**Канатный транспорт (канатные дороги и лифты).**

**Лекция № 2.**

План лекции.

1. Экономические показатели и основные положения расчета сети ППКД.
2. Основы теории канатных систем.

***1.*** ***Экономические показатели и основные положения расчета сети ППКД.***

От места посадки к месту высадки пассажиров можно доставить различными видами транспорта, автомобильным, снегоходами, ППКД, вертолетами и т.д.

На первом этапе анализируется возможность использования ППКД и альтернативных видов транспорта. Если принимается решение доставку осуществлять с помощью ППКД, то рассматривается возможность и целесообразность применения конкретного типа ППКД на основании анализа технико-экономических показателей. При этом необходимо учитывать назначения ППКД, то есть использование ППКД в качестве городского транспорта или для перевозки лыжников, спортсменов, посетителей выставочного комплекса, рабочих промышленных предприятий.

Исходными данными для проектирования ППКД являются:

- пропускная способность ППКД;

- характеристика трассы (длина по горизонтали, перепад высот станций посадки и высадки пассажиров, углы наклона, рельеф местности, наличие сооружений, пересечений с другими дорогами и т.п.);

- условия посадки и высадки пассажиров, сочетание с другими ППКД;

- перспективы развития района в экономическом, культурном, спортивном отношении, экологические аспекты строительства ППКД.

Технико-экономический анализ выполняется на начальной стадии проектированиях ППКД и должен подтвердить экономическую целесообразность строительства, обоснованность выбора конкретного типа ППКД.

Для каждого выбранного варианта индивидуально определяются капитальные затраты на приобретение и монтаж оборудования (со строительной частью), эксплуатационные расходы, численность обслуживающего персонала ППКД, срок окупаемости.

Капитальные затраты на сооружение ППКД

*К = Кл + Кп + Кпр + Кобв,*

где *Кл*- затраты на строительство линейных опор и сооружений;

*Кп* - строительство пер­ронов для посадки и высадкипассажиров;

*Кпр* - сооружение приводной станции;

*Кобв*- сооружение обводной станции.

Для кресельных ППКД, используемых в горной местности, длиной 1,5…2 км, с разностью уровней от 300 до 500 м и пропускной способностью около 500 чел/ч, затраты на строительство промежуточных опор и сооружений, приводной нижней) и обводной станций(включая перроны и натяжные устройства) относятся между собой в среднем, как 1:0,5:0,2. Для приблизительной оценки за­трат на строительство ППКД можно использовать стоимость «одного километра» промежуточных опор и сооружений и к полученным затратам на строи­тельство линейных сооружений добавлять затраты на строительство станций, взятые из вышеприведенного соотношения или по аналогам.

Для приближенной сравнительной оценки затрат на строитель­ство ППКД разных типов можно пользоваться принятым в Австрии соотношением Б : К : Г1 : Г2 : М = 1 : (1,4 - 1,5) : (2,8 - 3) : : (3,7 - 4) : (4,2 - 4,8), где Б, К, Г1, Г2 и М- затраты на строи­тельство соответственно буксировочной, кресельной, гондольной одно- и двухканатной и маятниковой ППКД [0].

Годовые эксплуатационные расходы

*Ср= З + Э + М + 0,01∑К¡(А¡+ Аp¡),*

где *З* – годовая заработная плата;

*Э* – расходы на электроэнергию;

*М* – расходы на смазочные и другие материалы;

*К¡*- стоимость отдельных запасных частей, используемых при ремонте;

*А¡*- амортизационные отчисления в процентах;

*Аp¡*- амортизационные отчисления на ремонт в процентах.

Основную часть эксплуатационных расходов состав­ляют заработная плата, затрат на электроэнергию и амортизационные отчисления. Расходы на текущий ремонт и содержание зданий и сооружений незначительны. Увеличение дальности перевозок снижает удельный вес расходов на заработную плату, так как основная масса рабочих находится на станциях, и их численность и, следовательно, фонд заработной платы от длины дороги практически не зависят.

Ежегодные приведенные расходы

*Сгод = КЕн +Ср,*

где *Ен* - норматив­ный коэффициент эффективности капитальных вложений (Ен = 0,1…0,15), учитывающий срок окупаемости.

Основным экономическим показателем работы ППКД является себестоимость перевозок, определяемая как приведенные годовые затраты на строительство и эксплуатацию, отнесенные к объему перевозок за год, т.е. годовой пропускной способности ППКД.

Стоимость перевозки одного пассажира

*Ц = Сгод/Пг,*

где Пг – годовая пропускная способность ППКД

*Пг = (П.км.Т.n.N)/кн,*

где *П* – часовая пропускная способность ППКД, пас/час;

*км* – коэффициент использования дороги во времени;

*Т* – продолжительность смены в часах;

*n* – количество смен в сутки;

*N* – число рабочих дней в году;

*кн* – коэффициент неравномерности загрузки подвижного состава.

Годовая пропускная способность может изменяться в значительных пределах, в зависимости от среднесуточного использования дороги во времени (км = 0,4…0,9) и неравномерности пассажирского потока в течение года (к = 1,0 … 2,0), которые в свою очередь зависят от назначения ППКД, местных условий, сезонности, погоды и других фак­торов.

Сравнительный анализ технико-экономических показателей ис­пользования ППКД в качестве средства городского транспорта, вы­полненный ВНИИПТМАШем [20], показал, что в среднем 1 км канатной дороги заменяет 15 км автомобильной дороги, а капитальные затраты для ППКД в 8 и более раз ниже, чем для традиционных средств городского транспорта. Себестоимость перевозок, определен­ная по приведенным затратам на 1 км (с учетом сокращения длины транспортирования), для ППКД в 1,5 и более раз меньше. При этом для маятниковых дорог самая высокая, а для кресельных и буксировочных - самая низкая себестоимость перевозок. Затрата времени на поездку на канатных дорогах самая минимальная, что удобно для населения [33].

***2. Основы теории канатных систем.***

На подвесных канатных дорогах (ПКД) основными элементами является канаты, которые по назначению бывают несущими, тяговыми, несуще-тяговыми и натяжными. Перечисленные канаты имеют различное назначение, но все они воспринимают равномерно распределенную по длине нагрузку от силы тяжести самого каната и растягивающие усилие, создаваемое натяжным устройством. На канаты несущие и несуще-тяговые кроме этих нагрузок действует сила тяжести подвижного состава.

**Канат под действием равномерно распределенной нагрузки**

Рассмотрим основы теории канатных систем на примере несущее-тягового каната ПКД. Характерной особенностью канатов ПКД является большая длина пролетов и малая жесткость изгиба, поэтому для их расчета возможно применение положений теории гибкой нити [0, 12]. Для существующих на практике случаев сочетания действующих сил и перегибов канатов ПКД возможно применять раздел из теории упругой нити с малыми стрелами провисания [0]

***f<<l,***

где *f –* стрела провисания нити,

*l –* длина пролета.

Однако, применение даже этого раздела теории упругой нити связано с необходимостью использования при решении уравнения цепной линии метода последовательных приближений, что требует высокой точности вычислений и может привести к существенной ошибке.

Задача значительно упрощается, если кривую провисания в пролете под действием собственной силы тяжести рассматривать как квадратичную параболу. При замене цепной линии квадратичной параболой для большинства существующих ПКД отношение максимальной стрелы провеса к длине пролета *f/l* *<0,1* не превышает 2…3%. При увеличении пролетов более 1 км, что практически встречается редко, ошибка возрастает и может достигать 10%.

Для каната с малой стрелой провисания принимаем, что сила тяжести каната равномерно распределена не по кривой провисания, а по длин хорды пролета.

Рассмотрим схему каната, на который действует равномерно распределенная по хорде пролета нагрузка. Начало координат расположим в точке левой опоры (рис. 2.1). Из условия статического равновесия системы сумма сил на ось *x* равна нулю

**∑ *x* = - HA + HB = 0,**

отсюда HA = HB.

xtg β

h/2

x

h

B

SB

HB

VB

q

β

l/2

y

l-x

l

x

fx

fmax

y

α

β

A

HA

VA

SA



Рис. 2.1. Схема каната с равномерно распределенной по хорде пролета нагрузкой.

Если разрезать канат в произвольном сечении (точка С) и рассмотреть только правую часть, то найдем

**-∑ *x* = - H*Х* + HB = 0**,

отсюда H*Х* = HB = HA = H.

Таким образом, горизонтальная составляющая натяжения каната, нагруженного вертикальными силами одинакова в о всех сечениях.

Уравнения кривой провисания каната, отнесенное к началу координат в верхней опоре А имеет вид

***y=x tgβ+fx*** (2.1)

Из теории гибкой нити [0] известно, что

***fx=* М*х/*H,** (2.2)

где М*х* – изгибающий момент в сечении *х* простой балки, загруженной аналогично нити.

Тогда ***y=x tgβ+* М*х/*H** (2.3)

Для равномерно распределенной по хорде пролета нагрузки q (рис.2.1)

**М*х=qlx/2cosβ – qx2/2cosβ = qx(l-x)/ 2cosβ*.** (2.4)

Следовательно,

***y=x tgβ + qx(l-x)/ 2Нcosβ***(2.5)

Это уравнение параболы в системе координат приведенной на рис.2.1. Второе слагаемое правой части выражения представляет собой провес каната

***fx=* М*х/*H= *qx(l-x)/ 2Нcosβ***(2.6)

Тангенс угла наклона касательной к кривой

***tgα=dy/dx= tgβ + q(l-2x)/ 2Нcosβ****.* (2.7)

В середине пролета при *x=* *l/2 tgα= tgβ.*

Максимальное значение момента, а следовательно и провеса каната с равномерно распределенной по хорде вертикальной нагрузкой достигаетв середине пролета при *x= l/2*

***fmax= ql2/8Нcosβ.*** (2.8)

По известному максимальному провесу каната определим горизонтальную составляющую натяжения

***Н= ql2/8fmaxcosβ.***  (2.9)

Подставляя это выражение в формулу 1.7, получим еще одну зависимость для угла наклона касательной к кривой

***tgα=dy/dx= tgβ + 4fmax (l-2x)/l2.*** (2.10)

Величина угла наклона касательной к кривой у верхней опоры А при *x=0*

***tgαА=tgβ + 4fmax /l.***

Подставим в это выражение *tgβ=h/l,* получим

***tgαА =(4fmax+h)/l,***(2.11)

где *h –* разность отметок высот опор А и В.

Угол наклона у нижней опоры В при *x=l*

***tgαВ = -(4fmax+h)/l.***(2.12)

Рассмотрим возможные случаи подхода каната к нижней опоре.

1. При ***4fmax=h tgαВ =0***(рис. 2.2, *а*)канат подходит к нижней опоре В горизонтально. Вертикальная сила в точке В равна нулю. Верхняя опора воспринимает всю вертикальную нагрузку, т.е.

***VA= ql, VB=0.***

1. Если ***4fmax>h tgαВ<0*** (рис. 2.2, *б*), то вертикальная составляющая реакции опоры В направлена вверх.
2. Если ***4fmax<h tgαВ>0***(рис. 2.2, *в*), то вертикальная составляющая реакции опоры В направлена вниз, т.е. опора должна оборудоваться отжимными роликами.

A

4fmax<h

A

αA

fmax

fmax

αB

B

αB

B

A

αA

4fmax>h

h

B

fmax

αA



Рис.2.2. Возможные случаи подхода каната к нижней опоре:

*а*) канат подходит к нижней опоре В горизонтально;

б) канат подходит к нижней опоре В снизу;

*в*) канат подходит к нижней опоре В сверху.

Определим значение горизонтальной составляющей натяжения каната. В середине пролета касательная к параболе (точка Д рис. 2.1) параллельна хорде, то натяжение каната в середине пролета направлено под углом *β* к горизонту. Тогда горизонтальная составляющая

***Н=SД cosβ****,* (2.13)

где *SД* – натяжение каната в точке Д.

Согласно теории гибкой нити [0] разность натяжений в любых двух точках ***i*** и ***j*** с разностью ординат ***h*** будет

**Δ*S = Si - Sj = qh.*** (2.14)

Это выражение справедливо с небольшой погрешностью и для параболы [0], тогда

*S****Д =*** *S****А – (h/2 + fmax) q,*** *S****Д =*** *S****В + (h/2 - fmax) q.***

Сложив, эти выражения получим

*S****Д = (****S****А+*** *S****В)/2 – q fmax =*** *S****ср – q fmax,*** (2.15)

где *S****ср=*** ***(****S****А+*** *S****В)/2 –*** условное среднее значение натяжения каната в пролете.

Так как *S****А=*** *S****В+ qh,*** то ***Sср=* *(SВ+ qh + SВ)/2=ТВ+ qh/2.***

Подставим выражение 15 в формулу 13 получим

***Н=(Sср – q fmax) cosβ.***(2.16)

Для практических расчетов можно пренебречь выражением ***q fmax,*** так как его величина мала по сравнению с*S****ср***, тогда

***Н=****S****ср cosβ.***(2.17)

Длину каната в одном пролете с равномерно распределенной нагрузкой определим по формуле для гибкой нити [12]

***L = l/cosβ + (cos3β/2H2) 0*ʃ*lQ2dx,*** (2.18)

где *Q* –нормальная к оси *x* перерезывающая сила в сечении простой балки, загруженной так же как канат. Определенный интеграл от *0* до ***l*** можно вычислить по методу Верещагина путем перемножения эпюр перерезывающих сил[0]. В результате получим выражение

***L = l/cosβ +q2l3cosβ/24H2.*** (2.19)

Длина каната в пролете рассчитанная по этой формуле отличается от длины цепной линии незначительно [0, 11].

С учетом зависимости 1.17 длина каната будет

***L = l/cosβ +q2l3cosβ/24*** *S****2ср cosβ.***

Выразим длину каната через величину провеса в середине пролета, подставив в выражение 19 значение ***fmax*** из формулы 8

***L = l/cosβ + 8f2max cos3β/3l.*** (2.20)

Рассмотрим, существует ли связь между провесом и напряжением в канате под действием только распределенной силы тяжести, для этого формулу 1.7 подставим значение ***Н*** из выражения 1.16 и получим

***fmax= ql2/8*** *S****срcos2β,*** отсюда *S****ср= ql2/8fmaxcos2β.***

Среднее напряжение в канате будет

***Ϭ=****S****ср/F= ql2/8Ffmaxcos2β,***

где ***F -*** площадь поперечного сечения каната.

Подставим вместо ***q*** его значение ***q= Fρ,*** где ***ρ –*** плотность материала каната.

Тогда ***Ϭ= ρl2/8fmaxcos2β.***

Отсюда следует, что напряжение в канатах из одного материала независимо от их диаметра при одинаковых провесах в пролете длиной ***l*** будет одинаково.

**2.3 Канат под действием равномерно распределенной нагрузки**

**и сосредоточенных сил**

Суммарный провес каната ***fx*** определяется исходя из суммарного момента ***Мсум*** в сечении ***x***простой балки, загруженной распределенной нагрузкой и сосредоточенной силой аналогично канату [0,12]

***fсум= Мсум /Н = (М1+М2)/Н = f1 + f2,***

где ***М1***,***М2,*** и ***f1, f2 –***моменты и провесы соответственно, от распределенной нагрузкой и сосредоточенной силы.

Учитывая выражение 2.2, 2.4 и 2.6 получим провес от равномерно распределенной нагрузкой

***f1= М1 /Н=*** *qx(l-x)/ 2****Н****cosβ*

и от действиясосредоточенной силы

***f2= М2 /Н.***

Форма провисания каната соответствует кривой момента ***Мсум*** и представляет собой ряд пересекающихся парабол [0]. Точки пересечения парабол расположены в местах приложения сосредоточенных сил. При действии на канат одной сосредоточенной силы ***Р*** провес будет равен

***f2 = М2 /Н = Р****x(l-x)/****Н****l.*

Суммарный провес в точке под грузом

***fсум= f1 + f2=*** *qx(l-x)/ 2****Н****cosβ +* ***Р****x(l-x)/****Н****l*

или ***fсум*** *=**x(l-x)(ql+****Р)****/2****Н****lcosβ.* (2.21)

Длину каната, находящемуся под действием равномерно распределенной нагрузки *q* и сосредоточенной силы ***Р*** определим, вычислив значение интеграла из выражения 18. Для условий одновременного приложения распределенной нагрузки и сосредоточенной силы получим

*0*ʃ*l Q2dx =0*ʃ*lQ12dx + 0*ʃ*lQ22dx +20*ʃ*lQ1Q2dx,*

где *Q1* – перерезывающая сила от распределенной нагрузки *q/cosβ*, действующей на горизонтальную балку,

*Q2* - перерезывающая сила от нагрузки ***Р.***

Путем перемножения перерезывающих сил по методу Верещагина с учетом выражения 1.19 получим длину каната в пролете

*L=l/cosβ +q2l3cosβ/24H2+[Р2x(l-x)/2Н2l]cos3β +[qРx(l-x)/2Н2]cos2β.*

Длина каната при расположении в середине пролета *x= l/2*

*L=l/cosβ +q2l3cosβ/24H2+(Р2l/8Н2l)cos3β + (qРl/2Н)cos2β.*

При большем числе сосредоточенных сил в пролете решение выполняется аналогично [0, 12].