

ОСНОВЫ РАСЧЕТА КАНАТНЫХ ГРУЗОВЫХ БРЕМСБЕРГОВ С ПЕРЕМЕННЫМ УГЛОМ НАКЛОНА

Л. П. Северич

В практике разработки угольных и рудных месторождений и на карьерах неметаллических ископаемых встречается необходимость в сооружении канатных грузовых бремсбергов с переменным углом наклона.

На современных угольных шахтах бремсберги при углах наклона до 18° и при относительно значительных производительностях оборудуются ленточными конвейерами. По выработкам же, угол наклона которых превышает 40° , спуск полезного ископаемого, как правило, осуществляется по неподвижным желобам (рештакам).

Перемещение груза по наклонному рельсовому пути с углом наклона, не превышающим 25° , может производиться в обычных вагонетках с глухим кузовом или с открывающимся днищем. При углах наклона $\alpha > 25^\circ$ применяют либо вагонетки с козырьком, т. е. с наросшей задней стенкой, либо, в целях большей устойчивости подъемных сосудов из рельсовых путей, переходят к установке вагонеток на особых платформах (клетях). Клетки в подземных установках применяются редко, так как они требуют большого поперечного сечения выработок. На открытых горных разработках эти факторы не играют существенной роли, поэтому клетевые бремсберги здесь получили известное распространение. Значительно чаще, однако, при $\alpha > 25^\circ$ переходят к скиповым бремсбергам.

Таким образом, область применения двухконцевых канатных бремсбергов ограничивается предельными углами наклона $\alpha > 18^\circ$ и $\alpha < 45^\circ$. Учитывая, однако, выполаживаемость пластов, по которым чаще всего проходятся капитальные горные выработки, можно для бремсбергов считать практическими пределами углы наклона α от 5° до 45° , причем применение вагонеточных бремсбергов ограничивается углами наклона $\alpha \leq 25^\circ$.

Канатные грузовые бремсберги с переменным углом наклона существуют на ряде отечественных рудников и шахт. Их применение предусматривается также и в проектах новых горных предприятий (институты «Гипрометруд», «Гипроцемент» и др.).

Однако в горнотехнической и общенаучной литературе до сих пор не встречается работ, освещающих в какой-либо мере методы расчета грузовых канатных бремсбергов с переменным углом наклона. Частичному восполнению отмеченных пробелов и посвящена настоящая работа.

В настоящей статье рассматриваются лишь вопросы определения статических сопротивлений для вагонеточных и клетевых бремсбергов.

1. Канатные тормозберги с постоянным углом наклона

Вагонеточные и клетевые тормозберги, метод расчета которых по существу одинаков, наиболее распространены и просты в расчете особенно при постоянном значении угла наклона. Чтобы при рассмотрении грузовых тормозбергов с переменным углом наклона можно было сравнивать их расчеты с другими, более простыми спусками, остановимся вначале на вагонеточных тормозбергах с постоянным значением угла наклона.

Примем следующие обозначения:

- Q — вес полезного груза, кг;
- Q' — вес мертвого груза, кг;
- p — вес погонного метра каната, кг/м;
- L — полная длина наклонного пути тормозберга (путь точки прикрепления каната к подъемному сосуду), м;
- α — угол наклона рельсового пути тормозберга, град.;
- f — совокупный коэффициент сопротивления движению подъемного сосуда, учитывающий трение в буксах и трение качения колес по рельсам наклонного пути.

Для приведенного на рис. 1 произвольного положения подъемных сосудов, каждым из которых от начала спуска пройден путь x , натяже-

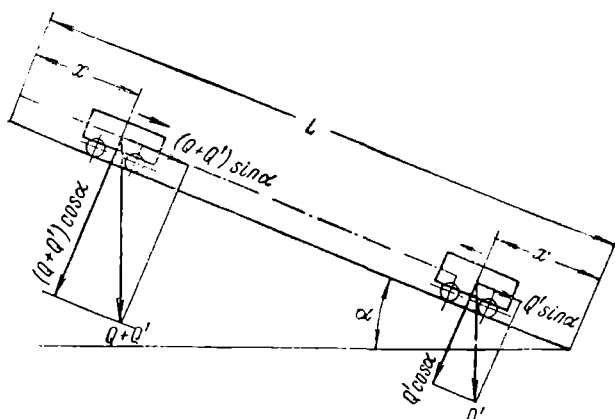


Рис. 1. Схема двухконцевого канатного тормозберга

ние канатов обусловлено полезным и мертвым грузами, весом канатов, а также сопротивлением движению сосудов и трением путевых роликов, поддерживающих провисающие канаты.

Статическое натяжение набегающей — порожняковой — ветви каната рассматриваемого тормозберга

$$F_s' = [Q' + p(L - x)] \sin \alpha + fQ' \cos \alpha + w'$$

где w' — сопротивление путевых роликов со стороны набегающей ветви.

Статическое натяжение сбегающей — грузовой — ветви каната этого же тормозберга

$$F_s'' = (Q + Q' + px) \sin \alpha - f(Q + Q') \cos \alpha - w'',$$

где w'' — сопротивление путевых роликов со стороны сбегающей ветви.

Все сопротивления сил трения (два последних члена) входят в формулу со знаком минус, поскольку они уменьшают натяжение сбегающей ветви каната. Для набегающей же ветви имеет место обратное явление.

Обычно у бремсбергов $F_s' > F_s''$, поэтому разность этих натяжений или статическое сопротивление спуску

$$F_s = F_s'' - F_s' = Q(\sin \alpha - f \cos \alpha) - 2Q'f \cos \alpha - \\ - pL \sin \alpha + 2px \sin \alpha - (w' + w'').$$

Вводя обозначения

$$\sin \alpha - f \cos \alpha = a,$$

$$2f \cos \alpha = b,$$

$$w' + w'' = w,$$

получим

$$F_s = aQ - bQ' - pL \sin \alpha + 2px \sin \alpha - w$$

или, замечая, что

$$pL \sin \alpha = pH,$$

где H — вертикальная высота наклонного бремсберга, получим

$$F_s = aQ - bQ' - w - pH + 2p \sin \alpha.$$

Величина $aQ - bQ' - w$ представляет часть статического сопротивления, обусловленную полезным грузом и сопротивлениями движению, т. е. трением качения, трением в буксах колес и трением путевых роликов. Выделяя разность

$$aQ - w = aQ \left(1 - \frac{w}{aQ}\right)$$

и обозначая

$$1 - \frac{w}{aQ} = k,$$

т. е. полагая

$$aQ - w = akQ,$$

и вводя коэффициент

$$\mu = ak - b \frac{Q'}{Q},$$

получим

$$aQ - bQ' - w = \mu Q.$$

Таким образом, статическое сопротивление в функции пути подъемных сосудов представится в окончательном виде

$$F_s = \mu Q - pH + 2px \sin \alpha. \quad (1)$$

Формула (1) аналогична формуле для вертикальных клетевых спусков. При $\alpha = 90^\circ$ имеем $a = 1$ и $b = 0$, т. е.

$$\mu = k = 1 - \frac{w}{Q} < 1$$

и формула (1) полностью переходит в формулу для вертикального спуска¹

$$F_s = kQ - pH + 2px. \quad (2)$$

¹ Герман А. П. и Шклярский Ф. Н. Рудничные подъемные установки. Углетехиздат, 1947, стр. 167.

Возвращаясь к выведенному уравнению (1), заметим, что величина

$$(F_s)_0 = \mu Q - pH$$

есть начальное статическое сопротивление, отвечающее пути $x=0$.

При встрече подъемных сосудов $x = \frac{L}{2}$ и сопротивление

$$(F_s)_m = \mu Q - pH + 2p \frac{L}{2} \sin \alpha = \mu Q.$$

В конце же спуска $x = L$ и конечное статическое сопротивление

$$(F_s)_k = \mu Q - pH + 2pL \sin \alpha = \mu Q + pH.$$

Уравнение (1) в осях $0-x$ и $0-F_s$ выражает прямую линию с двумя взаимно перпендикулярными осями сложной симметрии $\frac{L}{2}$ и μQ .

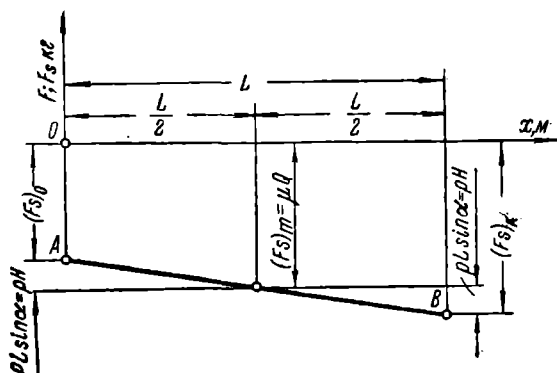


Рис. 2. График статических сопротивлений при двухконцевом канатном бремсберге

Значения статических сопротивлений $(F_s)_0$, $(F_s)_m$ и $(F_s)_k$ численно положительны, но направлены в сторону движения, т. е. имеют характер движущих усилий и в смысле сопротивлений должны рассматриваться как отрицательные. Поэтому прямую статического сопротивления F_s по уравнению (1) целесообразно откладывать под ось абсцисс, как показано на рис. 2, где прямая AB представляет график сопро-

тивления F_s от начала до конца спуска.

2. Бремсберг с одним перегибом профиля

Бремсберг с одним перегибом профиля (рис. 3) образует два значения углов наклона α_1 и α_2 с длинами участков профиля соответственно l_1 и l_2 .

При этом $l_1 + l_2 = L$ и в общем случае $l_1 \neq l_2$. Предположим, что $l_1 = l_2 = \frac{L}{2}$.

В этом случае статическое натяжение набегающей — порожняковой — ветви каната

$$F'_s = Q' (\sin \alpha_2 + f \cos \alpha_2) + pH - px \sin \alpha_2 + w'$$

Статическое натяжение сбегающей — грузовой — ветви каната

$$F''_s = (Q + Q') (\sin \alpha_1 - f \cos \alpha_1) + px \sin \alpha_1 - w''.$$

Как и в предыдущем случае, $F_s'' > F_s'$, поэтому разность их

$$F_s = F_s'' - F_s' = Q (\sin \alpha_1 - f \cos \alpha_1) - \\ - Q' [(\sin \alpha_2 + f \cos \alpha_2) - (\sin \alpha_1 - f \cos \alpha_1)] - \\ - pH + px (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) - (\omega' + \omega'').$$

Обозначим

$$\sin \alpha_1 - f \cos \alpha_1 = a_1,$$

$$(\sin \alpha_2 + f \cos \alpha_2) - (\sin \alpha_1 - f \cos \alpha_1) = b_1,$$

$$\omega' + \omega'' = \omega.$$

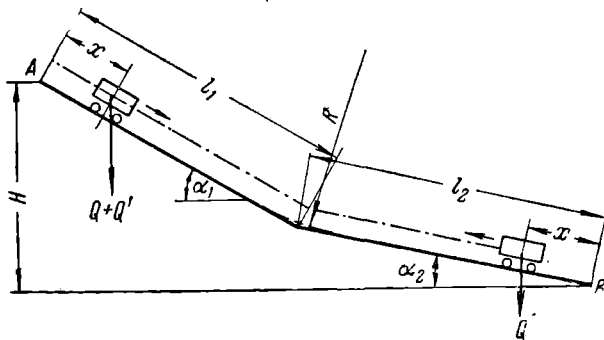


Рис. 3. Схема двухконцевого вагонеточного бремс-берга с одним перегибом профиля

Тогда последнее уравнение переписывается в следующем виде

$$F_s = a_1 Q - b_1 Q' - \omega - pH + px (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2).$$

Полагая в полученном уравнении

$$a_1 Q - b_1 Q' - \omega = \mu_1 Q,$$

где

$$\mu_1 = a_1 k_1 - b_1 \frac{Q'}{Q},$$

а коэффициент $k_1 = 1 - \frac{\omega}{a_1 Q}$,

получим

$$F_s = \mu_1 Q - pH + px (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2). \quad (3)$$

При $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$

$$a_1 = 1; \quad b_1 = 0, \text{ т. е. } \mu_1 = 1 - \frac{\omega}{Q} = k < 1,$$

где k — коэффициент, учитывающий вредные сопротивления при вертикальном спуске;

$$\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2 = 2.$$

В результате выражение (3), как и следовало ожидать, переходит в уравнение статических сопротивлений для вертикального спуска

$$F_s = kQ - pH + 2px.$$

Это свидетельствует о правильном выводе выражения (3).

В начале спуска, при $x = 0$, из уравнения (3) следует, что начальная величина статического сопротивления

$$(F_s)_0 = \mu_1 Q - pH. \quad ($$

При $x = l_1 = l_2$, что соответствует встрече подъемных сосудов,

$$l_1 (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) = l_2 (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) = H$$

и, следовательно, статическое сопротивление в середине спуска, согласно уравнению (3),

$$(F_s)'_m = \mu_1 Q. \quad ($$

После встречи подъемных сосудов каждый из них перейдет на другой угол наклона: груженный будет находиться на участке бремсберга с углом наклона α_2 , а порожний, наоборот, на α_1 . В связи с этим произойдет существенное изменение в значениях статических натяжений обеих ветвей канатов.

Для второй половины пути величину статического натяжения порожняковой ветви каната можно представить в следующем виде

$$F_s' = Q' (\sin \alpha_1 + f \cos \alpha_1) + pX \sin \alpha_1 + w',$$

где X — путь, оставшийся до полного завершения операции спуска груза.

То же, для грузовой ветви каната

$$F_s'' = (Q + Q') (\sin \alpha_2 - f \cos \alpha_2) + pH - pX \sin \alpha_2 - w''.$$

Этим натяжениям будет отвечать статическое сопротивление

$$F_s = F_s'' - F_s' = Q (\sin \alpha_2 - f \cos \alpha_2) - Q' [(\sin \alpha_1 + f \cos \alpha_1) - (\sin \alpha_2 - f \cos \alpha_2)] + pH - pX (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) - (w' + w'').$$

Введем обозначения

$$\sin \alpha_2 - f \cos \alpha_2 = a_2,$$

$$(\sin \alpha_1 + f \cos \alpha_1) - (\sin \alpha_2 - f \cos \alpha_2) = b_2,$$

$$w' + w'' = w.$$

Тогда для второй половины пути подъемных сосудов получим

$$F_s = a_2 Q - b_2 Q' - w + pH - pX (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2)$$

или

$$F_s = \mu_2 Q + pH - pX (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2), \quad (6$$

где

$$\mu_2 = a_2 k_2 - b_2 \frac{Q'}{Q};$$

$$k_2 = 1 - \frac{w}{a_2 Q}.$$

При $X = 0$, что будет отвечать полному завершению спуска, согласно уравнению (6),

$$(F_s)_k = \mu_2 Q + pH. \quad (7)$$

Встрече подъемных сосудов, т. е. при $X = l_1 = l_2$, будет соответствовать статическое сопротивление из формулы (6), равное

$$(F_s)_m = \mu_2 Q. \quad (8)$$

Из приведенных выкладок видно, что точке перегиба бремсбергового профиля отвечают два значения F_s . Одно определяется выражением (5), другое — (8).

Эти значения F_s будут отличаться друг от друга тем больше, чем значительнее разница между коэффициентами μ_1 и μ_2 .

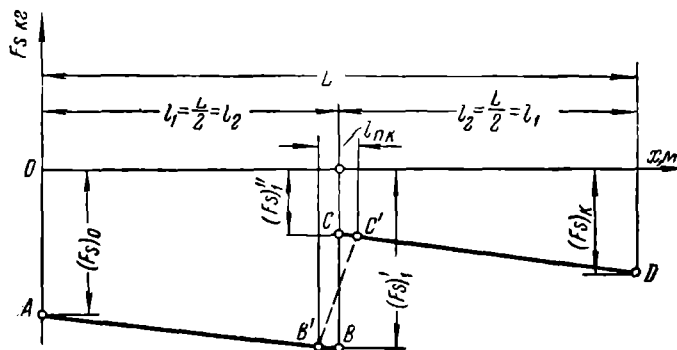


Рис. 4. График статических сопротивлений при двухконцевом вагонеточном бремсберге

На рис. 4 приведен график статических сопротивлений для бремсберга, представленного на рис. 3, в предположении, что $l_1 = l_2 = \frac{L}{2}$. Ломаная $ABCD$ показывает лишь примерный закон изменения статических сопротивлений от начала спуска до его полного завершения.

В действительности переход подъемных сосудов с угла наклона α_1 на угол наклона α_2 (и наоборот) происходит постепенно, благодаря так называемой „переходной кривой“ (длиной $l_{пк}$), осуществляемой каким-нибудь радиусом R (рис. 3), определяемым в каждом случае типоразмерами подъемных сосудов. Таким образом, изменение статических сопротивлений за период одного спуска будет в действительности выражаться какой-то ломаной $AB'C'D$ (рис. 4), причем участок пути подъемных сосудов, определяемый проекцией $B'C'$ на ось $0-x$, отвечает длине упомянутой выше переходной кривой $l_{пк}$.

В целях упрощения расчетных формул (с учетом небольшой погрешности, вытекающей из такого допущения) здесь, равно как и в последующих выкладках, принят «мгновенный» или «скачкообразный» характер изменения статических сопротивлений в точках перегиба профиля.

При сравнении выражений (4) и (5) видно, что началу скачка в величине статических сопротивлений будет отвечать значение статического сопротивления, равное

$$(F_s)_m = (F_s)_0 + p\Delta h, \quad (9)$$

где

$$\Delta h = l_1 (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) = l_2 (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) = H.$$

Из сопоставления выражений (5) и (8) следует, что значение са-
мого скачка в величине статических сопротивлений в рассматриваемом
случае

$$(F_s)'_m - (F_s)''_m = (\mu_1 - \mu_2) Q = \Delta \mu Q. \quad (10)$$

Вычислив предварительно эту величину и зная заранее числовое
значение $(F_s)'_m$ из выражения (9), можно величину статического со-
противления в конце скачка определить по формуле

$$(F_s)''_m = (F_s)'_m - \Delta \mu Q. \quad (11)$$

Величину статического сопротивления в конце спуска можно найти
из следующего выражения

$$(F_s)_k = (F_s)''_m + p \Delta h, \quad (12)$$

для проверки которого может служить формула (7).

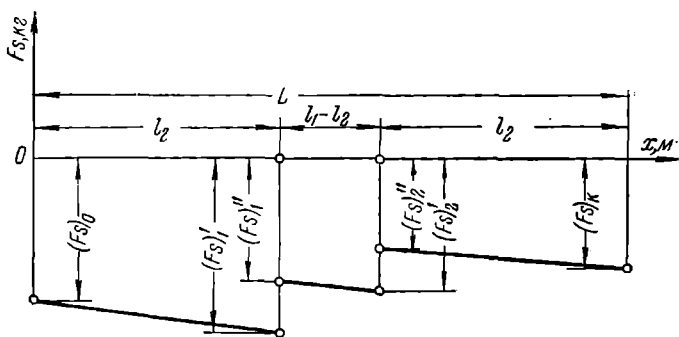


Рис. 5. График статических сопротивлений при двухконцевом вагонеточном бремсберге

При одном перегибе профиля, но при $l_1 > l_2$ график статических сопротивлений изменится существенным образом. В этом случае будет уже не один, а два скачка в изменениях статических сопротивлений.

Один из них будет отвечать моменту перехода порожнего сосуда с угла наклона α_2 на угол α_1 , а другой — сходу груженого сосуда с угла наклона α_1 на угол α_2 . Тогда на участке пути $l_1 - l_2$ каждый подъемный сосуд будет передвигаться в своем направлении по рельсовым путям с углом наклона α_1 . В этом случае образуются не два, а три участка, на которых статические сопротивления в функции пути подъемных сосудов изменяются по законам прямых линий (рис. 5).

То же будет иметь место и при $l_1 < l_2$, но первый скачок в величине статических сопротивлений будет отвечать переходу груженого сосуда с угла наклона α_1 на угол α_2 , второй скачок — сходу порожнего сосуда с угла наклона α_2 на угол α_1 . Оба же подъемных сосуда будут двигаться в своем направлении, по рельсовым путям с углом наклона α_1 на участке бремсберга длиной $l_2 - l_1$.

Так или иначе, но в обоих приведенных случаях началу определения статических сопротивлений должно предшествовать определение не двух, а трех коэффициентов μ_1 , μ_2 и μ_3 .

Нетрудно заметить, что численные значения коэффициентов μ_1 и μ_3 могут быть найдены, независимо от соотношения длин участков l_1 и l_2 , по формулам

$$\mu_1 = ak_1 - b_1 \frac{Q'}{Q},$$

$$\mu_3 = a_3 k_3 - b_3 \frac{Q'}{Q},$$

в которых

$$a_1 = \sin \alpha_1 - f \cos \alpha_1,$$

$$a_3 = \sin \alpha_2 - f \cos \alpha_2,$$

$$b_1 = (\sin \alpha_2 + f \cos \alpha_2) - (\sin \alpha_1 - f \cos \alpha_1),$$

$$b_3 = (\sin \alpha_1 + f \cos \alpha_1) - (\sin \alpha_2 - f \cos \alpha_2),$$

$$k_1 = 1 - \frac{w}{a_1 Q},$$

$$k_3 = 1 - \frac{w}{a_3 Q}$$

Коэффициент же μ_2 можно также вычислить по формуле, аналогичной приведенной

$$\mu_2 = a_2 k_2 - b_2 \frac{Q'}{Q},$$

с той, однако, разницей, что в ней коэффициенты a_2 , b_2 и k_2 зависят от соотношения длин участков бремсберга l_1 и l_2 .

При $l_1 > l_2$

$$a_2 = \sin \alpha_1 - f \cos \alpha_1 = a_1,$$

$$b_2 = (\sin \alpha_1 + f \cos \alpha_1) - (\sin \alpha_1 - f \cos \alpha_1) = 2f \cos \alpha_1.$$

$$k_2 = k_1,$$

а при $l_1 < l_2$

$$a_2 = \sin \alpha_2 - f \cos \alpha_2 a_3,$$

$$b_2 = (\sin \alpha_2 + f \cos \alpha_2) - (\sin \alpha_2 - f \cos \alpha_2) = 2f \cos \alpha_2,$$

$$k_2 = k_3.$$

Возвращаясь к графику статических сопротивлений (рис. 5), отметим, что начальную величину статического сопротивления можно найти по формуле (5)

$$(F_s)_0 = \mu_1 Q - pH.$$

Величина статического сопротивления в начале первого скачка найдется из следующего выражения, аналогичного формуле (9),

$$(F_s)'_1 = (F_s)_0 + p \Delta h_1,$$

где $\Delta h_1 = \Delta L_1 (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2)$,

$$\Delta L_1 = l_2 \text{ при } l_1 > l_2,$$

$$\Delta L_1 = l_1 \text{ при } l_1 < l_2.$$

Величину ΔL_1 можно назвать длиной промежутка от начала спуска до первого скачка в величине статических сопротивлений.

Статическое сопротивление в конце первого скачка определится теперь по следующей формуле, аналогичной выражению (11),

$$(F_s)_1'' = (F_s)_1' - \Delta \mu_1 Q, \quad (14)$$

где $\Delta \mu_1 = \mu_1 - \mu_2$.

Остальные значения статических сопротивлений, приведенных на графике рис. 5, найдутся по следующим формулам:

$$(F_s)_2 = (F_s)_1'' + p \Delta h_2, \quad (15)$$

где $\Delta h_2 = \Delta L_2 (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_1) = \Delta L_2 2 \sin \alpha_1$;

$$\Delta L_2 = l_1 - l_2 \text{ при } l_1 > l_2;$$

$$\Delta h_2 = \Delta L_2 2 \sin \alpha_2;$$

$$\Delta L_2 = l_2 - l_1 \text{ при } l_1 < l_2;$$

$$(F_s)_2'' = (F_s)_2' - \Delta \mu_2 Q, \quad (16)$$

где $\Delta \mu_2 = \mu_2 - \mu_3$.

$$(F_s)_k = (F_s)_2'' + p \Delta h_3, \quad (17)$$

где $\Delta h_3 = \Delta L_3 (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) = \Delta h_1$;

$$\Delta L_3 = l_2 \text{ при } l_1 > l_2;$$

$$\Delta L_3 = l_1 \text{ при } l_1 < l_2.$$

Проверкой конечной величины статического сопротивления, по аналогии с выражением (7), может служить формула

$$(F_s)_k = \mu_3 Q + p H. \quad (18)$$

Заканчивая рассмотрение статики бремсберга с одним перегибом профиля, у которого $l_1 \neq l_2$, заметим, что здесь имеют место *два скачка* в изменениях статических сопротивлений, а *число участков*, на которых статические сопротивления изменяются по законам прямых линий, равно *трем*, причем (рис. 5) ¹

$$\Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3 = l_1 + l_2 = L.$$

¹ На рис. 5 изображен график статических сопротивлений для бремсберга, у которого $l_1 > l_2$.

3. Бремсберг с двумя перегибами профиля

Бремсберг с двумя перегибами профиля (рис. 6) имеет три участка l_1 , l_2 и l_3 , образующих углы наклона к горизонту соответственно α_1 , α_2 и α_3 .

В общем случае длины участков $l_1 \neq l_2 \neq l_3$ и углы $\alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3$. Кроме того, $l_1 \neq l_2 + l_3$, $l_2 \neq l_1 + l_3$ и $l_3 \neq l_1 + l_2$, но $L = l_1 + l_2 + l_3$. При таком бремсберге будет уже не два, а четыре скачка в величине статических сопротивлений, а число участков, на которых статические сопротивления изменяются по законам прямых линий, будет равно пяти.

Следовательно, началу определения статических сопротивлений здесь должно предшествовать вычисление пяти коэффициентов μ_1 , μ_2 , μ_3 , μ_4 и μ_5 .

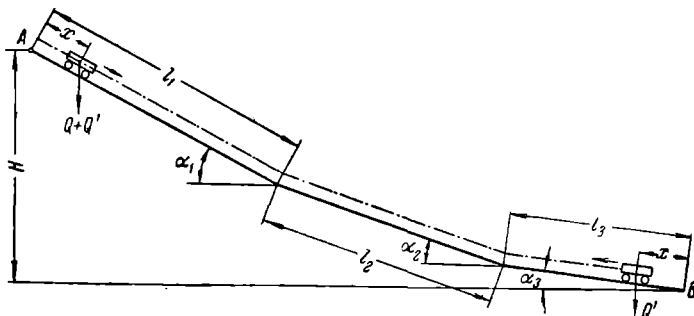


Рис. 6. Схема двухконцевого вагонеточного бремсберга с двумя перегибами профиля

Чтобы не ошибиться в определении местоположения скачков на графике и значений самих коэффициентов μ , рекомендуется до расчета статических сопротивлений изобразить в определенном масштабе расчетную схему (рис. 7), которая строится на основе следующих положений.

1. Зная, что груженный сосуд движется сверху вниз, от точки A к точке B (рис. 6), откладываем по горизонтали (рис. 7) путь этого сосуда AB, равный L , отмечая на нем в нисходящем порядке участки бремсберга l_1 , l_2 , l_3 (и т. д.) с обозначением соответствующих им углов α_1 , α_2 , α_3 (и т. д.). Таким образом, AB является трассой груженого сосуда, совмещенной с горизонтальной плоскостью.

2. Зная, что порожний сосуд движется в противоположном направлении, откладываем (см. рис. 7) его трассу BA, равную L , под трассой AB так, чтобы начало бремсберга A и его конец B лежали на одном перпендикуляре к совмещенным с горизонтальной плоскостью трассам AB и BA. На трассе BA откладываются участки бремсберга в восходящем порядке с указанием соответствующих им углов наклона.

3. Построениями (рис. 7) определяются положения скачков в величине статических сопротивлений (их число и промежутки между скачками) и расчетные углы для вычисления коэффициентов a_i и b_i . Коэффициенты a_i обусловлены положением груза в рассматриваемый момент, а коэффициенты b_i — положением порожняка.

Для вычисления коэффициентов μ в любом положении подъемных сосудов можно на основании предыдущих выкладок написать обобщенное выражение

$$\mu_i = a_i k_i - b_i \frac{Q'}{Q}, \quad (19)$$

Рассмотрим бремсберг, имеющий n перегибов профиля. Порядковый номер (индекс) самого нижнего участка такого бремсберга будет $n + 1$, причем общая наклонная длина бремсберга

$$L = l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n + l_{n+1}.$$

Участки отмеченной длины имеют углы наклона к горизонту соответственно

$$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots \alpha_n \text{ и } \alpha_{n+1}.$$

В общем случае у такого бремсберга длина участков

$$l_1 \neq l_2 \neq l_3 \neq \dots \neq l_n \neq l_{n+1},$$

а углы наклона

$$\alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3 \neq \dots \neq \alpha_n \neq \alpha_{n+1}.$$

Для более полной общности следует считать, что любое сочетание суммы двух, трех и т. д. длин участков рассматриваемого бремсберга не равно длине любого из участков.

В этом случае график статических сопротивлений будет иметь число скачков в величине статических сопротивлений, равное

$$z = 2n, \quad (24)$$

а число промежутков, на которых статические сопротивления изменяются по законам нисходящих прямых,

$$z' = 2n + 1 = z + 1. \quad (25)$$

Очевидно, таким же будет число коэффициентов μ . Вычислив все коэффициенты, согласно выражению (19), можно найти разности между смежными значениями μ , обозначив их соответственно

$$\left. \begin{aligned} \Delta\mu_1 &= \mu_1 - \mu_2, \\ \Delta\mu_2 &= \mu_2 - \mu_3, \\ \Delta\mu_z &= \mu_z - \mu_{z+1} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Начальную величину статического сопротивления следует всегда определять с помощью выражения (5)

$$(F_s)_0 = \mu_1 Q - pH.$$

Величина статического сопротивления в начале первого скачка вычисляется по формуле (13)

$$(F_s)_1' = (F_s)_0 + p\Delta h_1,$$

где

$$\Delta h_1 = \Delta L_1 (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_{n+1}). \quad (27)$$

Статическое сопротивление в конце первого скачка [по формуле (14)]

$$(F_s)_1'' = (F_s)_1' - \Delta\mu_1 Q.$$

Для определения всех последующих значений статических сопротивлений могут служить обобщенные выражения:

а) для начала скачка

$$(F_s)_i' = (F_s)_{i-1}'' + p\Delta h_i; \quad (2)$$

б) для конца скачка

$$(F_s)_i'' = (F_s)_i' - \Delta p_i Q, \quad (2)$$

где

$$\Delta h_i = \Delta L_i (\sin \alpha_r + \sin \alpha_n); \quad (3)$$

Δh_i — вертикальная проекция пути, пройденного навстречу друг другу двумя подъемными сосудами, причем каждый из них совершил путь длиной L_i .

Очевидно,

$$\sum_{i=1}^{i=z+1} \Delta h_i = 2H,$$

где H — вертикальная проекция общей наклонной длины бремсберга.

Величина конечного статического сопротивления [по формуле (28) при $i = z + 1$]

$$(F_s)_k = (F_s)_z'' + p\Delta h_{z+1}. \quad (3)$$

Проверкой может служить значение

$$(F_s)_k = p_{z+1} Q + pH. \quad (3)$$

5. Примерный расчет статических сопротивлений бремсберга с четырьмя перегибами профиля

Определим значение статических сопротивлений грузового вагона точного бремсберга с четырьмя перегибами профиля ($n = 4$) на основании следующих данных:

1) полезный груз за один спуск, $Q = 6000$ кг (2 вагонетки по 3000 кг);

2) мертвый груз, $Q' = 3300$ кг (2 вагонетки по 1650 кг);

3) общая наклонная длина бремсберга, $L = 1300$ м, складывается из следующих участков и углов наклона

$$\begin{array}{ll} l_1 = 150 \text{ м} & \text{при } \alpha_1 = 25^\circ \\ l_2 = 200 & \text{„ } \alpha_2 = 20^\circ \\ l_3 = 250 & \text{„ } \alpha_3 = 17^\circ \\ l_4 = 300 & \text{„ } \alpha_4 = 15^\circ \\ l_5 = 400 & \text{„ } \alpha_5 = 12^\circ \\ \hline L = 1300 \text{ м} \end{array}$$

4) вес 1 пог. м каната $p = 1,8$ кг.

У рассматриваемого бремсберга $l_1 \neq l_2 \neq l_3 \neq l_4 \neq l_5$ и сумма для любых двух смежных участков не равна длине любого отдельно участка.

Для такого бремсберга число скачков в величине статических сопротивлений, согласно выражению (24), должно составлять

$$z = 2n = 2 \cdot 4 = 8,$$

а число промежутков, на которых статические сопротивления изменяются по закону нисходящей прямой, согласно формуле (25),

$$z' = 8 + 1 = 9.$$

Таким же будет общее число коэффициентов μ .

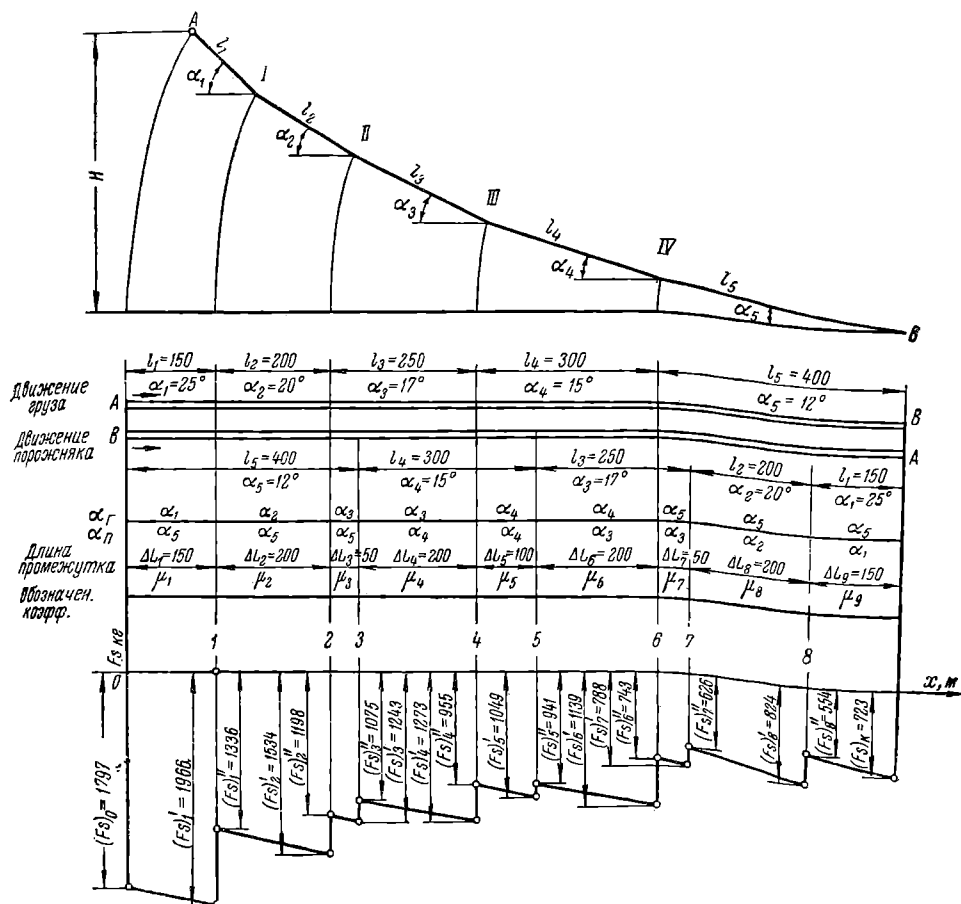


Рис. 8. Расчетная схема и график статических сопротивлений для бремсберга с четырьмя перегибами профиля (к числовому примеру) бремсберга
Римские цифры — номера перегибов профиля, арабские — номера скачков в величине статических сопротивлений

Углы α_r и α_n , а также длины промежутков между скачками ΔL_i рассчитаем по схеме рис. 8.

При определении коэффициентов μ_i (табл. 1) приняты следующие значения входящих в формулу (19) величин: коэффициенты $k_i = 1 - \frac{w}{a_i Q} = 0,75$; отношение $\frac{Q'}{Q} = \frac{3300}{6000} = 0,55$.

Коэффициент a_i по формуле (20) при $f = 0,015$	Коэффициент c_i по формуле (22) при $f = 0,015$	Коэффициент b_i по формуле (21)	Коэффициент μ_i по формуле (19)
$a_1 = 0,4094$	$c_1 = 0,2227$	$b_1 = -0,1867$	$\mu_1 = 0,409$
$a_2 = 0,3279$	$c_2 = 0,2227$	$b_2 = -0,1052$	$\mu_2 = 0,304$
$a_3 = 0,2777$	$c_3 = 0,2227$	$b_3 = -0,0550$	$\mu_3 = 0,248$
$a_4 = 0,2777$	$c_4 = 0,2735$	$b_4 = -0,0042$	$\mu_4 = 0,220$
$a_5 = 0,2415$	$c_5 = 0,2735$	$b_5 = +0,0290$	$\mu_5 = 0,167$
$a_6 = 0,2445$	$c_6 = 0,3063$	$b_6 = +0,0618$	$\mu_6 = 0,149$
$a_7 = 0,1933$	$c_7 = 0,3063$	$b_7 = +0,1130$	$\mu_7 = 0,083$
$a_8 = 0,1933$	$c_8 = 0,3561$	$b_8 = +0,1628$	$\mu_8 = 0,056$
$a_9 = 0,1933$	$c_9 = 0,4366$	$b_9 = +0,2433$	$\mu_9 = 0,011$

Вертикальные проекции наклонных участков бремсберга

$$h_1 = l_1 \sin \alpha_1 = 150 \cdot 0,423 = 63 \text{ м}$$

$$h_2 = l_2 \sin \alpha_2 = 200 \cdot 0,342 = 68$$

$$h_3 = l_3 \sin \alpha_3 = 250 \cdot 0,294 = 74$$

$$h_4 = l_4 \sin \alpha_4 = 300 \cdot 0,269 = 78$$

$$h_5 = l_5 \sin \alpha_5 = 400 \cdot 0,208 = 83$$

$$H \text{ (всего бремсберга)} = 365 \text{ м}$$

Полный вес активной длины отвеса каната

$$pH = 1,8 \cdot 365 = 657 \text{ кг.}$$

Значения $\Delta \mu_i$ и $\Delta \mu_i Q$ для рассматриваемых условий приведены в табл. 2, а значения Δh_i и $p \Delta h_i$ — в табл. 3.

Таблица 2

$\Delta \mu_i = \mu_i - \mu_{i-1}$ по формуле (26)	$\Delta \mu_i Q, \text{ кг}$	$\Delta \mu_i = \mu_i - \mu_{i-1} + 1$ по формуле (26)	$\Delta \mu_i Q, \text{ кг}$
$\Delta \mu_1 = 0,105$	$\Delta \mu_1 Q = 630$	$\Delta \mu_5 = 0,018$	$\Delta \mu_5 Q = 108$
$\Delta \mu_2 = 0,056$	$\Delta \mu_2 Q = 336$	$\Delta \mu_6 = 0,066$	$\Delta \mu_6 Q = 396$
$\Delta \mu_3 = 0,028$	$\Delta \mu_3 Q = 168$	$\Delta \mu_7 = 0,027$	$\Delta \mu_7 Q = 162$
$\Delta \mu_4 = 0,053$	$\Delta \mu_4 Q = 318$	$\Delta \mu_8 = 0,045$	$\Delta \mu_8 Q = 270$

$\Delta L_i, \text{ м (по рис. 8)}$	$\sin \alpha_r$	$\sin \alpha_n$	Δh_i по формуле (30), м	$p\Delta h_i$
$\Delta L_1 = 150$	0,423	0,208	94	169
$\Delta L_2 = 200$	0,342	0,208	110	198
$\Delta L_3 = 50$	0,292	0,208	25	45
$\Delta L_4 = 200$	0,292	0,259	110	198
$\Delta L_5 = 100$	0,259	0,259	52	94
$\Delta L_6 = 200$	0,259	0,242	110	198
$\Delta L_7 = 50$	0,208	0,292	25	45
$\Delta L_8 = 200$	0,208	0,342	110	198
$\Delta L_9 = 150$	0,208	0,423	94	169
$L = 1300$			730	1314

$$\sum_{i=1}^{i=9} \Delta h_i = 2H = 2 \cdot 365 = 730 \text{ м};$$

$$p2H = 1,8 \cdot 2 \cdot 365 = 1314 \text{ кг}.$$

Начальная величина статического сопротивления, согласно выражению (5),

$$(F_s)_0 = \mu_1 Q - pH = 0,409 \cdot 6000 - 657 = 1797 \text{ кг}.$$

Статическое сопротивление в начале первого скачка, согласно формуле (13),

$$(F_s)_1' = 1797 + 169 = 1966 \text{ кг}.$$

То же в конце первого скачка, согласно выражению (14),

$$(F_s)_1'' = 1966 - 630 = 1336 \text{ кг}.$$

Последующие значения статических сопротивлений определяются по формулам (28) и (29)

$$(F_s)_2' = 1336 + 198 = 1534 \text{ кг};$$

$$(F_s)_2'' = 1534 - 336 = 1198 \text{ кг};$$

$$(F_s)_3' = 1198 + 45 = 1243 \text{ кг};$$

$$(F_s)_3'' = 1243 - 168 = 1075 \text{ кг};$$

$$(F_s)_4' = 1075 + 198 = 1273 \text{ кг};$$

$$(F_s)_4'' = 1273 - 318 = 955 \text{ кг};$$

$$(F_s)_5' = 955 + 94 = 1049 \text{ кг};$$

$$(F_s)_5'' = 1049 - 108 = 941 \text{ кг};$$

$$(F_s)'_6 = 941 + 198 = 1139 \text{ кг};$$

$$(F_s)''_6 = 1139 - 396 = 743 \text{ кг};$$

$$(F_s)'_7 = 743 + 45 = 788 \text{ кг};$$

$$(F_s)''_7 = 788 - 162 = 626 \text{ кг};$$

$$(F_s)'_8 = 626 + 198 = 824 \text{ кг};$$

$$(F_s)''_8 = 824 - 270 = 554 \text{ кг};$$

Конечное значение статического сопротивления [по формуле (31)]

$$(F_s)_k = 554 + 169 = 723 \text{ кг}.$$

Проверка, согласно выражению (32),

$$(F_s)_k = \mu_9 Q + pH = 0,011 \cdot 6000 + 657 = 723 \text{ кг}.$$

Конечное значение статического сопротивления, вычисленное различными способами, оказалось одинаковым, что подтверждает правильность всех предшествующих вычислений.

График изменения статических сопротивлений за период одного спуска приведен на рис. 8.