

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАНАТНЫХ СКРЕПЕРОВ

Н. П. Грачев

1. Взаимодействие сил при работе скрепера в период зачерпывания

В предлагаемой статье приводятся результаты исследований взаимодействия сил при работе скрепера в период зачерпывания материала и устанавливаются основные технические параметры канатных скреперов.

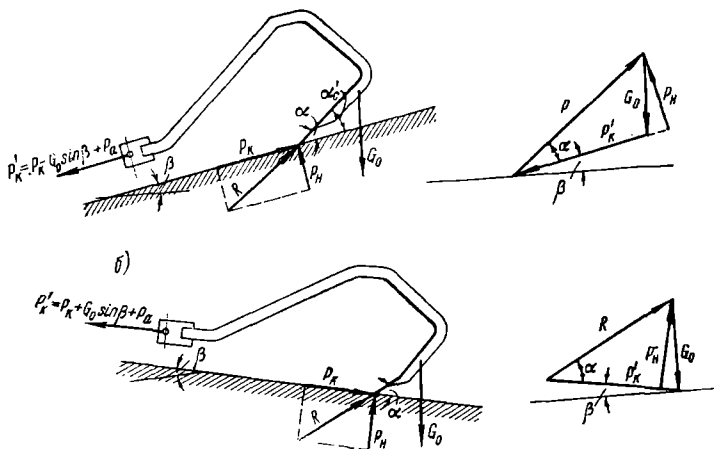


Рис. Взаимодействие сил при работе скрепера:
а — под уклон; б — на подъеме

В качестве исходной, характеризующей процесс копания грунтов (или процесс зачерпывания насыпных материалов) ковшами землеройных машин, принимаем известную формулу Н. Г. Домбровского [2]

$$P_k = K_1 ab, \quad (1)$$

где K_1 — удельное сопротивление копанию (или зачерпыванию), $\text{кг}/\text{м}^2$;
 a, b — соответственно толщина и ширина слоя материала, м ;

В соответствии с рис. 1 принимаем следующие обозначения:

G_0 — собственный вес скрепера, кг ;

β — угол наклона поверхности скреперования, град.;

α — угол внедрения скрепера, град.;

- R — реакция грунта (или насыпного материала) или усилие внедрения лезвия скрепера в материал, кг;
 P_k — касательная сила копания к направлению движения скрепера, кг;
 P_n — нормальная сила копания (или зачерпывания), кг;
 P_k' — тяговое усилие на канате в конце заполнения ковша скрепера, кг;
 P_a — сила сопротивления, обусловленная ускорением массы груза и скрепера, кг.

В. И. Геронтьев [1], А. Н. Зеленин [3] и другие авторы считают, что максимальное внедряющее действие лезвия достигается при R — равнодействующей силе P_k' и G_0 , параллельной плоскости внедрения скрепера.

Однако определение этих сил до сих пор является неразрешенной задачей.

Искомые силы, действующие на скрепер в период заполнения, могут быть определены аналитически или найдены графическим построением векторной силовой диаграммы.

Силой сопротивления P_a , обусловленной ускорением масс груза и скрепера, пренебрегаем вследствие незначительной ее величины.

Сопротивление сил инерции

$$P_a = \left(\frac{K_n U \gamma_0 + G_0}{K_p'} \right) \frac{a'}{g}, \text{ кг}, \quad (2)$$

где U — емкость скрепера, $м^3$;

γ_0 — вес грунта в массиве, $т/м^3$;

K_n — коэффициент наполнения скрепера;

K_p' — коэффициент разрыхления грунтов (табл. 1);

a' — ускорение движения груза и скрепера ($a' = 0,2 + 0,5$), $м/се$ $сек^2$;

g — ускорение свободного падения, $м/сек^2$.

Таблица 1

Средние значения коэффициента
разрыхления грунтов

Грунт	K_p'
Очень мягкий	1,10
Легкий	1,20
Средний	1,25
Тяжелый	1,33
Очень тяжелый	1,48

Величина P_a как видно из формулы, составляет лишь 2—5% от собственного веса скрепера и веса груза.

Так как P_k и P_n являются составляющими силы R , то конструктивно возможная ее величина

$$R = \frac{P_k}{\cos \alpha}, \quad (3)$$

Действительно, потребная величина R , в соответствии с физико-механическими свойствами материала,

$$R = \frac{K_{lab}}{\cos \alpha} \quad (3')$$

Как видно из формулы (3'), величина R в значительной степени зависит от α .

Исследование процесса зачерпывания материала показывает, что наполнение скрепера происходит примерно по прямой. На рис. 2 пунктирными линиями изображены кривые, показывающие действительное заполнение скрепера на всей длине пути зачерпывания материала. Следовательно, величина a для данного материала при заполнении ковша скрепера остается неизменной.

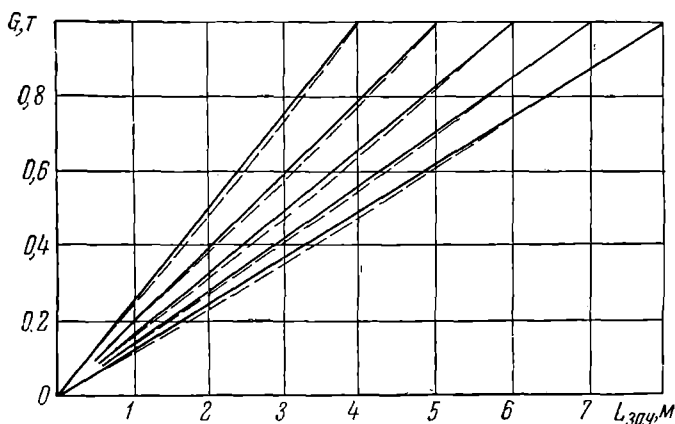


Рис. 2. Кривые, характеризующие процесс заполнения скрепера материалом в зависимости от длины пути зачерпывания

Численные значения касательного сопротивления пород зачерпыванию скрепера, приведенные в табл. 2, определены нами экспериментально.

Таблица 2

Значения удельного касательного сопротивления пород зачерпыванию K_1 для канатных скреперов

Породы (хорошо взорваны)	Коэффициент крепости пород по Протоdjаконову	Удельное касательное сопротивление пород зачерпыванию скрепера, кг/м ²
Песчанистый и глинистый сланцы	4	800—1200
Известняки	4—6	1200—3000
Конгломерат тяжелый и железная руда	6—12	3000—5000
Гранит и кварцит	12—18	5000—6500

Примечание. Меньшие значения K_1 получены при малых углах внедрения скрепера (менее 40°), большие значения K_1 — при углах внедрения свыше 40°.

Из равенства для насыпных материалов

$$U = abL_{\text{зач}} \quad (4)$$

находим

$$a = \frac{U}{bL_{\text{зач}}}$$

где $L_{\text{зач}}$ — длина пути зачерпывания, м.

Из равенства для грунтов

$$K_n U = K_p' abL_{\text{зач}} \quad (5)$$

имеем

$$a = \frac{K_n U}{K_p' b L_{\text{зач}}}$$

Подставив в формулу (3') значения a , получим: для насыпных материалов

$$R = \frac{K_1 U}{h_{\text{зач}} \cos \alpha}, \quad (6)$$

для грунтов

$$R = \frac{K_1 K_n U}{K_p' L_{\text{зач}} \cos \alpha} \quad (7)$$

2. Тяговые усилия в канате

Тяговые усилия на канате в начале заполнения ковша скрепера

$$P_k' = P_k \pm G_0 \sin \beta \quad (8)$$

или при работе на насыпных материалах

$$P_k' = \frac{K_1 U}{L_{\text{зач}}} \pm G \sin \beta, \quad (9)$$

при работе на грунтах

$$P_k' = \frac{K_1 K_n U}{K_p' L_{\text{зач}}} \pm G \sin \beta. \quad (10)$$

Тяговое усилие на канате в конце заполнения ковша скрепера

$$P_k'' = P_k \pm (G + G_0) \sin \beta, \quad (11)$$

где G — вес груза в скрепере, кг.

При работе на насыпных материалах

$$P_k'' = \frac{K_1 U}{L_{\text{зач}}} \pm (G + G_0) \sin \beta, \quad (12)$$

при работе на грунтах

$$P_k'' = \frac{K_1 K_n U}{K_p' L_{\text{зач}}} \pm (G + G_0) \sin \beta. \quad (13)$$

Формула (13) вполне применима для расчета усилия на тяговом канате при работе скрепера в различных грунтах и насыпных материалах.

При $\beta = 0$ формула (13) принимает вид

$$P_k'' = \frac{K_1 K_n U}{K_p' L_{\text{зач}}}, \text{ кг.} \quad (14)$$

Как следует из формулы (13), тяговое усилие на канате в конце наполнения скрепера зависит от физических свойств материала, емкости скрепера, длины пути зачерпывания, угла наклона поверхности скрепления и других факторов.

Скорость копания ниже 6 м/сек не оказывает практически ощутимого влияния на сопротивление грунтов (или насыпных материалов) [2, 3]. Однако четкой экспериментальной зависимости этих показателей еще не установлено.

Наличие зубьев, как указывает А. Н. Зеленин, резко снижает сопротивление резанию, а усилия резания снижаются до 40% по сравнению

резанием горизонтальным профилем без зубьев. А. Н. Зеленин считает, что зубьями должны снабжаться все ковши независимо от разрабатываемого грунта [3]. Однако, как показывают наши опыты, при работе скрепера на вязких грунтах наличие зубьев почти не влияет на уменьшение усилия резания.

Наличие правильно поставленных зубьев в ковше при связных грунтах, по мнению Н. Г. Домбровского, дает уменьшение сопротивления копанью, достигающее в наиболее плотных грунтах до 40% [2].

Выводы А. Н. Зеленина и Н. Г. Домбровского о влиянии зубьев на усилие резания подтверждены нашими опытами с ящичным скрепером емкостью 0,45 м³.

Опыты проводились с различными сыпными материалами в производственных условиях. Установлено, что для наполнения скрепера зубьями требуется меньшее тяговое усилие, чем при работе скрепера без зубьев (табл. 3). Длина пути зачерпывания при скрепере с зубьями сокращается до 5 м вместо 8 м при скрепере без зубьев.

Таблица 3

Значение тяговых усилий

Ящичный скрепер	Средние значения тяговых усилий, кг	Примечание
Без зубьев	980	Толщина режущей кромки δ 20 мм
С зубьями	710	

Следовательно, в формулы (9), (10), (12) и (13) для случая работы скрепера с зубьями необходимо ввести коэффициент, учитывающий уменьшение сопротивления копанью при наличии зубьев в скрепере. Обозначив этот коэффициент через K_0 , получим общую формулу для расчета тягового усилия на канате при работе скрепера в период наполнения в различных грунтах, сыпных материалах, в различных условиях

$$P_k'' = \frac{K_1 K_n K_0 U}{K_p' L_{\text{зач}}} \pm (G + G_0) \sin \beta, \text{ кг.} \quad (15)$$

Для работы скрепера на различных грунтах нами экспериментально установлены следующие значения коэффициента K_0 : на вязких 0,9 — 1,0; на сыпучих 0,75 — 1,0; на взорванных 0,5 — 0,8.

Как видно из формулы (15), усилие на канате является прямой функцией емкости скрепера.

3. Теоретическое исследование собственного веса скрепера

Предлагаемое исследование собственного веса скрепера не исчерпывает всей полноты и сложности вопроса и должно рассматриваться как первое приближение к его разрешению.

1. **Собственный вес скрепера при доставке вниз.** Из силового треугольника рис. 1, а следует, что для обеспечения внедрения лезвия в материал в начале заполнения скрепера должно быть соблюдено условие

$$G_0 \geq R \sin(\alpha + \beta) - P_k \sin \beta, \quad (16)$$

но

$$R \cos(\alpha + \beta) = P_k \cos \beta.$$

Отсюда находим

$$R = P_k \frac{\cos \beta}{\cos (\alpha + \beta)} \quad (17)$$

После подстановки значения R в формулу (16) и преобразования получим необходимый собственный вес скрепера

$$G_0 = \frac{P_k}{\frac{\cos \beta}{\operatorname{tg} \alpha} - \sin \beta} \quad (18)$$

2. Собственный вес скрепера при работе вверх. По аналогии с предыдущим, на основании рис. 1, б, находим

$$G_0 \geq R \sin (\alpha - \beta) + P_k \sin \beta, \quad (19)$$

де

$$R = \frac{P_k \cos \beta}{\cos (\alpha - \beta)}$$

После подстановки значения R в формулу (19) и соответствующих преобразований

$$G_0 = \frac{P_k}{\frac{\cos \beta}{\operatorname{tg} \alpha} + \sin \beta} \quad (20)$$

3. Общий вид формулы для определения собственного веса скрепера. Так как формулы (18) и (20) отличаются только знаками, приводим их к единому виду

$$G_0 = \frac{P_k}{\cos \beta \operatorname{ctg} \alpha \pm \sin \beta} \quad (21)$$

Заменяя P_k выражением $\frac{K_1 U}{Z_{\text{зач}}}$, получим формулу для определения собственного веса скрепера при работе на насыпных материалах

$$G_0 = \frac{K_1 U}{L_{\text{зач}} (\cos \beta \operatorname{ctg} \alpha \pm \sin \beta)} \quad (22)$$

При $\beta = 0^\circ$

$$G_{0r} = \frac{K_1 U}{L_{\text{зач}}} \operatorname{tg} \alpha. \quad (23)$$

Собственный вес скрепера при копании грунта скреперами без зубьев

$$G_0 = \frac{K_1 K_H U}{K_0' L_{\text{зач}} (\cos \beta \operatorname{ctg} \alpha \pm \sin \beta)}, \quad (24)$$

скреперами с зубьями

$$G_0 = \frac{K_1 K_H K_0 U}{K_p' L_{\text{зач}} (\cos \beta \operatorname{ctg} \alpha \pm \sin \beta)} \quad (25)$$

При $\beta = 0^\circ$ формула (25) примет вид

$$G_0 = \frac{K_1 K_H K_0 U}{K_p' L_{\text{зач}}} \operatorname{tg} \alpha. \quad (26)$$

Как следует из формулы (25), собственный вес ковша зависит от удельного сопротивления копанию (или зачерпыванию), емкости скрепера, длины пути зачерпывания, угла наклона поверхности скольжения

к горизонту и угла внедрения лезвия. Вопрос сводится к выбору угла внедрения (или зачерпывания) α . Для каждого насыпного материала (или грунта) угол внедрения α в практике принимается постоянным при различных условиях работы.

Проанализируем, как изменяется собственный вес ковша при постоянном значении α .

Результаты подсчетов по формуле (22) при $\alpha = 45^\circ$, $K_1 = 5000 \text{ кг/м}^2$ $L_{\text{зач}} = 5 \text{ м}$ приведены в виде кривых на рис. 3. Собственный вес скрепера постоянным углом наклона лезвия при работе на подъеме значительно увеличивается по сравнению с собственным весом скрепера при работе по горизонтали.

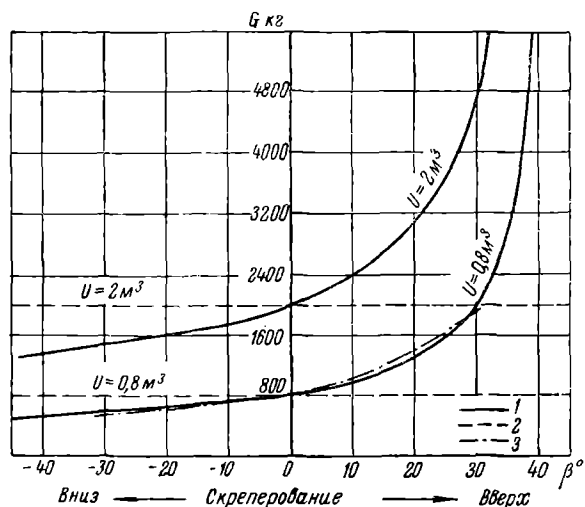


Рис. 3. Зависимость собственного веса скрепера от угла наклона поверхности скреперования:
при $\alpha = \text{const}$ — теоретическая кривая; 2 — при переменном значении α ;
3 — при $\alpha = \text{const}$ — экспериментальная кривая

Следовательно, для создания устойчивого режима зачерпывания при работе по горизонтали и на подъеме или под уклон целесообразный собственный вес скрепера должен определяться только для условий работы по горизонтали. При этом угол внедрения необходимо определять в зависимости от угла наклона поверхности скреперования к горизонтали.

Как показали произведенные нами опыты на одном из рудников Казахстана, собственный вес скрепера с постоянным углом внедрения лезвия в значительной степени зависит от угла наклона поверхности скреперования: он уменьшается с увеличением угла наклона при скреперовании под уклон и значительно повышается с увеличением угла при работе скрепера на подъеме.

Опыты ставились в очистных забоях при следующих условиях. Руда крупнокусковая (максимальный размер куса 400 мм) с насыпным весом $\gamma = 2 \text{ т/м}^3$, крепостью $f = 8-10$ (по шкале Протодьяконова) и углом естественного откоса $45-48^\circ$. Угол падения $17-37^\circ$. Почва сравнительно ровная, крепкая. Гребковый скрепер емкостью $0,8 \text{ м}^3$. Ширина скрепера применялась переменная — соответствующая углу наклона поверхности скреперования.

В процессе опытов собственный вес скрепера подбирался таким, при котором обеспечивалось наполнение скрепера на 5-метровом пути зачерпывания.

Как видно из рис. 3, результаты теоретического и экспериментального исследований собственного веса скрепера совпадают достаточно хорошо.

Таким образом, существенным фактором при работе скрепера является величина угла внедрения. Пренебрегать этим фактором при определении величины собственного веса скрепера, очевидно, было бы неправильно.

4. Теоретическое и экспериментальное исследование угла внедрения

Зависимость угла внедрения лезвия скрепера от угла наклона поверхности скреперования может определяться достаточно точно и просто, исходя из изложенного выше положения об определении наиболее целесообразной величины собственного веса скрепера для работы в период зачерпывания при различных углах наклона поверхности скреперования, т. е. полагая

$$G_{0r} = G_0$$

или

$$\frac{K_1 U}{L_{зач}} \operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{K_1 U}{L_{зач} (\cos \beta \operatorname{ctg} \alpha \pm \sin \beta)}$$

После ряда несложных преобразований находим

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\cos \beta}{\operatorname{ctg} \alpha_0 \pm \sin \beta} \quad (27)$$

Здесь знак «минус» принимается при работе скрепера на подъеме, а знак «плюс» — при работе под уклон.

Таким образом получилось весьма простое выражение для α . При $\beta = 0^\circ$ формула (27) приводится к виду

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha_0$$

$$\alpha = \alpha_0.$$

Анализ кривых рис. 4, где показана зависимость угла внедрения скрепера от угла наклона поверхности скреперования свидетельствует о следующем.

1. Угол внедрения скрепера при работе на подъеме увеличивается, а при работе под уклон уменьшается. Между углом внедрения скрепера и углом наклона поверхности скреперования существует линейная зависимость.

2. Угол наклона лезвия скрепера наиболее целесообразно назначать, исходя из условий работы скрепера в период наполнения при определенном угле наклона поверхности скреперования.

Как установлено нашими исследованиями, угол внедрения лезвия скрепера зависит главным образом от угла естественного откоса материала в покое Θ_0 , угла наклона поверхности скреперования к горизонту, а также от длины пути и удельной работы зачерпывания.

Экспериментально нами получена следующая формула в общем виде:

$$\alpha = K\Theta_0 \pm 0,5\beta, \quad (28)$$

где K — коэффициент сопротивления материала зачерпыванию, который зависит от удельной работы зачерпыванию длины пути и равен

$$\frac{K_1}{L_{зач}}$$

В формуле (28) знак «плюс» принимается при работе скрепера на подъеме, знак «минус» — под уклон.

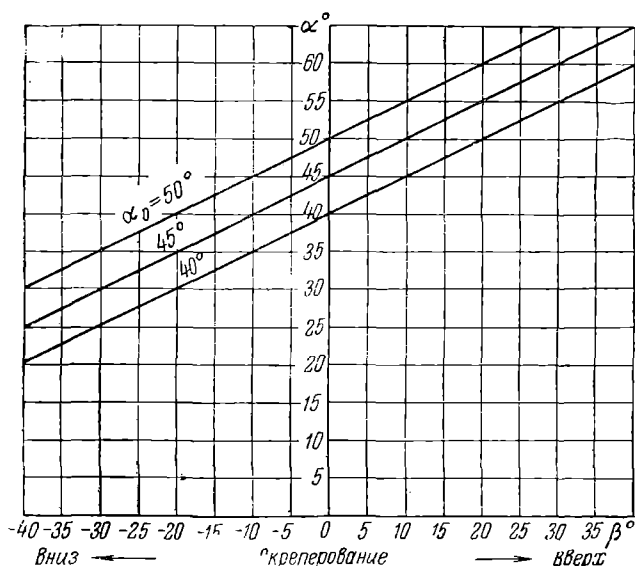


Рис. 4. Зависимость угла внедрения лезвия скрепера от угла наклона поверхности скольжения к горизонтали при $G_0 = \text{const}$

Обозначив в формуле (28) выражение $K\Theta_0$ через α_0 , получим

$$\alpha = \alpha_0 \pm 0,5\beta. \quad (29)$$

При $\beta = 0^\circ$ $\alpha = \alpha_0$

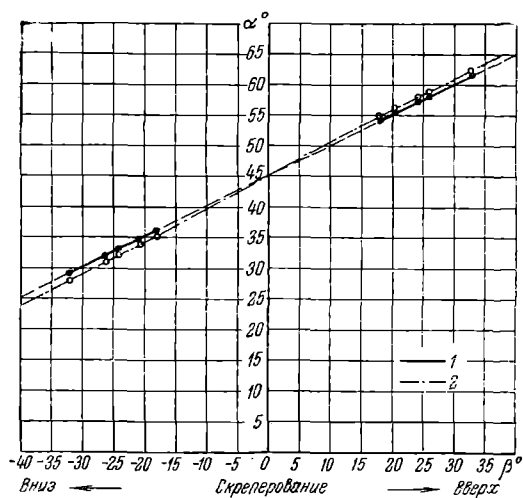


Рис. 5. Зависимость угла внедрения от угла наклона поверхности скрепования при $G_0 = \text{const}$:

— теоретически; 2 — экспериментально

Результаты вычислений по аналитической формуле (27) и опытные данные представлены в виде кривых на рис. 5. При этом были приняты следующие условия: скрепер гребкового типа емкостью $0,75 \text{ м}^3$, собственный

вес его 800 кг, длина пути зачерпывания 5 м, угол естественного откоса 40°, руда крепкая (10—12 по шкале Протоджяконова), тяжелая и крупнокусковая (максимальный размер куска 250 мм). Как видно на рис. 5, опытные точки за небольшими исключениями достаточно удовлетворительно группируются вблизи расчетной кривой, построенной по формуле (27). Следовательно, формула (27) достаточно точна для практических расчетов.

Таблица 4

Сравнение результатов вычисления по аналитической (27) и эмпирической (28) формулам

Расчет по формуле	Угол наклона поверхности скреперования, град.								
	0	10	15	20	25	30	35	40	45
	Угол внедрения, град.								
	Скреперование вниз								
(27)	45	42	40	37°30'	35	32°30'	30	27°30'	25
(28)	45	42°30'	40	37 30	35	32 30	30	27 30'	25
Скреперование вверх									
(27)	45	47	50	52°30'	55	57°30'	60	62°30'	65
(28)	45	47°30'	50	52 30	55	57 30	60	62 30	65
								67 30	67 30

Примечание. $\alpha_0 = 45^\circ$

Как следует из табл. 4, расчеты, произведенные для одних и тех же условий, аналитически и экспериментально, полностью совпадают.

5. Зависимость собственного веса ковша скрепера от углов внедрения и угла наклона поверхности скреперования

Установлено (рис. 6), что с увеличением угла внедрения значительно увеличивается собственный вес скрепера. Следовательно, с увеличением собственного веса скрепера увеличивается также сила тяги, необходимая для заполнения ковша материалом. Поэтому угол внедрения необходимо назначать как можно меньшим. Однако при углах внедрения до 25° собственный вес скрепера конструктивно получается больше расчетного, так как для достижения прочности он изготавливается из листовой стали толщиной от 8 до 20 мм.

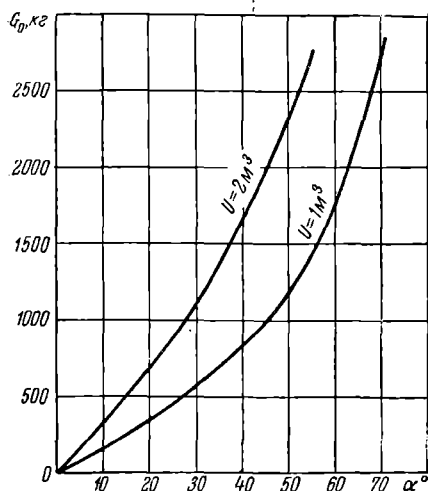


Рис. 6. Зависимость собственного веса скрепера от угла внедрения лезвия

На рис. 7 приведены кривые, выражающие зависимость собственного веса скрепера и тягового усилия на канате в начале заполнения его материалом от угла наклона поверхности скреперования к горизонтали и угла внедрения при постоянной касательной силе зачерпывания к направлению движения скрепера.

Анализ графиков (рис. 6 и 7) приводит к следующему заключению.

1. Скреперование на подъеме является весьма энергоемким (рис. 7). Оно может быть рекомендовано в исключительных случаях, напри-

мер, под водой, при работах по золошлакоудалению в котельных и др.

2. Собственный вес скрепера должен для различных условий работы при одинаковых характеристиках разрабатываемого материала приниматься неизменным. При этом угол наклона лезвия скрепера определяется в зависимости от угла наклона поверхности скреперования.

В практике скреперных работ этот принцип не соблюдается. Скреперование материала по наклонным поверхностям производится теми же скреперами, что и по горизонтали. Это приводит к недопустимому использованию конструктивной мощности скреперной лебедки.

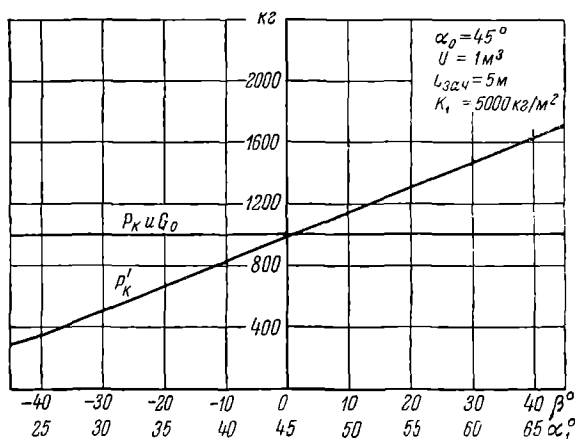


Рис. 7. Зависимость собственного веса скрепера и тягового усилия на канате в начале заполнения от угла наклона поверхности скреперования к горизонтали и угла внедрения при постоянной касательной силе зачерпывания к направлению движения скрепера

3. Касательная сила зачерпывания или копания по направлению движения скрепера должна для данного материала приниматься неизменной при любых углах наклона поверхности скреперования, т. е. $P_K = \text{const}$.

4. Значения сил тяги и внедрения в зависимости от угла наклона поверхности скольжения к горизонтали при $G_0 = \text{const}$ изменяются в широких пределах.

Таким образом, при определении сил, действующих на скрепер в период наполнения, исходной и постоянной величиной является собственный вес скрепера.

5. Для всех случаев скреперования собственный вес скрепера, независимо от его конструкции, следует назначать для горизонтального перемещения скрепера в период заполнения — условие, отвечающее и всем другим случаям.

Литература

1. Геронтьев В. И. К вопросу о конструкции скрепера. «Горный журнал», 1934, № 7.
2. Домбровский Н. Г. Советский мощный шагающий экскаватор. Известия АН СССР, 1952, вып. 2.
3. Зеленин А. Н. Физические основы теории резания грунтов. Изд-во АН СССР, 1950.
4. Спиваковский А. О. Рудничный транспорт. Углетехиздат, 1953.