Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института т. XXXIII, вып. I, 1956 г.

К ТЕОРЕТИЧЕСКИМ ИССЛЕДОВАНИЯМ ПОГРУЗОЧНЫХ МАШИН С КОВШЕВЫМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ

Н. П. Грачев

Погрузочные машины с ковшевым рабочим органом УМП-1, ППМ-2, ПМЛ-5, ЭПМ-2 (табл. 1) и др., вследствие мобильности и универсальности, получили в горной промышленности наибольшее распространение. *Они являются основными погрузочными машинами при проходке* выработок по крепким породам.

Таблица 1

Техническая характеристика	УМП-1	ППМ-2	ПМЛ-5	ЭПМ-1
Производительность, *м³/час*	30—40	35—45	20	40
Число зачерпываний в 1 мин.	4—5	3—4	2—3	5
Емкость ковша, *м³*	0,15	0,23	0,17	0,2
Фронт погрузки, *м*	3—3,44	4,0	2,0	2,2
Угол поворота загрузочного устройства, град.	50	55	30	30
Величина опускания рабочей кромки ковша ниже головки рельса, *мм*	175	170	50	55
Скорость передвижения машины:				
рабочая, *м/сек*	0,54	0,60	0,75	0,79
при передвижении по выработкам, *м/сек*	0,73	0,88	0,75	0,79
Габарит машины, *мм*:				
длина в рабочем полож	6840	7250	2270	2480
„ „ транспортном	6430	6840	1320	1900
ширина в рабочем положении	1650	1650	1050	1600
„ „ транспортном	1290	1375	1320	1400
высота в рабочем положении	2150	2150	2200	2070
„ „ транспортном	1590	1645	1500	1545
Ширина колеи, *мм*	600—900	600—900	600—750	600
Жесткая база,	1120	1100	846	960
Вес, *кг*	8524	8250	2750	4350 (5150)
Число двигателей	1	2	2	2
Мощность двигателей	20,5 *квт*	4,2 и 20,5 *квт*	2.10,5 *л. с.*	22 *квт*
Угол поворота конвейера от оси машины		12°30′		
Скорость движения ковшевой цепи, *м/сек*	0,52—0,63	0,54—0,81	0,34—0,78	0,46—1,01
Скорость движения конвейерной ленты, *м/сек*	1,0	1,17		
Ширина конвейера, *мм*	600	600		—
Максимальное напорное усилие машины, *кг*	1720	1650	550	1100

1. Состояние изученности вопроса

Несмотря на то, что погрузочные машины с ковшевым рабочим органом, работающие по принципу прямой механической лопаты, применяются достаточно широко, вопрос об их работе мало исследован советскими учеными и еще менее освещен в иностранной литературе.

В комплексном изучении работы погрузочных машин много неразрешенных задач. Так, в литературе отсутствуют исчерпывающие данные об исследованиях основных сопротивлений внедрению рабочего органа машины, нет методики расчета погрузочных машин.

В трудах С. Г Калмыкова [4 и 5], Н. А. Киклевича [6], К. А. Лоханина [7], В. И. Стогова [9] и других авторов имеются некоторые указания по выбору и расчету технических параметров погрузочных машин. Эти указания, однако, не решают поставленных вопросов в нужном для практических целей объеме.

Способ выбора основных параметров погрузочных машин в настоящее время является чисто эмпирическим, так как в основе его лежат или подбор искомых параметров по аналогии с действующими машинами, или установление их в результате испытания ряда образцов.

Однако по изучению процессов, происходящих при копании грунтов и насыпных материалов рабочими органами землеройных машин, имеются ценные материалы, которые могут быть использованы при разработке теоретических положений и в практике работы погрузочных машин.

2. Процессы зачерпывания насыпных материалов

При исследовании процессов работы погрузочной машины и для построения методики расчета основных усилий внедрению ковша необходимо выявить физические явления, происходящие при зачерпывании, а затем количественно и качественно оценить эти процессы в виде расчетных формул. Так как погрузочные машины по принципу работы относятся к экскавационным, рассмотрим вопросы о процессах копания массовых насыпных материалов экскавационными органами этих машин.

Как известно, конструирование экскавационных машин в Советском Союзе ведется на основе научных экспериментальных и теоретических исследований. Конструирование машин возможно на базе глубокого научного решения вопросов о процессах копания грунтов и насыпных материалов. По этим процессам в настоящее время существуют достаточно надежные экспериментальные и теоретические данные, необходимые для установления качественной и количественной связи между основными параметрами экскавационных машин.

Изучением физической сущности процессов, происходящих при копании грунтов и насыпных материалов, и установлением их законов занимались многие ученые.

Первые работы, посвященные изучению процессов копания грунтов, принадлежат замечательному русскому ученому В. П. Горячкину, известному своими трудами в области исследований работы сельскохозяйственных машин. Академик В. П. Горячкин предложил так называемую рациональную формулу для расчета силы тяги сельскохозяйственных машин с рабочим органом лемешного типа [1]

$$F = P' + P'' + P''' \qquad (1)$$

где P' — сопротивление перемещению рабочего органа машины;
P'' — сопротивление грунта резанию;
P''' — сопротивление грунта отбросу.

Теоретические положения В. П. Горячкина о процессах копания грунтов представляют большую практическую ценность.

По В. П. Горячкину, малосвязные сыпучие материалы в процессе работы уплотнения, производимой лезвием рабочего органа, перемещаются перпендикулярно к рабочей плоскости, распадаются на мелкие части и сгружаются перед лезвием (рис. 1).

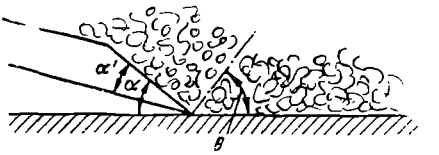


Рис. 1. Схема работы лезвия рабочего органа погрузочной машины

Это положение было подтверждено исследованиями А. Н. Зеленина и А. Д. Далина [3].

По Н. Г Домбровскому [2], общее сопротивление копания без учета сопротивления силы тяжести

$$P_к = F + R + P_т, \tag{2}$$

где F — сопротивление сыпучего материала резанию;

R — сопротивление трению ковша о материал;

$P_т$ — сопротивление перемещению призмы волочения и материала в ковш.

Относя все сопротивления к сечению слоя материала, зачерпываемого ковшом, Н. Г Домбровский получил зависимость

$$P_к = K\omega, \tag{3}$$

где K — удельное сопротивление материала копанию, $кг/м^2$;

ω — площадь сечения слоя материала, $м^2$.

Общее сопротивление копанию (или зачерпыванию) зависит, как видно из формулы, от характеристики разрабатываемого материала, конструктивных размеров ковша и других факторов.

3. Конструктивная форма ковшей

Груз в забое может находиться в насыпном и частично связанном (после взрывания) состоянии. Насыпные материалы (полезное ископаемое или порода), подлежащие погрузке, независимо от способа отбойки (взрывчатыми веществами, отбойными машинами и пр.) весьма неоднородны по крупности и состоят как из мелочи, так и из крупных кусков. Ковш погрузочной машины заполняется зачерпыванием при движении вверх по откосу кучи насыпного материала. Погрузочная машина должна зачерпывать и грузить материалы резко различных характеристик по крупности, ковш ее должен обладать возможно большей «активностью» и способностью и производить некоторое разрыхление груза, приводить его в подвижное состояние и отделять связанные куски.

Характерной особенностью новейших ковшей погрузочных машин является их форма. Конструктивные формы ковшей разнообразны. Задняя стенка ковша обычно служит для разгрузки насыпного материала. Передняя стенка в целях лучшего внедрения ковшей имеет цилиндрическую форму с большим радиусом кривизны. На ковшах, предназначенных для работы на крупнокусковом, тяжелом, абразивном насыпном материале, передняя стенка более закруглена. Режущая кромка передней стенки ковшей снабжается зубьями.

Основным фактором, определяющим форму ковша, является способ его разгрузки и заполнения. От правильного выбора формы ковша и его

параметров зависит быстрота заполнения и степень эффективности работы погрузочной машины. Ширина ковша является важнейшим его параметром.

Угол внедрения ковша α (рис. 2) в большинстве выполненных конструкций 20—30°. Задний угол α' (для устранения трения передней стенки о насыпной материал) выполняется в пределах 6—12°

Определение основных размеров ковша погрузочной машины производится на основании следующих принятых в практике конструирования соотношений (рис. 2)

$$H_к = B \text{ и } L_к = (0{,}8 \div 1{,}0)\,B,$$

где $H_к$, B и $L_к$ — соответственно высота, ширина, длина (или глубина) ковша.

Как показала практика эксплуатации, наиболее рациональной является конструкция ковша погрузочной машины УМП-1 (рис. 3).

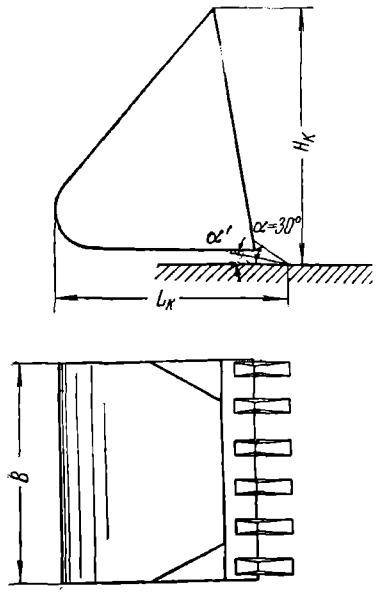


Рис. 2. Схема ковша погрузочной машины

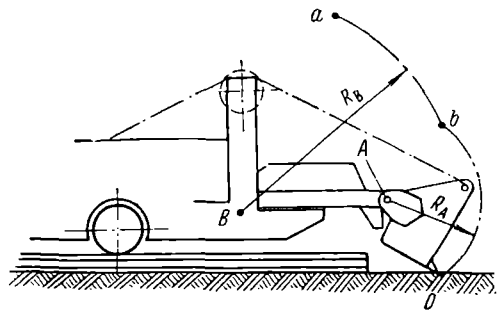


Рис. 3. Рабочий орган погрузочной машины УМП-1

В табл. 2 приведены наибольшие значения коэффициента наполнения ковшей ψ этих погрузочных машин по данным рудников Казахстана, Кривого Рога и Урала.

Таблица 2

Тип погрузочной машин	Наибольший коэффициент наполнения ковша ψ	Примечание
УМП-1	0,75	При работе на насыпных материалах одинаковых характеристик
ППМ-2	0,30	
ПМЛ-5	0,35	
ЭПМ-1	0,45	

Как видно из табл. 2, наименьший коэффициент наполнения ковша у погрузочной машины ППМ-2. Очевидно, на заполнение ковша насып-

ным материалом оказывает влияние форма ковша этой машины (рис. 4). Конструктивно ковш погрузочной машины ППМ-2 не отличается от ков-

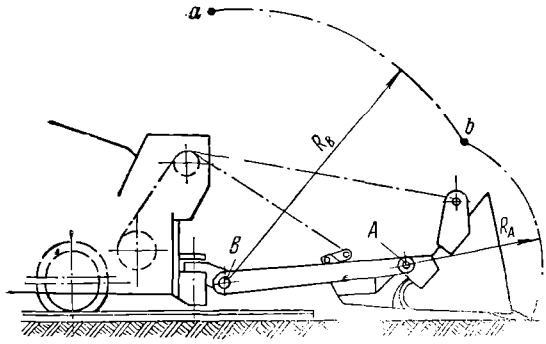


Рис. 4. Рабочий орган погрузочной машины ППМ-2

шей элеваторов, где процесс зачерпывания ковшом насыпных материалов резко отличается от процессов зачерпывания ковша погрузочной машины.

Более совершенным является ковш погрузочных машин ПМЛ-5 и ЭПМ-1 (рис. 5).

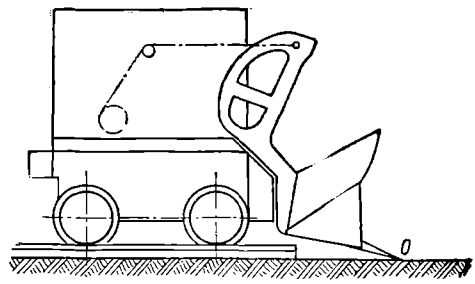


Рис. 5. Рабочий орган погрузочных машин ПМЛ-5 и ЭПМ-1

4. Напорное усилие ковша и сцепной вес машины

Напорное усилие погрузочной машины определяется как сумма сопротивлений при работе ковша. Расчетным случаем является момент заглубления внедряющей кромки ковша в насыпной материал, когда ковш скользит по почве выработки. Наполнение ковша может происходить при полном его внедрении в насыпной материал (рис. 6, 7)

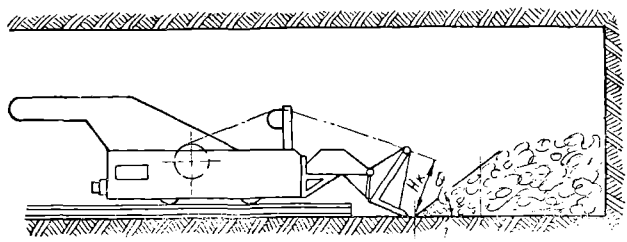


Рис. 6. Рабочее положение погрузочной машины в начале заполнения ковша

Суммарное сопротивление зачерпывания насыпного материала

$$W_{зач} = W_1 + W_2 + W_3 + W_4, \ кг, \qquad (4)$$

где W_1 — сопротивление от трения ковша о почву, *кг*;
W_2 — сопротивление внедрению ковша в насыпной материал, *кг*;
W_2 — сопротивление перемещению насыпного материала внутрь ковша, *кг*;
W_4 — сопротивление перемещению насыпного материала перед ковшом, *кг*.

При определении этого сопротивления, аналогично расчету для подпорной стенки, принимается во внимание собственный вес столба насыпного материала и боковое давление на него.

Таким образом, напорное усилие T, создаваемое погрузочной машиной, должно быть больше $W_{зач}$.

Отнеся все сопротивления к сечению слоя насыпного материала, зачерпываемого ковшом, получим уравнение, аналогичное зависимости Н. Г. Домбровского,

$$W_{зач} = K_1 \omega, \tag{5}$$

где K_1 — удельное сопротивление зачерпыванию насыпного материала, $кг/м^2$.

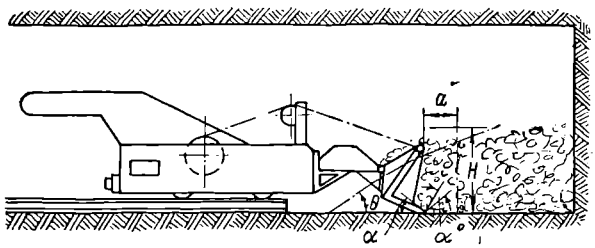


Рис. 7 Рабочее положение погрузочной машины в конце заполнения ковша

Заменяя в формуле (5) ω выражением $\frac{U}{L_{зач}}$, получим

$$W_{зач} = \frac{K_1 U}{L_{зач}}, \tag{5'}$$

где U — емкость ковша, $м^3$;

$L_{зач}$ — длина пути зачерпывания, равная в большинстве случаев длине ковша ($L_{зач} \approx L_к$), $м$.

Тяговое усилие от силы $W_{зач}$ составляет

$$W_0' = \frac{W_{зач}}{\eta_1} \quad кг, \tag{6}$$

где η_1 — к. п. д. механизма передвижения погрузочной машины, $\eta_1 = 0{,}7 \div 0{,}9$.

Полное сопротивление движению погрузочной машины

$$W_м = P\left(\omega' + i + \frac{a}{g}\right), \quad кг, \tag{7}$$

где P — вес машины, $кг$;

ω' — коэффициент сопротивления движению машины, принимаемый для каждого ходового устройства в зависимости от характера и состояния пути (табл. 3);

i — уклон пути;

a — ускорение движения машины, $м/сек.^2$

Необходимое тяговое усилие при этом

$$W_0'' = \frac{W_м}{\eta_1}, \quad кг. \tag{8}$$

Полное тяговое усилие на валу ведущих звездочек или зубчатых колес ходового устройства

$$W_0 = W_0' + W_0'', \quad кг. \tag{9}$$

Следовательно, мощность двигателя погрузочной машины в период зачерпывания

$$N'_{дв} = \frac{W_0 v_1}{102\eta_2}, \ квт, \tag{10}$$

где v_1 — скорость подачи машины, *м/сек*;

η_2 — к. п. д. передачи от двигателя к ведущим звездочкам (или зубчатым колесам) ходового устройства машины.

Таблица 3

Тип механизмов передвижения	Характеристика и состояние пути	ω'
На колесах по рудничной колее	1. Сильно загрязненный	0,012
	2. Хорошее состояние	0,008
На гусеничном ходу	1. Слабый путь	0,09 ÷ 0,12
	2. Плотный путь	0,03 ÷ 0,04

Величина полной силы сопротивления ковша погрузочной машины в период зачерпывания насыпного материала не должна быть больше тяговой силы машины по сцеплению, т. е.

$$W_{зач} + W_м \leqslant 1000 P_{сц} \mu_0, \tag{11}$$

где $P_{сц}$ — сцепной вес погрузочной машины, *т*;

μ_0 — коэффициент сцепления колес с рельсами или гусениц с почвой выработки.

Из формулы (11) получаем необходимый сцепной вес погрузочной машины

$$P_{сц} = \frac{W_{зач} + W_м}{1000\mu_0} \ т. \tag{12}$$

Подставляя выражения (5′) и (7) в формулу (12), определяем сцепной вес погрузочной машины

$$P_{сц} = \frac{1}{1000\mu_0}\left[\frac{K_1 U}{L_{зач}} + P\left(\omega' + i + \frac{a}{g}\right)\right]. \tag{13}$$

Как следует из формулы (13), величина необходимого сцепного веса погрузочной машины зависит от физико-механических свойств насыпного материала и конструктивных размеров ковша.

Так как $P\left(\omega' + i + \frac{a}{g}\right)$ составляет 2—8% от $W_{зач}$, то формулу (13) можно представить в упрощенном виде

$$P_{сц} = \frac{C_0 K_1 U}{1000\mu_0 L_{зач}}, \ т, \tag{13′}$$

где C_0 — коэффициент, учитывающий увеличение сцепного веса машины на преодоление сопротивления движению. $C_0 = 1{,}02 \div 1{,}08$.

При исследовании работы механической лопаты Н. Г Домбровским определены численные значения удельного сопротивления внедрению ковша K_1 для различных насыпных материалов. Эти данные, пересчитанные нами для погрузочных машин, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Породы (хорошо взорванные)	K_1,
Породы и руды средней крепости	2000—2800
Крепкие породы и руды . . .	2800—3200
Породы очень крепкие (кварциты, известняки и пр.)	3400—3800

5. Усилие и мощность подъема ковша

Усилие, необходимое для подъема ковша с грузом, определится величиной силы трения ковша с грузом о насыпной материал и сил вредного сопротивления в самом зачерпывающем устройстве.

Полная сила сопротивления подъема ковша погрузочных машин УМП-1, ППМ-2 и др. с ковшевым шарнирным зачерпывающим устройством (рис. 3, 4)

$$W_{\text{п}} = C'\left(W_{\text{зач}} f' + G\right)\left[1 + \frac{1}{2} f''\left(\frac{d_A}{R_A} + \frac{d_B}{R_B}\right)\right], \text{ кг}, \qquad (14)$$

где C' — коэффициент, учитывающий дополнительные сопротивления на блоках, направляющих и т. п., $C' = 1{,}05 \div 1{,}10$;

f' — коэффициент трения насыпного материала о насыпной материал, $f' = 0{,}6 - 1{,}0$;

G — вес ковша с материалом, *кг*;

f'' — коэффициент трения в шарнирах конструкции зачерпывающего устройства, $f'' = 0{,}20 \div 0{,}25$;

d_A — диаметр шарнира ковша, *мм*;

R_A — радиус траектории движения рабочей кромки ковша от точки A, *мм*;

d_B — диаметр шарнира стрелы ковша, *мм*;

R_B — радиус траектории движения рабочей кромки ковша от точки B, *мм*.

Для погрузочных машин ПМЛ-5, ЭПМ-1 и им подобных величина $W_{\text{п}}$ определяется по формуле (рис. 5)

$$W_{\text{п}} = C'\left(W_{\text{зач}} f' + G\right) \qquad (15)$$

Мощность двигателя механизма подъема машины

$$N'_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{п}} v_2}{102 \eta_3} \quad \text{квт},$$

где $P_{\text{п}}$ — сила подъема ковша, равная $\frac{W_{\text{п}}}{\cos\beta}$, *кг*, где, в свою очередь, β — угол между направлениями сил $P_{\text{п}}$ и $W_{\text{п}}$ в начале подъема ковша, град;

v_2 — скорость движения ковша, равная окружной скорости на органе навивки, *м/сек*;

η_3 — к. п. д. передаточного устройства механизма подъема.

6. Параметры производительности погрузочной машины

Эффективная производительность погрузочной машины с ковшевым рабочим органом

$$Q_{эф} = \eta U z \psi, \ м^3/час, \tag{16}$$

где η — коэффициент использования погрузочной машины по времени, $\eta = 0{,}85 \div 0{,}9$;

z — число зачерпываний в час.

Как видно из формулы (16), помимо факторов, связанных с условиями работы, величина производительности погрузочной машины прежде всего определяется двумя конструктивными показателями — емкостью ковша и числом зачерпываний в час.

Число зачерпываний ковша в час связано со скоростью подачи ковша при внедрении, скоростью движения ковша при подъеме и длиной траектории его движения

$$z = \frac{3600}{\frac{l_1}{v_1} + \frac{2l_2}{v_2} + t}, \tag{17}$$

где l_1 — длина пути, на котором происходит заполнение ковша в момент зачерпывания, $l_1 = L_{зач}$;

l_2 — длина траектории движения ковша, $м$;

t — продолжительность разгрузки, $t = 2 - 3$ сек.

Как показывает опыт работы погрузочных машин, число зачерпываний для каждой машины ограничено. Увеличение z возможно за счет уменьшения l_2 в выражении $\frac{2l_2}{v_2}$ что конструктивно вполне возможно.

Теоретическая производительность погрузочной машины

$$Q = U z \psi, \ м^3/час. \tag{18}$$

Отсюда емкость ковша

$$U = \frac{Q}{z\psi}, \ м^3$$

Заключение

1. Современные погрузочные машины с ковшевым рабочим органом, выпускаемые советскими заводами (УМП-1, ППМ-2, ПМЛ-5, ЭПМ-1 и др.) работают вполне эффективно, но нуждаются в следующих конструктивных усовершенствованиях:

а) увеличении сцепного веса машины до величины, определяемой по формуле (13);

б) упрощении конструктивной схемы, предусматривающей большую надежность, простоту обслуживания, легкую и быструю смену износившихся частей машины;

в) конструктивном исполнении ковша машины, обеспечивающем наименьшее сопротивление внедрению в насыпные материалы;

г) упрощении технологии изготовления деталей и узлов машины.

2. Наиболее рациональным зачерпывающим устройством является открытый ковш с внедряющей кромкой большой ширины.

3. Высота подъема ковша должна быть минимальной.

4. Механизм передачи груза в целях упрощения конструкции должен быть самостоятельной машиной, монтируемой возле или над погрузочной машиной.

5. При изучении процесса работы ковша погрузочных машин весьма важно иметь теоретически обоснованную характеристику свойств самих насыпных материалов зачерпывания.

Литература

1. Горячкин В. П. Рациональная формула резания грунтов. Сельхозгиз, 1936.
2. Домбровский Н. Г Советский мощный шагающий экскаватор. Известия АН СССР, 1952, вып. 2.
3. Зеленин А. Н. Физические основы теории резания грунтов. Изд. АН СССР, 1950.
4. Калмыков С. Г Кинематическое и динамическое исследование зачерпывающего органа погрузочной машины с катящейся рукоятью. «Горный журнал», 1948, № 8.
5. Калмыков С. Г Определение необходимого сцепного веса погрузочной машины с катящейся рукоятью. «Горный журнал», 1948, № 6.
6. Киклевич Н. А. Электропривод погрузочной машины катящейся рукоятью. «Горный журнал», 1951, № 1.
7. Лоханин К. А. Электрическая породо-погрузочная машина ЭПМ-1. «Горный журнал», 1952, № 11.
8. Спиваковский А. О. Рудничный транспорт. Углетехиздат, 1953.
9. Стогов В. Н. Сопротивления при внедрении в штабель ковша напорного погрузчика. «Механизация трудоемких и тяжелых работ», 1952, № 2.