Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института, том XXIX, вып. I, 1953 г.

ПРИМЕНЕНИЕ ИЗОЛИНИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДИНАМИКИ ОДНОКОВШЕВОГО ЭКСКАВАТОРА

Канд. техн. наук Н. М. Караваева

Попытка создания общей аналитической теории рабочего механизма экскаватора была сделана К. Ф. Кравченко. Используя метод моделирования, он пришел к выводу, что траекторией движения режущей кромки ковша для периода черпания является логарифмическая спираль. На основании этого им были выведены аналитические выражения статического напорного и подъемного усилий. Эта теория не получила широкого применения вследствие несоответствия результатов, получаемых по формулам, с практическими данными. Объясняется это тем, что в эксплуатационных условиях форма экскаваторного забоя в большинстве случаев отличается от логарифмической спирали. Других аналитических исследований в этой области не производилось. Ввиду этого при проектировании экскаваторный привод рассчитывается на максимальные нагрузки без учета возможных условий применения машины и возникающих при этом усилий. В результате нередко мощность привода не согласуется с емкостью ковша, что приводит к неполному использованию машины.

Целью исследования автора явилось изучение статического подъемного усилия в процессе копания при различных условиях работы экскаватора.

1. Кинематический анализ механизма рабочего оборудования — механической лопаты

Для характеристики оборудования экскаватора достаточно изучить механизм прямого хода ковша, так как порожний ход в обратном порядке повторяет фазы первого.

Рабочий ход ковша состоит из трех последовательных, отчасти перекрывающих друг друга движений: напорного, подъемного, поворотного. Напор и поворот осуществляются движением ковша в вертикальной плоскости, поэтому механизм рабочего хода есть плоский механизм, напорного и подъемного движения, лежащий в вертикальной плоскости.

Механизм состоит из трех основных жестких элементов, которые соединены между собой подвижно: станины, стрелы и рукояти с ковшом. Стрела механической лопаты соединена с поворотным кругом жестко, а рукоять может вращаться при помощи подъемного каната около точки пересечения своей оси с осью стрелы и сдвигаться вдоль своей оси при помощи кремальерной трансмиссии.

На рис. 1 изображена кинематическая схема механизма для одновременного вращения и продвижения рукояти.

Характерной особенностью схемы является наличие двух звеньев переменной длины: пары *III/V* и пары зацепления *V/VII*.

Пара *III/V* зависит от взаимодействия внешних сил: P — тангенциального усилия на окружности подъемного барабана и Q — составляющей веса ковша и рукояти.

Пара *V/VII* определяется силами P' — усилиями на ведущей шестеренке напорного двигателя и Q' — составляющей сопротивления грунта напорному действию.

Благодаря наличию двух звеньев переменной длины механизм является неопределенной кинематической цепью. Траектория движения

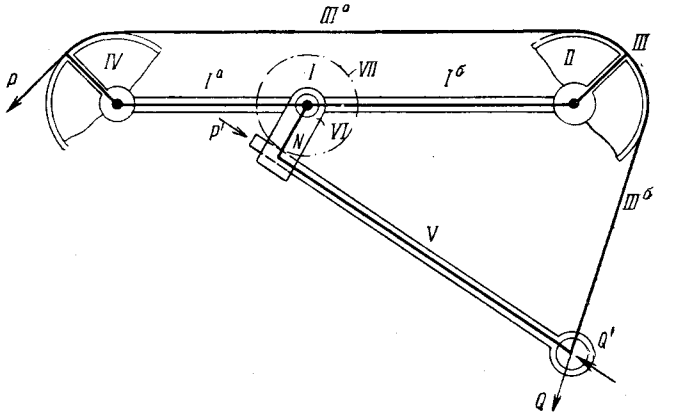


Рис. 1. Кинематическая схема механизма для одноковшевого вращения и продвижения рукоятки:

I — станина со стрелой; *II* — блок на ноге стрелы; *III* — подъемный канат; *IV* — подъемный барабан; *V* — рукоять с ковшом; *VI* — поворотная шайба; *VII* — шестеренка вала двигателя

ковша есть неопределенная плоская кривая, характер которой обусловлен соотношением сил $P - Q$ (подъем) и $P' - Q'$ (напор).

В случае закрепления звена *V* в точке *N* движение ковша будет происходить по окружности. Относительное движение всех жестких звеньев цепи (*II, IV, V*) осуществляется путем изменения длины гибкого звена *III*. Движение последнего однозначно связано с вполне определенным и единственно возможным движением звеньев относительно общей станины.

Все эти положения были положены в основу дальнейшего исследования динамики ковша экскаватора.

2. Динамика ковша механической лопаты

В процессе копания на движущуюся систему экскаватора действуют следующие силы:

$S_к$ — усилие на блоке ковша, направленное по подъемному канату;

$S_н$ — напорное усилие, направленное по рукояти;

Q — вес движущихся частей рабочего механизма (ковша, рукояти, грунта);

P_0 — реакция грунта, приложенная к зубьям ковша;

P_{01} — составляющая P_0, направленная по касательной к траектории;

R — реакция седлового подшипника, направленная перпендикулярно к рукояти (рис. 2).

Соотношение сил в любой момент копания можно легко вывести из векторного многоугольника (рис. 2), построенного для данного случая Направление рукояти считаем совпадающим с радиусом траектории движения ковша (ошибка составляет 5—7%).

Тогда из треугольника ACB (рис. 2) находим величину подъемного усилия

$$S_{\text{п}} = \frac{AB}{\sin \delta}. \tag{1}$$

Из проекций векторов сил на направление AO определяем значение силы AB

$$AB = P_{01} - R + Q \cos (\alpha - \beta). \tag{2}$$

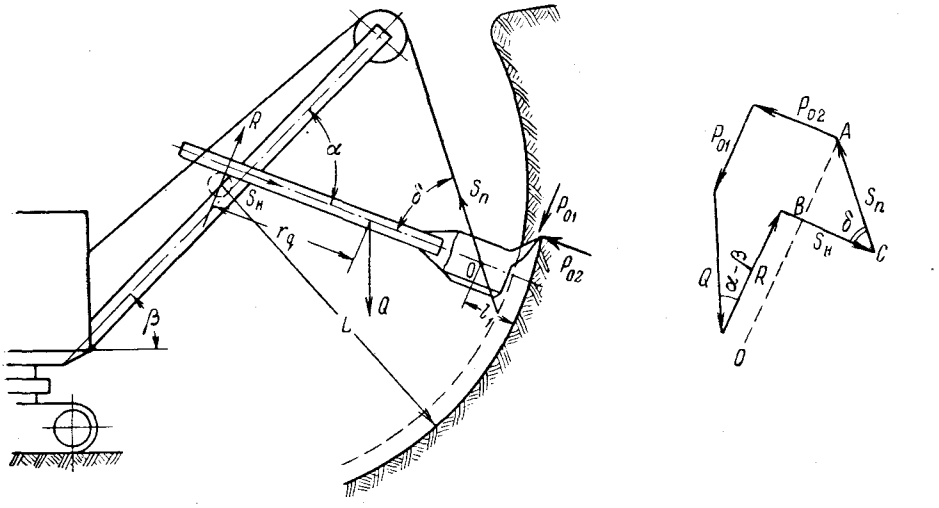


Рис. 2. Основные параметры кинематики рабочего механизма экскаватора:

β — угол между стрелой и горизонталью; α — угол между стрелой и рукоятью; δ — угол между рукоятью и направлением подъемного каната; L — длина радиуса траектории, *см*; r_q — плечо силы веса, *см*

Из уравнения моментов относительно точки O (рис. 2) определяем реакцию седлового подшипника R

$$R = Q \cos (\alpha - \beta) \left(1 - \frac{r_q}{L \pm l_1}\right) \pm \frac{P_{01}}{1 \pm \frac{L}{l_1}}. \tag{3}$$

Величину подъемного усилия получим, подставив выражения (2) и (3) в равенство (1)

$$S_{\text{п}} = \frac{P_{01}}{\left(1 \pm \frac{l_1}{L}\right) \sin \delta} + \frac{Q \cos (\alpha - \beta) r_q}{(L \pm l_1) \sin \delta}. \tag{4}$$

Таким образом, подъемное статическое усилие мы представили в виде суммы двух составляющих — сопротивления грунта $\frac{P_{01}}{\left(1 \pm \frac{l_1}{L}\right) \sin \delta}$ и веса $\frac{Q \cos (\alpha - \beta) r_q}{(L \pm l_1) \sin \delta}$, которые являются функциями основных параметров кинематики рабочего механизма экскаватора (рис. 2, α, β, δ, L, r_q).

Знак минус в выражении (4) относится к положениям ковша в верхней части забоя, а знак плюс — к нижней. В общем случае значения указанных параметров в процессе копания многозначны.

Чтобы сделать задачу определенной, как уже говорилось, представим механизм рабочего оборудования экскаватора как ряд последовательных

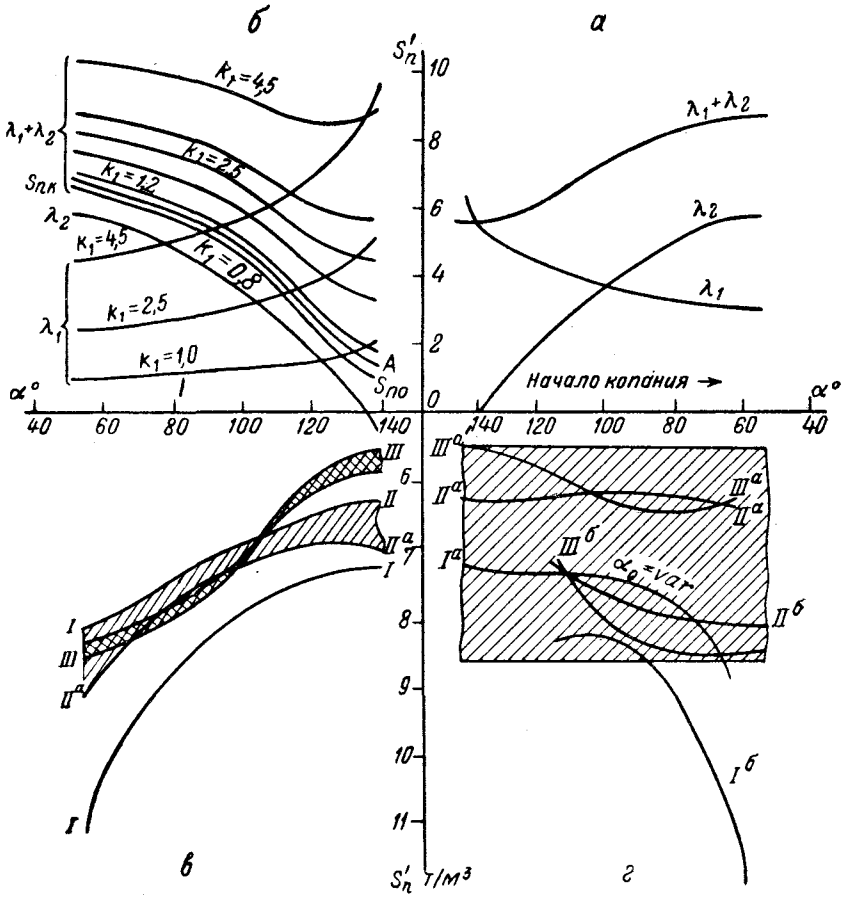


Рис. 3. *а* — подъемное усилие $S_п' = \lambda_1 + \lambda_2$ и его составляющие λ_1 λ_2 как функции угла поворота рукоятки α; *б* — подъемное усилие в зависимости от рода грунта:

k_1 — удельное сопротивление грунта, *кг/см²*; *в* — кривые подъемного усилия для разных длин рукояти (*I* — $S_п'$ — на коротких длинах рукояти; *II* — $II^а$ — зона изменения $S_п'$ для средних длин рукояти; *III* — зона изменения $S_п'$ при длинных рукоятях); *г* — подъемное усилие как функция угла наполнения ковша ($\alpha_0 - \alpha_k$)

частных механизмов вращения. Траектория движения ковша становится окружностью, описанной из центра напорного вала.

Изменение кинематических параметров в процессе копания будет следующее. Угол β сохраняет постоянное значение за все время работы экскаватора в забое. Его величина для отечественных моделей находится в пределах 40—50°. Величина угла α характеризует условия работы ковша на разной высоте забоя. При принятом нами обозначении она уменьшается с наполнением ковша. Значение угла δ является характе-

ристикой работы на разных длинах рукояти. Значения L, r_q берутся из технической характеристики экскаватора. Величина составляющей P_{01} рассчитывается по эмпирической формуле Н. Г. Домбровского

$$P_{01} = \frac{k_1 q_н 10^6}{\frac{2\pi}{360}(\alpha_0 - \alpha_к) L}, \qquad (5)$$

где k_1 — удельное сопротивление грунта.

Для удобства исследования статическое усилие относим к единице емкости ковша. Тогда равенство (4) перепишется в следующем виде:

$$S_п' = \frac{\lambda_1}{\left(1 \pm \frac{l_1}{L}\right)\sin\delta} + \frac{\lambda_2 \cos(\alpha - \beta) r_q}{(L \pm l_1)\sin\delta}, \qquad (6)$$

где

$$S_п' = \frac{S_п}{q_н}, \quad \lambda_1 = \frac{P_{01}}{q_н}, \quad \lambda_2 = \frac{Q}{q_н}$$

— соответственно статическое усилие, сила сопротивления грунта и вес, отнесенные к единице емкости ковша, $т/м^3$.

Выведенное нами соотношение (6) позволяет построить серии кривых, характеризующих зависимость подъемного усилия от угла поворота и длины рукоятки, высоты наполнения ковша и удельного сопротивления грунта. Подобные кривые, построенные для технической характеристики экскаватора СЭ-3, приведены на рис. 3. Анализ их показывает, что кинематика рабочего механизма оказывает влияние на величину статического усилия $S_п'$ в процессе копания. Закон изменения его сложный синусоидальный, нарастающий от начала к концу наполнения ковша. Работа в нижней части забоя характеризуется меньшими по абсолютной величине значениями подъемного усилия, чем работа в верхней части забоя. Пределы изменения усилий сокращаются с уменьшением угла наполнения ковша. Оптимальным режимом работы в отношении испытываемых механизмом нагрузок является работа на средних длинах рукояти. Изменение величины $S_п$ за весь цикл копания составляет 10—15%.

Наконец, следует также отметить, что кинематика механизма оказывает более сильное влияние при работе в легких грунтах. Действительно, для кривых A (рис. 3) разность величин конечного $S_{пк}$ и начального $S_{по}$ значений усилий, обусловленных кинематикой механизма, составляет 40%, а от сопротивления грунта — 8%. Для работы в тяжелых условиях при твердых породах характерно влияние обоих факторов в равной мере. Общие пределы изменения усилий расширяются.

3. Диаграммы постоянных усилий

Выражение (6) позволяет получить пределы и характер изменения подъемного статического усилия при рабочем ходе ковша с помощью построения диаграмм постоянных усилий. Покажем построение этих диаграмм на конкретном примере.

В соответствии с техническими данными экскаватора СЭ-3 строим кинематическую схему механизма вращения (рис. 4). Затем в плоскости рабочего механизма наносим сетку, состоящую из концентрических окружностей и радиальных прямых, проведенных из центра напорного вала. Сетка наносится в зоне возможного перемещения ковша. В нашем случае

длина рукояти изменяется от 4,5 до 6,7 *м*, а угол поворота — от 140 до 50°.

Допустим, экскаваторный забой представляет однородный грунт с удельным сопротивлением 3 *кг/см²*. Пользуясь формулой (6), подсчитываем значение статического подъемного усилия для различных точек диаграммы. Значения усилий, отвечающих постоянной длине рукояти, нанесены по дугам, значения усилий для одного и того же угла поворота отмечены по радиусам. Каждая точка диаграммы определяет величину подъемного усилия, которое отвечает определенной высоте копания и

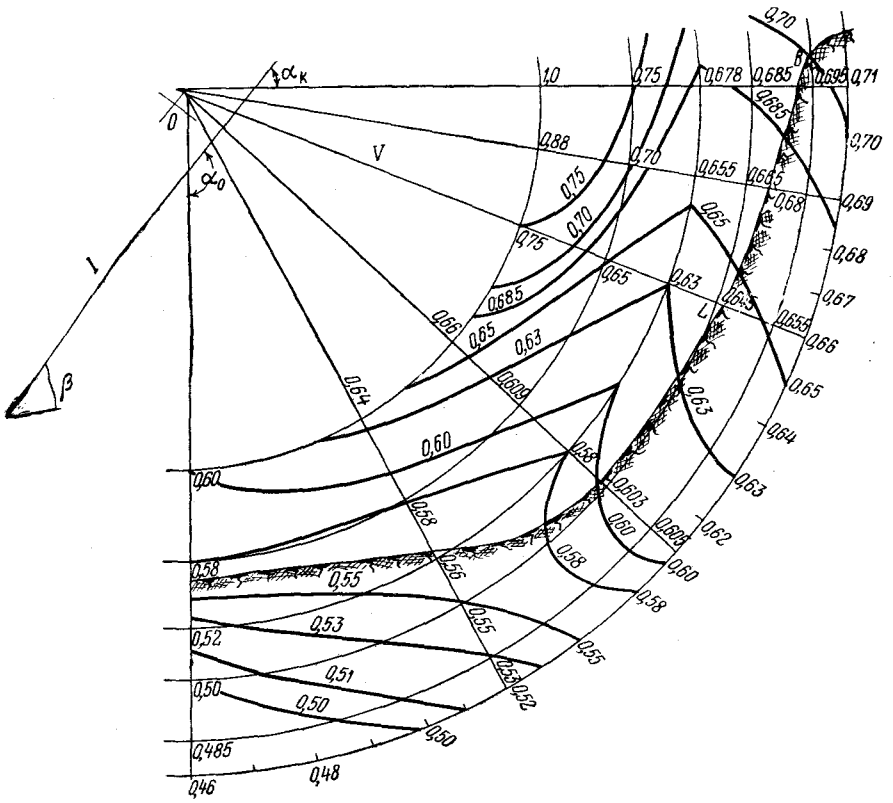


Рис. 4. Диаграмма постоянных усилий при работе в легком грунте:

mO — ось напорного вала; α_0 α_k — начальный и конечный углы поворота рукояти; β — угол наклона стрелы; *I* — положение стрелы; *V* — одно из положений рукояти

длине рукояти. Величины усилий на диаграмме даны в долях от максимального.

Задаваясь траекторией движения ковша, наносим ее на диаграмму. Точки пересечения этой траектории с линиями сетки дают величину статического усилия, возникающего при наполнении ковша по высоте забоя. Вся диаграмма дает картину изменения статических усилий при различных формах экскаваторного забоя.

Если соединить точки равных значений усилия, получим серию линий постоянных нагрузок, определяющих оптимальный режим работы подъемного механизма экскаватора в заданных геологических условиях.

На рис. 5 и 6 изображены диаграммы постоянного усилия для однородных грунтов с удельным сопротивлением 1 и 4,5 *кг/см²*. Из диаграмм видно, что при грунтах с малым сопротивлением изолинии в нижней части забоя имеют направление радиальное, а в верхней части получают резкий перелом. При средних грунтах перелом остается на той же длине рукояти (0,65 максимальной длины), причем в нижней части изолинии начинают приближаться к касательным окружностей сетки. При тяжелых грунтах резкие переломы изолиний исчезают, а статическое усилие в про-

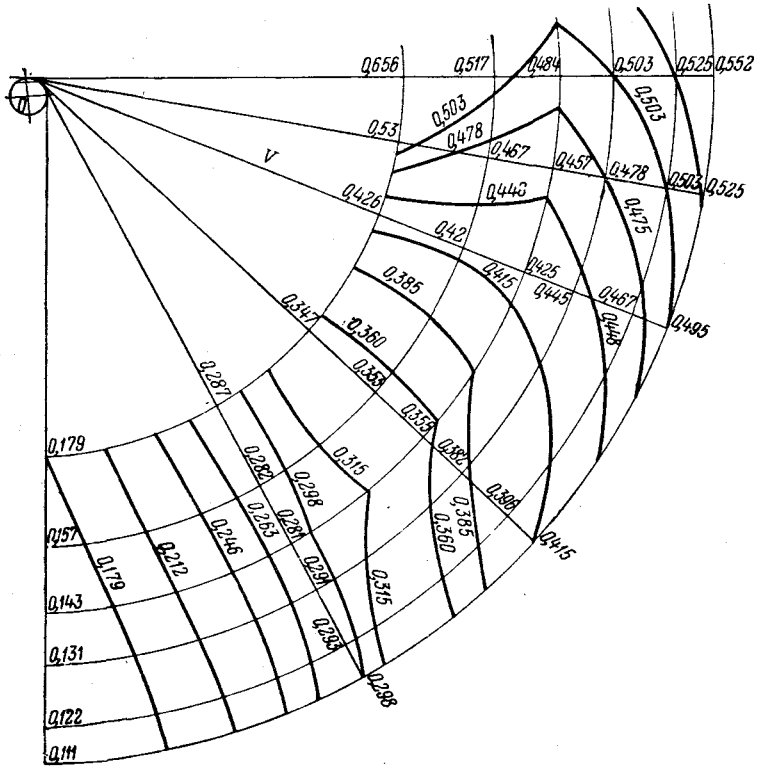


Рис. 5. Диаграмма постоянных усилий при работе в грунтах средней крепости

цессе копания при средних длинах рукояти изменяется незначительно на протяжение всего угла поворота.

На рис. 7 приведена диаграмма усилий для забоя сложного геологического строения, состоящего из трех слоев с удельным сопротивлением 1,3 и 4,5 *кг/см²*. Для ее построения использованы диаграммы, приведенные на рис. 4—6. Для нижнего слоя взят рис. 5, для среднего — рис. 4, для верхнего — рис. 6.

Диаграммы постоянных усилий для одного и того же месторождения являются типовыми.

Анализ приведенных диаграмм дает возможность сделать следующие выводы. Кинематика механизма отражается на характере изменения статического подъемного усилия главным образом при работе в легких грунтах. Пределы колебания усилия при работе в легком однородном грунте достигают 40% от максимального допустимого значения. В тяжелом однородном грунте или хорошо взорванной скале влияние кинематики незначительно (5—15% от максимума). При работе в неоднородных

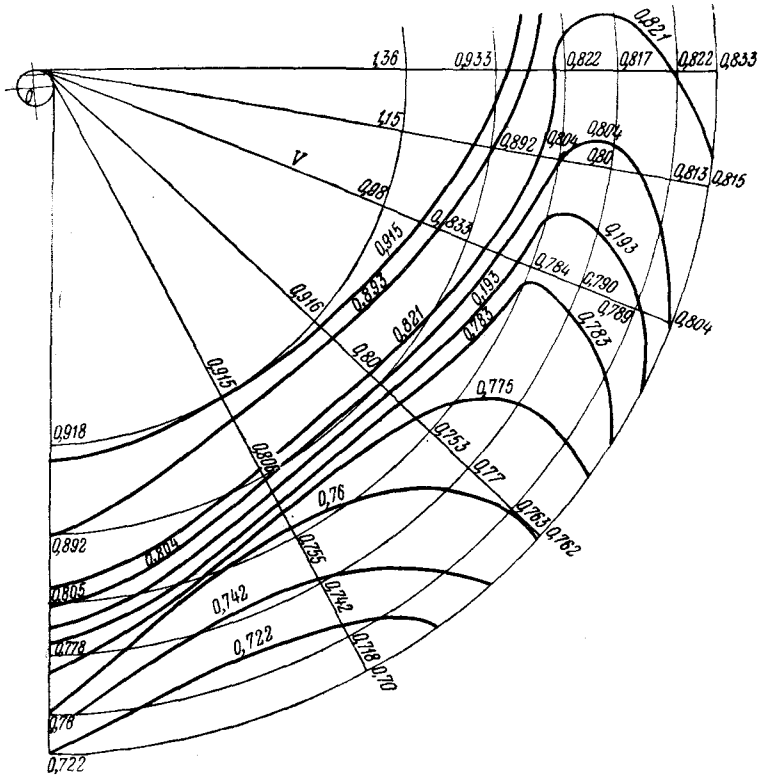


Рис. 6. Диаграмма постоянных усилий при работе в тяжелых грунтах

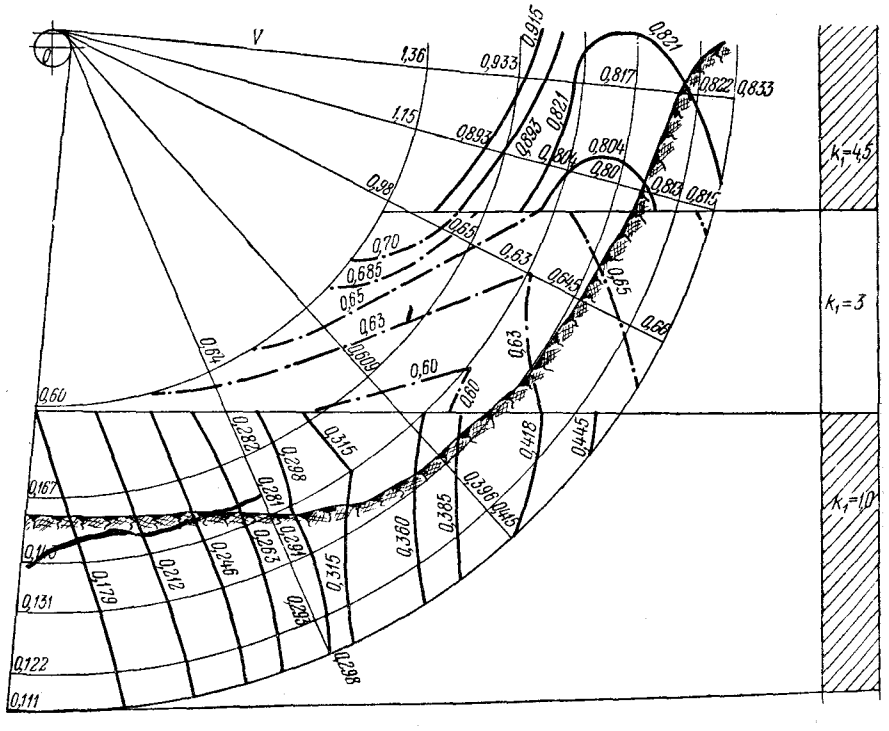


Рис. 7. Диаграмма постоянных усилий для забоя сложного геологического строения

k_1 — удельное сопротивление грунта, *кг/см²*

породах пределы изменения усилий возрастают и обусловливаются уже не кинематикой механизма, а физическими свойствами пород.

Анализ диаграмм постоянного усилия теоретически подтверждает выгодность передовых методов работы машинистов экскаваторов (деление ими забоя на части, работа на средней рукояти с короткими передвижками), обеспечивающих лучшую загрузку двигателя и лучший режим его работы.

Абсолютное значение подъемного усилия увеличивается с сопротивлением грунта. Работа в грунте с удельным сопротивлением 4,5 *кг/см*^{2} без предварительного разрыхления невозможна, напротив, абсолютные значения статического усилия в легких грунтах или средней крепости (0,8—1,5 *кг/см*^{2}) говорят о том, что механизм подъема часто работает незагруженным. Движение новаторов производства за более полное использование оборудования подтверждает наши выводы.

Выводы, полученные из рассмотрения экскаватора СЭ-3, могут быть распространены и на другие механические лопаты, поскольку между ними имеет место геометрическое подобие, а величина статического усилия нами бралась в относительных единицах.

При изменении угла наполнения цифровые данные статических усилий необходимо пересчитать по выражению (6) и затем для этих условий построить новые диаграммы.

В случае хорошо взорванной скалы режим работы может быть приравнен к работе в плотных грунтах с соответствующим сопротивлением, так как на величину составляющей сопротивления грунта (по формуле Н. Г. Домбровского) условия заполнения ковша не оказывают влияния.

При проектировании экскаваторов необходимо построить диаграммы на все возможные режимы его работы, на основании которых может быть сделан выбор оптимальных режимов привода, его мощности и регулирования.

Предлагаемый метод расчета отличается простотой и наглядностью. Особенное значение он имеет для проектирования экскаваторов большой мощности, предназначенных для конкретных условий, с заранее известными геологическими данными.

Поступило 9.V/1952 г.