

О. Д. АЛИМОВ, И. Г. БАСОВ, Ф. Ф. ЗЕЛИНГЕР, В. Г. ЮДИН,
Э. И. ЛИСОВСКИЙ

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ГРУНТА БАРОВЫМИ ЗЕМЛЕРЕЗНЫМИ МАШИНАМИ И ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

Применяемые в практике баровые землерезные машины отличаются количеством, размерами и режимами работы исполнительных органов, устройствами для заводки бара в грунт, мощностью двигателей [1—6]. Эти машины работают и испытываются в различных условиях. Поэтому данные о их производительности в большинстве случаев несопоставимы. Очень многие вопросы, связанные с выбором оптимальных режимов работы баровых машин, остаются нерешенными или недостаточно достоверными. Например, нет ясности, какими должны быть по величине целесообразные скорости движения режущей цепи, скорости, подачи и в какой взаимосвязи их необходимо применять. Это обуславливает необходимость проведения специальных исследований, которые позволили бы определить рациональные режимы работы существующих баровых машин и наметить пути их дальнейшего совершенствования и создания.

В данной работе освещается методика исследования режимов резания грунтов баровыми исполнительными органами землерезных машин.

Основываясь на опыте создания и эксплуатации врубовых машин в шахтах при резании углей и учитывая мощности двигателей современных тракторов и тягочей, которые могут быть применены для создания баровых машин, исследование режимов работы землерезных машин необходимо провести при изменении их параметров в следующих пределах [1]:

- 1) скорость резания от 0,4 до 3,0 ÷ 5,5 м/сек;
- 2) скорость подачи от 0,2 до 3,0 ÷ 4,0 м/мин;
- 3) усилие подачи от 200 ÷ 300 до 5000 ÷ 10000 кг;
- 4) глубина врубовой щели от 0,4 до 2,0 м;
- 5) угол наклона бара к горизонту от 20° до 90°.
- 6) ширина прорезаемой щели от 0,12 до 0,14 м.

Результаты исследований режимов работы баровых исполнительных органов должны уточнить существующие представления о процессе разрушения мерзлых грунтов при резании цепными исполнительными органами; необходимых затратах мощности на протягивание цепи при различных скоростях подачи и резания; усилиях подачи при различных скоростях подачи и резания; затратах мощности на привод режущей части и на перемещение баровой установки; износе зубков и его влиянии

на усилия подачи, протягивания цепи и затраты мощности; процессе удаления штыба из врубовой щели, затраты мощности на вынос штыба при различных режимах работы цепного исполнительного органа.

Для исследования режимов резания мерзлых грунтов следует выбирать грунты, не содержащие включений гравия и других скальных пород. Это позволит точнее определить исследуемые параметры и исключить ошибки, которые могут возникнуть при резании баровым исполнительным органом твердых включений, значительно отличающихся по физико-механическим свойствам от однородного мерзлого грунта.

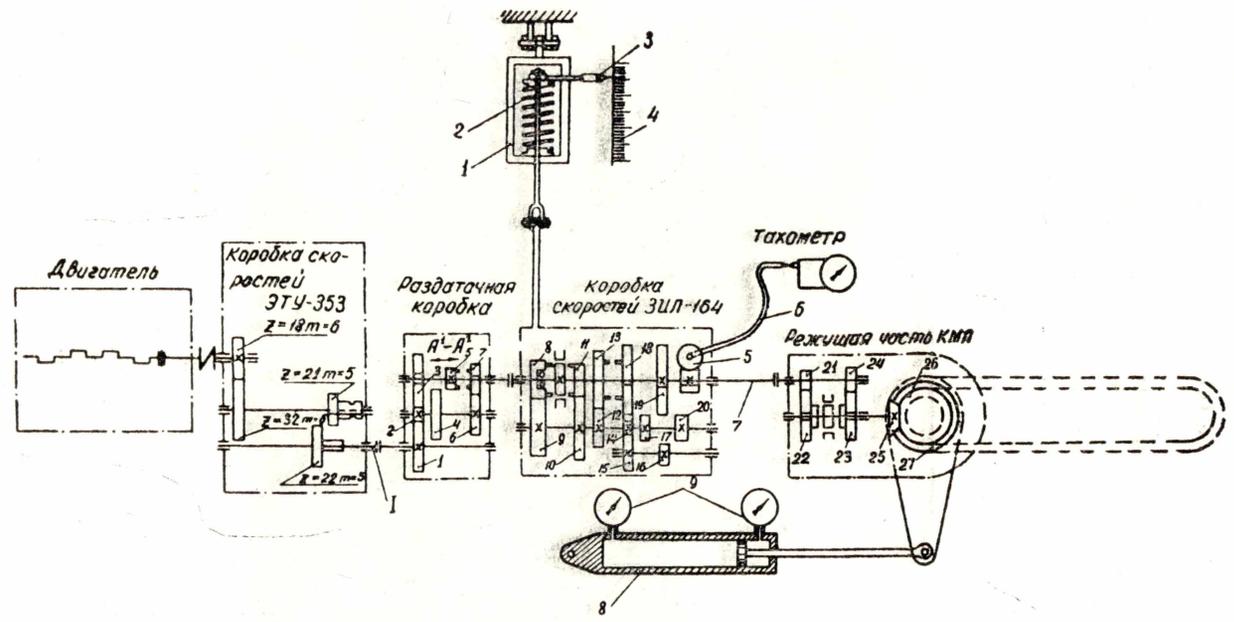
Экспериментальная установка

Для исследования режимов резания мерзлых грунтов в Томском политехническом институте создана экспериментальная установка с баровым исполнительным органом, получившая название «Мороз». Установка «Мороз» (рис. 1) создана на базе траншейного экскаватора типа



Рис. 1. Общий вид установки для резания мерзлых грунтов.

ЭТУ-353, с шасси которого снято рабочее оборудование и верхняя рама с бункером [4]. На освободившуюся раму экскаватора установлена режущая часть врубовой машины типа КМП (рис. 2). Привод режущей части осуществляется от двигателя через вал 1 (рис. 2) коробки скоростей, который при обычной работе экскаватора используется для привода ленточного транспортера. Скорость вращения вала 1 была увеличена путем замены зубчатых колес коробки скоростей с числом зубьев 15 и 28 на зубчатую пару с числами зубьев 21 и 22. Это позволило несколько разгрузить выходной вал 1 и исключить возможность его поломки при передаче наибольшей мощности от двигателя к режущей части машины. Для получения большого числа скоростей движения режущей цепи между валом привода ленточного транспортера коробки передач 2 (рис. 3) экскаватора ЭТУ-353 и ведущим валом редуктора режущей части КМП установлена раздаточная коробка 3 и коробка скоростей 4



Номер зубчатого венца или колеса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
число зубьев	29	26	29	35	18	29	26	29	41	44	20	31	33	20	22	33	22	41	49	19	13	52	25	20	19	70	5
модуль	4,25	4,25	4,25	5	5	4,25	4,25	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	4,2	4,2	4,2	4,2	7	7	7	7	7	7	9	9

Рис. 2. Кинематическая схема привода режущей части землерезной машины «Мороз».

автомобиля ЗИЛ-164. Заводка бара в грунт осуществляется с помощью гидроцилиндра 5, но в отличие от созданных ранее баровых установок [2—6] заводка рабочего органа производится при втягивании штока, то есть при подаче масла в штоковую полость гидроцилиндра.

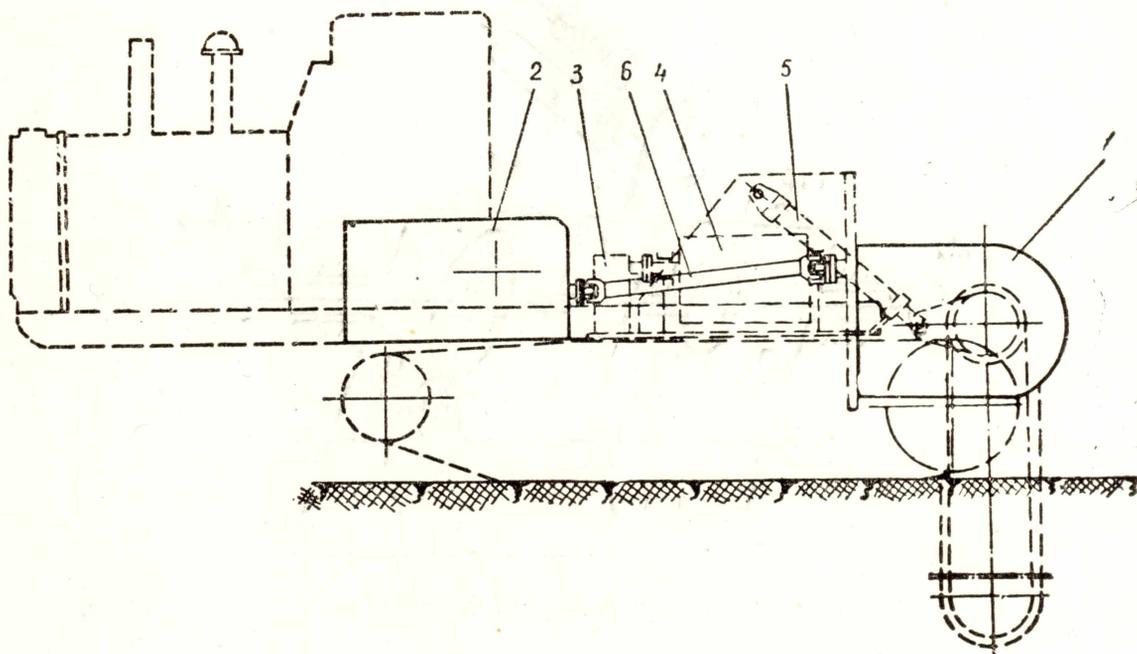


Рис. 3. Принципиальная схема землерезной машины «Мороз».

Для замера мощности и скорости протягивания режущей цепи на установке «Мороз» использована коробка скоростей ЗИЛ-164 (рис. 4), которая подвешена свободно (балансирно) на подшипниках качения, представляя собой редукторный динамометр. На балансирный корпус коробки скоростей действует момент M_p . Этот реактивный момент M_p стремится повернуть корпус коробки вокруг оси, совпадающей с осью первичного и вторичного валов. Зная момент M_p , можно определить момент на валу приводной звездочки исполнительного органа.

Определение момента M_p сводится к измерению усилия, препятствующего вращению коробки. Это уравнивающее усилие создается с помощью упругого силоизмерителя, в качестве которого использован пружинный динамометр 1 (рис. 2).

Один конец цилиндрической винтовой пружины 2 динамометра закреплен неподвижно, а второй связан с балансирным корпусом и приводит в движение карандаш 3. В результате на ленте 4 самописца регистрируется диаграмма усилия реактивного момента. С помощью двух барабанов 5 лента протягивается с постоянной скоростью.

Коробка скоростей автомобиля имеет устройство для привода валика спидометра. В данном случае это устройство 5 используется для привода тахометра, которым замеряется число оборотов выходного вала коробки скоростей. После соответствующего пересчета определяется скорость вращения звездочки режущего бара.

Усилие подачи режущего органа на грунт находится посредством регистрации давления жидкости в гидроцилиндре 8 с помощью двух манометров 9.

При испытаниях режущая цепь бара набиралась в «елочку» с девятью и семью линиями резания (рис. 5). Число зубков в применяемой

цепи не кратно числу зубков в веере. Поэтому цепь состояла из четырех полных и одной неполной «елочки».

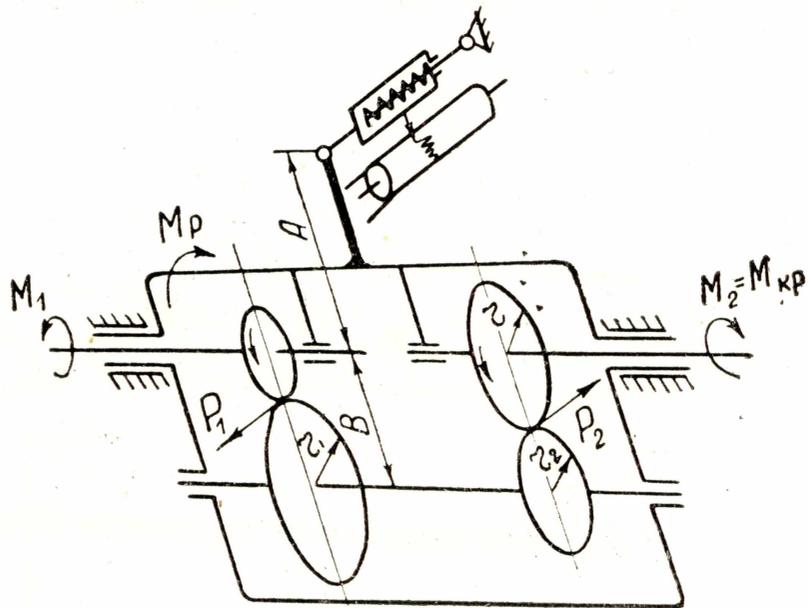


Рис. 4. Схема редукторного динамометра.

При исследованиях использовались зубки марки КМЗ-1 с нормальной державкой.

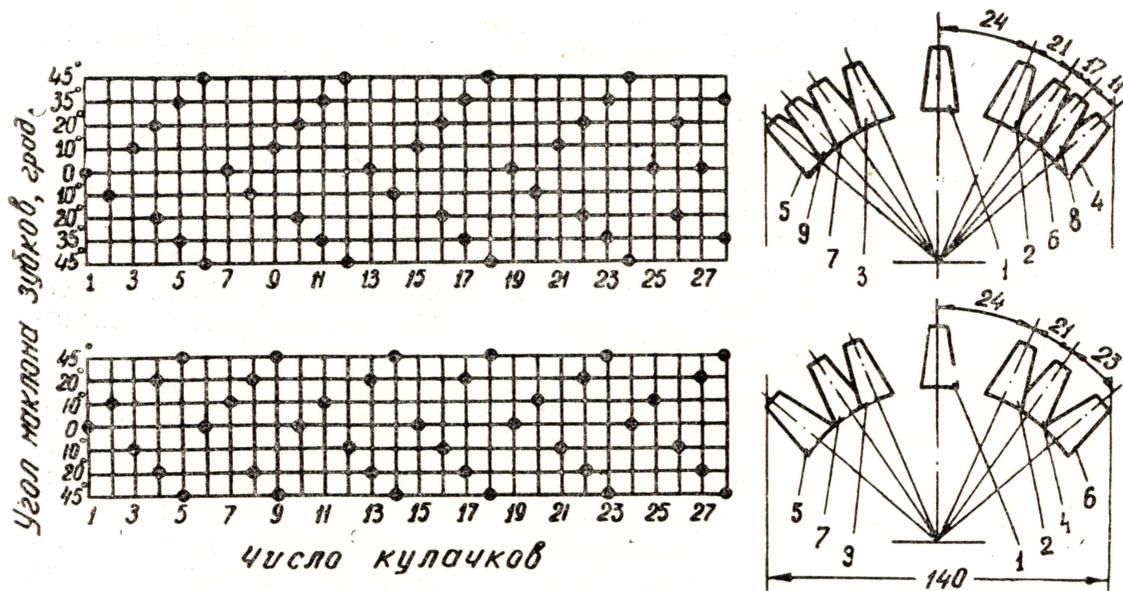


Рис. 5. Схема набора резцов режущей цепи.

Экспериментальная установка «Мороз» имеет следующую техническую характеристику.

Мощность двигателя, л. с.

— 54;

Глубина прорезаемых щелей в грунте при данном способе крепления бара максимальная, м:

при длине бара 1,9 м	— 1,3;
при длине бара 2,2 м	— 1,6;
при длине бара 2,8 м	— 2,2;
количество баров, штук	— 1;
ширина врубовой щели в зависимости от конструкции зубцов и цепей, мм	— 120—600;
скорость движения режущей цепи (20 скоростей), м/сек	— 0,4 до 5,5;
скорости перемещения установки: рабочие, м/час	— 20,4; 26,5; 35; 47; 103; 149,5; 186;
маневровые, км/час	— 1,28; 1,7; 3,8; 5,2; 6,8;
среднечасовая скорость прорезания щелей в мерзлом грунте, м/час	— 18—180;
габаритные размеры, м:	
длина, ширина, высота	— 7,8; 2,9; 2,5;
вес, кг.	— 9900.

Землерезная машина «Мороз» в описанном выше варианте предназначена для исследования режимов резания мерзлых грунтов цепными исполнительными органами. Она также может иметь и промышленное применение. В этом случае снимаются раздаточная коробка и коробка скоростей, а между валом привода ленточного конвейера коробки передач ЭТУ-353 и ведущим валом режущей части устанавливается карданный вал 6 (рис. 3).

Порядок проведения опытов

Перед началом отсчета исследуемых величин включалась режущая часть машины «Мороз» и бар заводился на необходимую глубину в грунт. Режущая цепь продолжала работать до полного выноса из щели измельченного грунта. Затем рабочий орган выключался.

На диаграмме записи усилия сжатия пружины ставится номер и дата проведения эксперимента.

Запись диаграммы деформации пружины, по которой в дальнейшем определялся крутящий момент и мощность, передаваемая режущему органу, проводилась в следующей последовательности. При выключенных механизмах подачи и резания включался механизм протягивания ленты пружинного динамометра. На ленте пишущим механизмом наносится нулевая линия a_1 (рис. 6) и параллельная ей контрольная линия a_4 . Далее включается режущая цепь и на протягиваемой ленте регистрируется деформация пружины (участок a_2). Этот участок характеризует потери холостого хода в передаче, начиная от выходного вала коробки скоростей ЗИЛ-164 и кончая режущей цепью бара. Участок a_3 диаграммы отражает суммарное усилие, расходуемое на преодоление потерь в передаче, на резание и вынос из щели измельченного грунта при включенной режущей цепи.

Установив определенную скорость резания, проводим серию опытов при изменении скорости подачи машины до полной загрузки двигателя. После этого включается следующая скорость движения режущей цепи и также последовательно увеличивается скорость подачи и т. д. Перед тем, как включить очередную скорость подачи, мерной линейкой замеряется толщина слоя измельченного грунта, остающегося в щели,

и глубина щели. При каждой установке соответствующих скоростей резания и перемещения машины регистрируются показания манометров, установленных на гидроцилиндре. Величина давления, регистрируемого манометрами, пропорциональна усилию подачи машины. Изменение

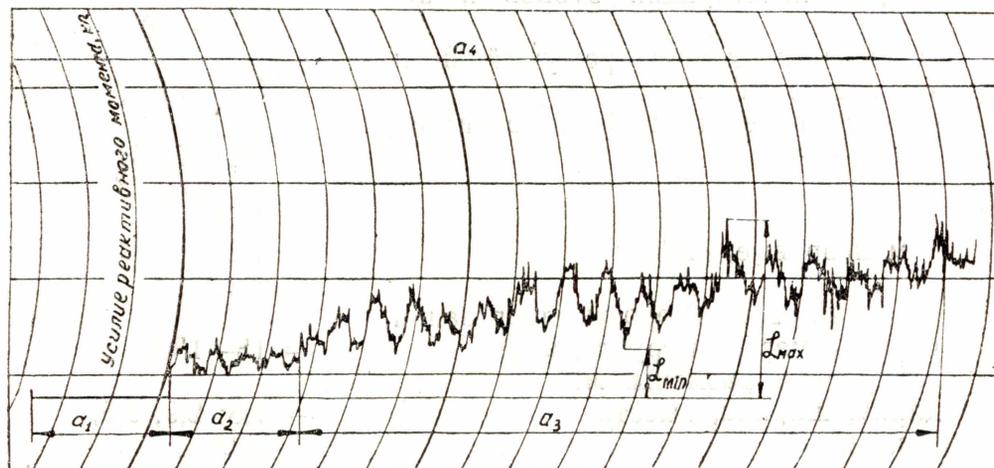


Рис. 6. Диаграмма регистрации усилий на корпусе редукторного динамометра

скоростей движения режущей цепи производилось путем изменения передаточных чисел трансмиссии. Достигалось это путем переключения коробки скоростей, раздаточной коробки и редуктора режущей части машины КМП. В процессе проведения опытов число оборотов звездочки бара регистрируется тахометром. На каждой скорости подачи и резания проводилось не менее восьми экспериментов. Длина щели, прорезаемая этим баром, равнялась 5—8 м. Скорость подачи машины «Мороз» подсчитывается путем замера расстояния, пройденного машиной за опыт, и продолжительности опыта.

Крепость разрабатываемого грунта определялась с помощью ударника ДорНИИ [9]. Все величины, полученные при выполнении каждого опыта, вносятся в журнал наблюдений.

Обработка экспериментальных данных

Из диаграммы деформации пружины динамометра путем расчета находятся следующие величины:

- а) усилие, деформирующее пружину;
- б) реактивный момент M_p ;
- в) крутящий момент на выходном валу редукторного динамометра M_2 (рис. 4);
- г) крутящий момент на приводной звездочке режущей цепи $M_{зв}$;
- д) среднее усилие протягивания режущей цепи;
- е) среднее усилие протягивания режущей цепи, отнесенное к одному резцу;
- ж) средняя мощность, расходуемая на разрушение грунта, преодоление сил трения цепи о стенки ручья бара и зубков о грунт;
- з) мощность, расходуемая на транспортирование измельченного грунта.

Формулы для вычисления всех этих параметров и определения ошибок их вычисления и величины относительных ошибок приведены в табл. 1. В табл. 2 приведены коэффициенты, использование которых значительно упрощает расчет крутящего момента на выходном валу редукторного динамометра.

Таблица 1

Наименование определяемой величины	Расчетная формула	Формула определения относительной ошибки измерения величины	Относительная ошибка, %	Примечания (константы машины принимаются по технической характеристике)
1	2	3	4	5
Средняя величина деформации пружины динамометра, мм	$L_{cp} = \frac{L_{cp}^{max} + L_{cp}^{min}}{2} - L_{x. x.}$	$\frac{\Delta L'_{cp}}{L'_{cp}} = \frac{\Delta L^{max}}{L^{max}}; \quad \frac{\Delta L''_{cp}}{L''_{cp}} = \frac{\Delta L^{min}}{L^{min}}$	12	<p>L' и L'' — соответственно максимальные и минимальные значения деформации пружины. Находятся из диаграммы</p>
Средняя величина минимальных деформаций пружины, мм	$L_{cp}^{max} = \frac{L'_1 + L'_2 + \dots + L'_m}{m}$	$\frac{\Delta L''_{cp}}{L''_{cp}} = \frac{\Delta L_{x. x.}}{L_{x. x.}}$		
Средняя величина максимальных деформаций пружины, мм	$L_{cp}^{min} = \frac{L''_1 + L''_2 + \dots + L''_m}{m}$			
Среднее значение реактивного усилия, кг	$P_p = L_{cp} \kappa$			<p>κ — коэффициент пропорциональности тарировочной кривой пружины (рис. 7)</p>
Крутящий момент на выходном валу редукторного динамометра (рис. 4), кгм	$M_2 = \frac{P_p A r}{B \left(1 - \frac{r_2}{r_1}\right)} = P_p \kappa_1 \cdot \kappa_2$	$\frac{\Delta M_2}{M_2} = \frac{\Delta L_{cp}}{L_{cp}} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$	10	
Крутящий момент на приводной звездочке режущей цепи, кгм	$M_{зв} = M_2 \cdot i_p$			<p>i_p — передаточное число редуктора режущей части. $i'_p = 6,25$; $i''_p = 12,32$</p>
Усилие протягивания режущей цепи при разрушении грунта, кг	$P_{рез} = \frac{2(M_2 - M_{тр}) i_p}{D} = \frac{2M'_2 i_p}{D}$	$\frac{\Delta P_{рез}}{P_{рез}} = \frac{\Delta M'_2}{M'_2} + \frac{\Delta D}{D}$	10	<p>D — средний диаметр ведущей звездочки режущей цепи. $D = 303$ мм</p>
Крутящий момент, расходуемый на преодоление сил трения в ручье бара, кгм	$M_{тр} = \frac{P_{пф} D}{2}$			
Усилие подачи рабочего органа на грунт, кг	$P_{п} = \frac{P_{шт} \cos(\delta + \lambda - \lambda_H)}{\sin \lambda_H}$	$\frac{\Delta P'_{п}}{P'_{п}} = \frac{\Delta p}{p} + \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta \cos \delta}{\cos \delta} +$		<p>Усилие на штоке гидроцилиндра $P_{шт} = F_{п} \cdot p$. $F_{п} = 226$ см²; p — давление масла в цилиндре. $R = 320$ см;</p>

1	2	3	4	5
	$\frac{-90^\circ - \alpha) R + G_H l_{HO} \cos \lambda_H}{\frac{H_1}{\sin \lambda_H}}$	$+ \frac{\Delta \cos \alpha}{\cos \alpha} + \frac{\Delta H_1}{H_1}$	14,0	$G_H = 320 \text{ кг}; H_1 = 95 \text{ см};$ $l_{HO} = 126 \text{ см}$ (рис. 8)
Число одновременно работающих резцов, шт	$n_{p.p.} = \frac{H_{ш} z}{t_p \cdot z_k}$	$\frac{\Delta P_{п}'}{P_{п}'} = \frac{\Delta p}{p} + \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta \sin \alpha}{\sin \alpha} + \frac{\Delta H_1}{H_1}$	4,0	$H_{ш} = 1,6 \text{ м}$ глубине щели; $z = 42$ резца при длине бара 2,2 м; $z = 28$ кулаков в цепи; $t = 190 \text{ мм}$ — шаг цепи
Усилие протягивания режущей цепи при резании грунта, отнесенное к одному резцу	$P_{o. \text{рез}} = \frac{P_{\text{рез}}}{n_{p.p.}}$	$\frac{\Delta P_{o. \text{рез}}}{P_{o. \text{рез}}} = \frac{\Delta P_{\text{рез}}}{P_{\text{рез}}} + \frac{\Delta n_{p.p.}}{n_{p.p.}}$	14,0	
Мощность, расходуемая на резание и транспортирование мерзлого грунта из щели, л.с.	$N = \frac{M'_2 i_p n_{зв}}{71620} = \frac{P_{\text{рез}} D \cdot n_{зв}}{143240}$	$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta M'_2}{M'_2} + \frac{\Delta n_{зв}}{n_{зв}}$	12,5	$n_{зв}$ — число оборотов ведущей звездочки
Скорость движения режущей цепи, м/сек	$v_{p. \text{ц.}} = \frac{\pi D \cdot n_{зв}}{60}$	$\frac{\Delta v_{p. \text{ц.}}}{v_{p. \text{ц.}}} = \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta n_{зв}}{n_{зв}}$	4,0	
Рабочая скорость подачи машины, м/мин	$v_{п} = \frac{L}{t}$	$\frac{\Delta v_{п}}{v_{п}} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta t}{t}$	2,0	L — длина пути, пройденного землерезной машиной за отрезок времени t
Средняя толщина стружки, снимаемой резцом, мм	$h_{ср} = \frac{b t_p z_k v_{п}}{60 z v_{p. \text{ц.}}}$	$\frac{\Delta h_{ср}}{h_{ср}} = \frac{\Delta t_p}{t_p} + \frac{\Delta v_{п}}{v_{п}} + \frac{\Delta v_{pц}}{v_{pц}}$	5,0	$b = 9$ или 7 линий резания в цепи
Удельные затраты энергии при резании грунта, квт ч/м ³	$W = 0,0272 \frac{P_{\text{рез}}}{S}$	$\frac{\Delta W}{W} = \frac{\Delta P_{\text{рез}}}{P_{\text{рез}}} + \frac{\Delta S}{S}$	10,0	$S = 0,22 \text{ см}^2$ — наименьшая величина поперечного сечения стружки

Различный гранулометрический состав, влажность и колебания температуры грунта предопределяют нестабильность его физико-механических свойств. Поэтому для получения достоверных данных по измеряемым величинам, характеризующим процесс разрушения, при постоянных параметрах опыт повторялся многократно.

Необходимое и достаточное число повторных опытов определится

$$N_0 = t_0^2 \frac{\kappa_{\text{вар}}^2}{\kappa_{\text{доп}}^2},$$

где t_0 — 1,65—2,0 — нормированное отклонение средней арифметической ряда опытов от единичного замера [8];

$\kappa_{\text{доп}}$ — 5—10% — величина допустимой ошибки при выполнении исследовательских работ [7].

$\kappa_{\text{вар}}$ — наибольшее значение коэффициента вариации для данной серии опытов.

Необходимое число опытов при резании талого грунта

$$N_{\text{от}} = 1,8^2 \frac{29,4^2}{8^2} = 42,6 \approx 43 \text{ опыта,}$$

для мерзлого грунта

$$N_{\text{ом}} = 1,8^2 \frac{15,8^2}{8^2} = 12,7 \approx 13 \text{ опытов.}$$

Для оценки разброса опытных данных подсчитанного числа экспериментов относительно усредняющей кривой, характеризующей закономерность изменения данной величины в зависимости от какого-либо параметра, подсчитывается коэффициент вариации всего поля точек

$$\kappa_{\text{вар. ср}} = \sqrt{\frac{\sum \kappa_m^2}{n-1}},$$

где κ_m — отклонение данной величины относительно усредняющей кривой, %.

Таблица 2

Скорость передачи	I	II	III		V
Передаточные числа коробки скоростей ЗИЛ-164	6,24	3,32	1,90	1	0,81
$\kappa_2 = \frac{r}{1 - \frac{r_2}{r_1}}$	0,141	0,160	0,247	0	0,513
$\kappa_1 \cdot \kappa_2$	0,472	0,535	0,822	0	1,71

Результаты, полученные в процессе проведения опытов и при обработке диаграмм, заносятся в таблицу опытных данных. По опытным данным строятся графики исследуемых зависимостей.

Проведенные по данной методике исследования процессов резания талого и мерзлого грунтов позволили определить коэффициенты вариации данных, которые для крутящего момента при талом и мерзлом грунте меньше 20%, а для усилия подачи — меньше 30%. В первом

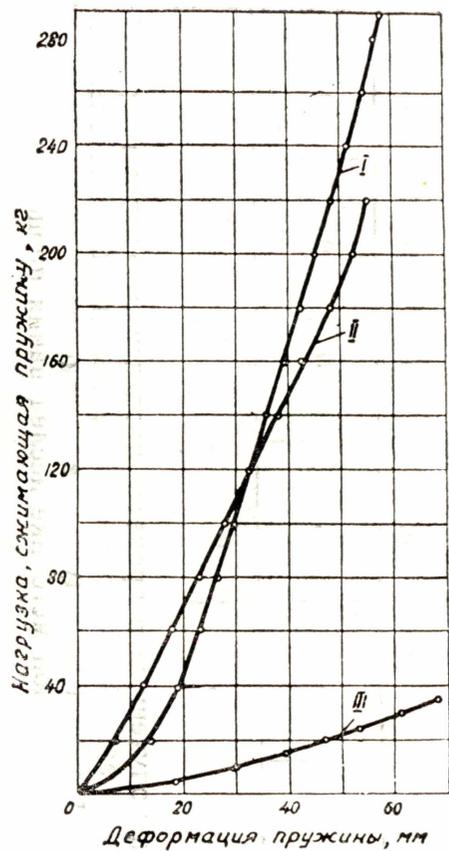


Рис. 7. Кривые жесткости пружин динамометра, исследуемых для замера результирующего усилия при скоростях резания: I—0,43 и 0,78 м/сек; II—1,3 и 2,3 м/сек; III—3,4 и 5,4 м/сек.

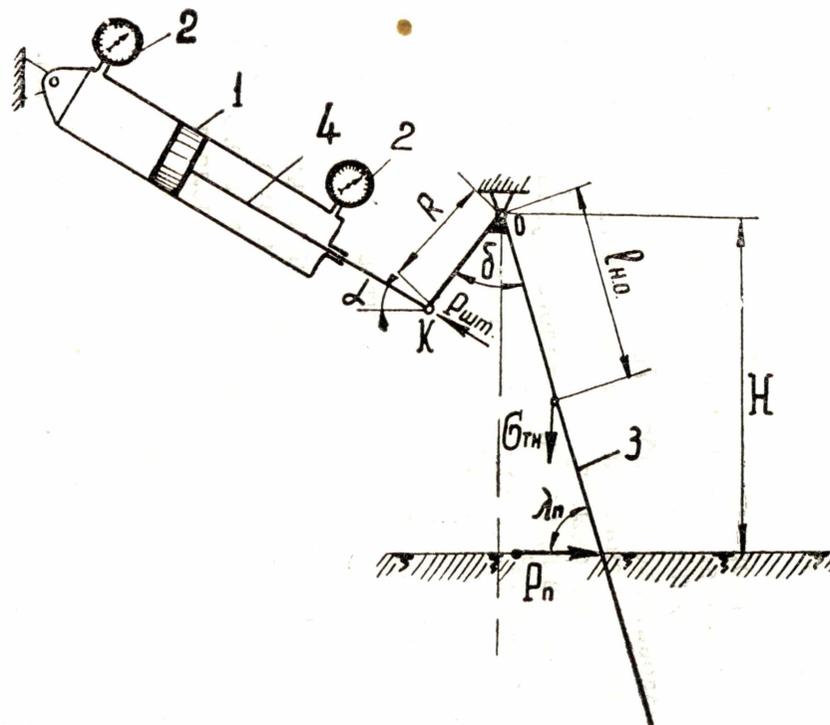


Рис. 8. Кинематическая схема механизма заводки бара.

случае показатели относятся ко второму, а во втором случае — к третьему классу точности показателей и расчетов. Ко второму классу точности относятся расчеты, которые в технике принято рассматривать как «точные». Данные третьего класса точности также пригодны для использования в технических расчетах [7].

Таким образом, экспериментальная установка «Мороз» обеспечивает получение данных, необходимых для проектирования и создания новых баровых машин для резания мерзлого грунта.

ЛИТЕРАТУРА

1. О. Д. Алимов. Задачи исследований баровых машин, применяемых для разрушения мерзлых грунтов. Известия ТПИ, т. 123, Томск, 1963.
2. О. Д. Алимов, И. Г. Басов, З. М. Пратусевич. Резание мерзлого грунта установкой УРМГ-60. ЦБТИ и НТО Стройиндустрия, Томск, 1962.
3. О. Д. Алимов, И. Г. Басов. Землерезные установки на базе экскаваторов ЭТУ-353. Механизация строительства, № 9, 1963.
4. О. Д. Алимов. Опыт создания баровых землерезных машин на базе траншейных экскаваторов. Статья в данном сборнике.
5. О. Д. Алимов, И. Г. Басов, Б. Л. Степанов. Машины для резания мерзлого грунта с цепными баровыми органами. Известия ТПИ, т. 123, Томск, 1963.
6. О. Д. Алимов. Механизация пересадки деревьев зимой. Лесное хозяйство, № 12, 1962.
7. Л. И. Барон. О точности основных технологических показателей и инженерных расчетов процессов добычи руд. Известия АН СССР, ОТН, № 9, 1951.
8. С. Н. Бернштейн. Теория вероятностей. Гостехиздат, 1946.
9. А. П. Зеленин. Физические основы теории резания грунтов. Изд. АН СССР, 1950.