau_{n=0} = \tau_0 + \frac{2\eta_{nn} v_R}{n_1},$$

или с учётом формулы (9):

$$\tau_{n=0} = \tau_0 + \frac{4k_{\rho z} \eta_{nl} h_0 v_0}{\pi n, r}. \quad (16)$$

Обозначим толщину вязкотекучей области у боковой стенки ковша как  $b_l$ , у нижней стенки –  $h_l$ . Подставляя (16) в формулу (5) находим поверхностное усилие  $P_{бок}$ :

$$\begin{aligned} P_{бок} &= \int_S \left( \tau_0 + \frac{4k_{\rho z} \eta_{nl} h_0 v_0}{\pi b_l r} \right) dS = \int_{h_0}^R \left( \tau_0 + \frac{4k_{\rho z} \eta_{nl} h_0 v_0}{\pi b_l r} \right) \frac{\pi}{2} r dr = \\ &= \frac{1}{4} (R - h_0) \left[ \pi \tau_0 (R + h_0) + \frac{8k_{\rho z} \eta_{nl} h_0 v_0}{b_l} \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

Аналогичным образом определяем поверхностное усилие для нижней стенки:

$$\begin{aligned} P_{дн} &= \int_S \left( \tau_0 + \frac{4k_{\rho z} \eta_{nl} h_0 v_0}{\pi h_l r} \right) dS = \int_{h_0}^R \left( \tau_0 + \frac{4k_{\rho z} \eta_{nl} h_0 v_0}{\pi h_l r} \right) b dr = \\ &= \frac{1}{\pi} b \left[ \pi \tau_0 (R - h_0) + \frac{4k_{\rho z} \eta_{nl} h_0 v_0}{h_l} \ln \left( \frac{R}{h_0} \right) \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

Сопrotивление заполнению находим путём подстановки выражений (17) и (18) в (3). После преобразований полученная зависимость примет вид:

$$P_3 = \frac{1}{2} (R - h_0) \left[ \pi \tau_0 (R + h_0) + 8k_{\rho z} h_0 \eta_{nl} \frac{v_0}{b_l} \right] + \frac{1}{\pi} b \left[ \pi \tau_0 (R - h_0) + 4k_{\rho z} h_0 \eta_{nl} \frac{v_0}{h_l} \ln \left( \frac{R}{h_0} \right) \right]. \quad (19)$$

В полученном выражении отношения  $v_0/b_l$  и  $v_0/h_l$  характеризуют скорости угловых деформаций грунта  $d\gamma/dt$ .

Известно, что вязкость глинистых водонасыщенных грунтов зависит от величины нагрузки и времени её действия [1]. Вместе с тем, с уменьшением скорости движения частиц грунта в заборной полости ковша (см. выражение (9)) толщина вязкотекучей области может изменяться. Совокупное влияние факторов на величину касательных напряжений носит сложный характер, поэтому вместо произведения  $v_0 \eta_{nl}$  введём параметр  $K_2$ .

Опытным путём установлено, что данный параметр может быть определён по зависимости:

$$K_2 = ka\eta \frac{d\gamma}{dt}, \quad (20)$$

где  $k = 0,5 \dots 0,7$  – коэффициент, учитывающий снижение касательных напряжений вследствие уменьшения средней скорости движения частиц грунта вдоль стенки ковша по сравнению со скоростью резания;

$a = 1$  м – параметр единичной длины;

$d\gamma/dt$  – скорость угловых деформаций;

$\eta$  – коэффициент вязкости, соответствующий скорости угловой деформации  $d\gamma/dt$ .

Параметры  $\eta$  и  $d\gamma/dt$  можно определить по реологической кривой  $\eta = f(d\gamma/dt)$ , получаемой по результатам испытаний грунта методами вискозиметрии.

При подводной разработке скорость резания, как правило, изменяется в относительно малом диапазоне, что связано с ростом гидродинамического сопротивления перемещению рабочего органа при увеличении скорости резания, а также ограничением по скорости размыва разрабатываемых грунтов. Так средняя скорость движения черпаков многочерпаковой драги находится в пределах (0,15...0,5) м/с, подводных скреперов – не более (1,2...1,5) м/с [6]. Средние значения скорости воды, при которых начинается размыв

грунта: 0,3 м/с – для илов, (0,4...0,8) м/с – для песков и (0,8...2,1) м/с – для лёссовых грунтов, глин и суглинков.

Глубина резания при подводной разработке, как правило, не превышает (0,2...0,25) м [7]. Поэтому в первом приближении можно определить диапазон величины  $d\gamma/dt$ , нижний предел которой составляет  $0,67 \text{ с}^{-1}$  (при  $v_0 = 0,15 \text{ м/с}$ ,  $h_0 = 0,25 \text{ м}$ ,  $h_l = 0,9h_0$ ), а верхний –  $50 \text{ с}^{-1}$  (при  $v_0 = 1,0 \text{ м/с}$ ,  $h_0 = 0,1 \text{ м}$ ,  $h_l = 0,2h_0$ ).

Анализ результатов вискозиметрических испытаний глубоководных сапропелевых и кокколитовых осадков Чёрного моря показали, что в пределах диапазона  $d\gamma/dt$  от 0,5 до  $55 \text{ с}^{-1}$  функция  $\eta = f(d\gamma/dt)$  близка к гиперболе, поэтому произведение  $\eta \cdot d\gamma/dt$  изменяется незначительно. Так для морского сапропелевого ила значение  $\eta \cdot d\gamma/dt$  при  $d\gamma/dt = 1,5 \text{ с}^{-1}$  и при  $d\gamma/dt = 65 \text{ с}^{-1}$  отличается всего на 30 %.

С учётом параметра  $K_z$  выражение (19) можно переписать в виде:

$$P_z = \frac{1}{2}(R - h_0) \left[ \pi \tau_0 (R + h_0) + 8k_{pz} h_0 \frac{K_z}{b_l} \right] + \frac{1}{\pi} b \left[ \pi \tau_0 (R - h_0) + 4k_{pz} h_0 \frac{K_z}{h_l} \ln \left( \frac{R}{h_0} \right) \right]. \quad (21)$$

Параметр  $R$  определим из условия равенства объёмов грунта, контур грунтового кома которых описывается уравнениями соответственно окружности и эллипса:

$$\frac{1}{4} \pi b R^2 = \frac{1}{4} \pi b l h,$$

откуда

$$R = \sqrt{l h}, \quad (22)$$

где  $l$  и  $h$  – соответственно длина и высота грунтового кома в ковше.

При времени заполнения  $t \geq t_{np}$   $R = R_{np}$  и определяется как:

$$R_{np} = \sqrt{l_{np} h_{np}}. \quad (23)$$

При  $t < t_{np}$  значение параметра  $R$  можно найти по формуле:

$$R(t) = k_{\phi k}(t) \sqrt{l_{np} h_{np}}, \quad (24)$$

где  $k_{\phi k}(t)$  – коэффициент формы грунтового кома, который является функцией времени; показывает какая доля предельного линейного параметра заполнения ( $h_{np}$  и  $l_{np}$ ) достигнута в момент времени  $t \leq t_{np}$ .

Если справедливо предположение об эллиптической форме контура, описывающего грунтовый ком, то объём грунта в ковше в момент времени  $t < t_{np}$  можно определить выражением:

$$V_{zp}(t) = \frac{1}{4} \pi k_{\phi k}^2(t) l_{np} h_{np} b. \quad (25)$$

Объём срезанного грунта определяется по формуле:

$$V_{zp}(t) = k_{pz} h_0 v_0 b t. \quad (26)$$

Приравняв правые части выражений (25) и (26) находим коэффициент  $k_{\phi k}$ :

$$k_{\phi k}(t) = 2 \sqrt{\frac{k_{pz} h_0 v_0 t}{\pi l_{np} h_{np}}}.$$

Использование коэффициента  $k_{\phi k}$  позволяет определить усилие заполнения ковша в любой момент времени.

## Выводы

При разработке пластичных водонасыщенных грунтов ковшовыми исполнительными органами основная часть усилия копания расходуется на преодоление сил вязкого трения при перемещении срезаемого пласта в ковш. Поэтому сопротивление заполнению ковша в общем балансе сопротивлений должно значительно превышать долю усилия резания.

Усилие сопротивления копанию пластичных водонасыщенных грунтов может быть определено как сумма сопротивления трению рабочего органа о грунт, гидродинамического сопротивления перемещению срезанного грунта в воде и сопротивления заполнению ковша. Для определения последнего разработана математическая модель, учитывающая физико-механические и реологические свойства разрабатываемого грунта.

В состоянии заполнения при  $t < t_{np}$  усилие перемещения грунта в ковше зависит от объема срезаемого грунта и мало зависит от скорости резания (в диапазоне скоростей резания  $(0,1...1,0)$  м/с). Максимальное сопротивление заполнению определяется максимальным объемом забранного грунта в ковше, который в свою очередь зависит от глубины резания, ширины ковша, физико-механических и реологических свойств разрабатываемого грунта.

---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сукач, М.К. Рабочие процессы глубоководных машин / М.К. Сукач. – Киев: Наук. думка, 2004. – 364 с. – ISBN 966-00-0818-X.
2. Потураев, В.Н. Вибрационные средства добычи твердых полезных ископаемых с морского дна / В.Н. Потураев, В.П. Надутый, А.А. Взоров // Материалы международной научно-технической конференции по рациональному использованию земли и океана: современная техника и технология. – Днепропетровск: НГУ, 1999. – С. 10-14.
3. Недорезов, И.А. Машины строительного производства: учеб. пособие / И.А. Недорезов, А.Г. Савельев. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 119 с. – ISBN 978-5-7038-3431-2.
4. Сукач, М.К. Модель резания пластичного водонасыщенного грунта ножом землеройной машины / М.К. Сукач, В.И. Магнусhevский // Зб. наук. праць ХНАДУ. – 2005. – Вип. 29. – С. 74-79.
5. Бударин, В.О. Метод расчета движения жидкости / В.О. Бударин. – Одесса: Астропринт, 2006. – 137 с. – ISBN 966-318-519.8.
6. Добрецов, В.Б. Канатно-скреперная разработка малых континентальных и прибрежно-морских россыпей / В.Б. Добрецов, Д.С. Опрышко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2006. – №16. – С. 229-239.
7. Гилев, А.В. Обоснование параметров рабочего органа канатного скрепера, применяемого при разработке обводненных месторождений полезных ископаемых / А.В. Гилев, Ф.Э. Шейн // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – №8. – С. 2-5.

## REFERENCES

1. Sukach, M.K. (2004), *Rabochie processy glubokovodnyh mashin* [Workflows deep machines], Nauk. dumka, Kiev, Ukraine.
2. Poturaev, V.N., Nadutyj, V.P. and Vzorov, A.A. (1999), "Vibration equipment for mining of solid minerals from the sea bottom", *Proc. of the International scientific and technical conference on rational usage of land and oceans: modern equipment and technology*, National Mining University, Dnepropetrovsk, pp. 10-14.
3. Nedorezov, I.A. and Savelev, A.G. (2010), *Mashiny stroitel'nogo proizvodstva: ucheb. posobie* [Machines of building production: Textbook], MG TU im. N.E. Bauman, Moscow, Russia.
4. Sukach, M.K. and Magnushevskij, V.I. (2005), "Model of cutting the plasticity waterlogged ground with a plane blade of an excavating machine", *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, no. 29, pp. 74-79.
5. Budarin, V.O. (2006), *Metod rascheta dvizhenija zhidkosti* [Fluid moving calculation method], Astroprint, Odessa, Ukraine.
6. Dobrecov, V.B. and Opryshko, D.S. (2006), "Dragline mining of the small continental and shoreline stream gravel", *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, no. 16, pp. 229-239.
7. Gilev, A.V. and Shejn, Je. (2011), "Justification of dragline operating tool for water-logged deposit mining", *Mining equipment and electromechanics*, no. 8, pp. 2-5.

---

## Об авторе

**Шепель Тарас Вильевич**, аспирант, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (Государственное ВУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина, sarat.dp@mail.ru



### About the author

**Shepel Taras Vilyevich**, Doctoral Student, State Higher Educational Institution "National Mining University", State HEI "National Mining University", Dnepropetrovsk, Ukraine, sarat.dp@ymail.ru

**Анотація.** Стаття спрямована на розробку нового методу розрахунку навантажень на виконавчі органи ковшового типу при розробці пластичних водонасичених ґрунтів. Актуальність теми обумовлена необхідністю вдосконалення методів прогнозування робочих навантажень на виконавчі органи ґрунторозробних машин з урахуванням особливих властивостей розроблюваного ґрунтового середовища в підводних умовах. Запропонований метод розрахунку заснований на використанні реологічної моделі в'язкопластичного середовища Бінгама-Шведова. Результати спостережень процесу копання водонасичених ґрунтів дозволили запропонувати модель заповнення ковша. Введено поняття стану граничного заповнення ковша та граничних параметрів заповнення. Розроблено математичну модель для визначення опору заповнення ковша при копанні пластичних водонасичених ґрунтів з урахуванням їх реологічних та фізико-механічних властивостей. Запропонований метод розрахунку дозволяє підвищити точність прогнозування робочих навантажень на ковшові виконавчі органи при розробці підводних родовищ корисних копалин.

**Ключові слова:** підводна розробка, землерийна машина, копання, водонасичений ґрунт.

**Abstract.** The article is aimed to development of the new method of workloads calculation at excavation of plasticity waterlogged soils with the bucket working tools. Relevance of this subject is caused by requirement of improving the methods of workloads calculation with taking into account the features of underwater soils properties. The proposed method is based on the Bingam-Shvedov rheological model of soil. Studying of digging process at excavating the waterlogged soils allowed offering the model of bucket filling process. The notions of the ultimate bucket filling condition and the ultimate bucket filling parameters are introduced. The mathematical model for defining of the bucket filling force at digging the plasticity waterlogged soils is given. The offered method allows improving the accuracy of forecasting workloads on a bucket working tools at the development of underwater mineral deposits.

**Keywords:** underwater mining, excavation machine, digging, waterlogged soil.

*Стаття поступила в редакцію 08.05.2014*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.И. Дырдой*

---

---

УДК 622.451:658.512.007

**Бунько Т.В.**, д-р техн. наук, ст. научн. сотр.,  
**Кокоулин И.Е.**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.  
(ИГТМ НАН Украины)  
**Жалилов А.Ш.**, инженер  
(ГП «Селидовуголь»)

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЁТА ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В  
РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ ШАХТНОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЕ В УСЛОВИЯХ  
НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОБЪЕКТЕ УПРАВЛЕНИЯ**

**Бунько Т.В.**, д-р техн. наук, ст. наук. співр.,  
**Кокоулін І.Є.**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.  
(ИГТМ НАН України)  
**Жалілов А.Ш.**, інженер  
(ДП «Селідовугілля»)

**ОБГРУНТОВУВАННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ПОВІТРОРІЗПОДІЛУ У ШАХТНІЙ  
ВЕНТИЛЯЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ, ЯКА РЕКОНФІГУРУЄТЬСЯ, В УМОВАХ НЕПОВНОЇ  
ІНФОРМАЦІЇ ЩОДО ОБ'ЄКТУ УПРАВЛІННЯ**

**Bunko T.V.**, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher,  
**Kokoulin I.Ye.**, Ph. D.(Tech.), Senior Researcher  
(IGTM NAS of Ukraine)  
**Zhalilov A.Sh.** M.S (Tech.)  
(SE «Selidovugol»)

**BACKGROUND OF METHOD OF THE AIR-DISTRIBUTION CALCULATION OF RE-  
CONFIGURABLE MINE VENTILATION NETWORKS IN THE CONDITIONS OF INCOMPLETE  
INFORMATION ABOUT OBJECT OF CONTROL**

**Аннотация.** Рассмотрены два типа реконфигурации шахтной вентиляционной сети (ШВС): первый - когда вентиляционные системы угольных шахт в ходе ведения горных работ меняют свою структуру и параметры объектов проветривания, при этом наблюдается устойчивая тенденция к их усложнению, второй - когда для обеспечения воздухом объектов проветривания в ходе эксплуатации необходимо вентиляционную систему реконфигурировать с целью адаптации её к изменению объекта эксплуатации. Определены задачи по созданию методического обеспечения проектирования и управления вентиляционных систем с такими особенностями, которые отличают реконфигурируемую систему от проектируемой с использованием существующих методов структурно-параметрической идентификации. Выполнен анализ видов, причин и классификация возникновения информационной неопределённости, возникающих в процессе проектирования и управления реконфигурируемыми сетевыми объектами. Определены научные задачи, решение которых необходимо для разработки корректных методов проектирования и управления сложными реконфигурируемыми объектами в условиях неполной информации об объекте управления.

**Ключевые слова:** реконфигурация шахтной вентиляционной сети, воздухораспределение, структурно-параметрическая идентификация.

В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция усиления роли факторов сложности в существующих и проектируемых организационно-технических системах; к ним в полной мере относится горное производство, и его важнейший технологический процесс – шахтная вентиляция. Сложность вентиляционных систем угольных шахт проявляется в таких аспектах, как многосвязная структура с неявными аэродинамическими связями между её элементами, сложность моделирования и выбора рациональных режимов её функционирования в условиях неполной информации об объекте управления, а также оптимального направления её развития при решении задач перспективного и долгосрочного планирования.