

Ю.К. Горячев, канд. техн. наук, доцент
А.С. Куропятник, соискатель, ассистент
Днепропетровского национального университета
железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПА МОДУЛЬНОЙ КОМПОНОВКИ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ НАГРУЖЕННОСТИ НЕСУЩЕГО КАНАТА МАЯТНИКОВОЙ ПОДВЕСНОЙ ДОРОГИ

Канатные дороги являются сложными транспортными системами, предназначенными для перевозки людей и грузов на средние расстояния, и на сегодня это хорошая альтернатива традиционным видам транспорта, превосходящая их по многим критериям. Поэтому создание комплексов автоматизированного проектирования таких установок является актуальной задачей, решению которой способствует создание универсальной методики расчета ее элементов. В данной работе описан особый подход к формированию математической модели нагруженности несущего каната маятниковой подвесной дороги как одного из важнейших ее компонентов.

Ключевые слова: канатная дорога, несущий канат, математическая модель, натяжение несущего каната.

Канатні дороги є складними транспортними системами, призначеними для перевезення людей та вантажів на середні відстані, та на сьогодні це є гідна альтернатива традиційним видам транспорту, що перевищуює їх за багатьма критеріями. Тому розробка комплексів автоматизованого проектування таких установок є актуальною задачею, розв'язанню якої сприятиме створення універсальної методики розрахунку її елементів. У даній роботі викладено особливий підхід до формування математичної моделі навантаженості несучого каната маятнікової підвісної дороги як одного з найважливіших її компонентів.

Ключові слова: канатна дорога, несучий канат, математична модель, натяг несучого каната.

Aerial cableways are complex transportation systems designed to transport people and goods at intermediate distances, and today they are a good alternative to traditional kinds of transport, surpassing them by various criteria. Therefore, the creation of complex computer-aided design of such systems is an urgent task that promotes the creation of a universal method of calculation of its elements. In this article we describe a specific approach to the formation of a mathematical model of load of track cable of reversible cableway as one of its major components.

Keywords: aerial cableway, track cable, mathematical model, load of track cable.

Введение. Как известно [1], при проектировании любых изделий, будь то детали, узлы, машины или иные сооружения, стремятся к соблюдению основных принципов рационального конструирования. Поэтому типовые проекты, как реализация принципа унификации, нашли довольно широкое применение при разработке и конструировании различного рода машин. Такие проекты базируются на сочетаниях основных условий работы изделия и представлены в виде типовых расчетных схем и методик. Однако бывают случаи, когда каждый объект проектирования является уникальным в своем роде и характеризуется особыми, отличными от других величинами основных параметров. К таким относятся и подвесные канатные дороги, каждая из которых, не смотря на слабость зависимости от условий эксплуатации [2], все же требует отдельного рассмотрения с учетом особенностей сооружения, назначения, обслуживания, ремонта и иных

факторов. В связи с этим актуальной становится задача разработки универсальных методик, позволяющих максимально упростить и автоматизировать (с использованием ЭВМ) процесс проектирования новых и проверочного, а также исследовательского расчетов действующих канатных дорог разных типов.

Любая двухканатная дорога состоит из конечных станций 1, несущего 2 и тягового 3 канатов, линейных опор 4 и подвижного состава 5 (рис. 1). В зависимости от типа дороги последний может быть представлен в виде тары для транспортировки различного рода грузов (грузовые дороги) или вагонов различной вместимости (пассажирские дороги). По характеру перемещения подвижного состава дороги разделяют на кольцевые (перемещение в одном направлении, привод не реверсивный, количество единиц подвижного состава определяется длиной трассы) и маятниковые (встречное возвратно-поступательное движение двух вагонов, привод реверсивный). Далее будем рассматривать двухканатные маятниковые подвесные дороги (МПКД).

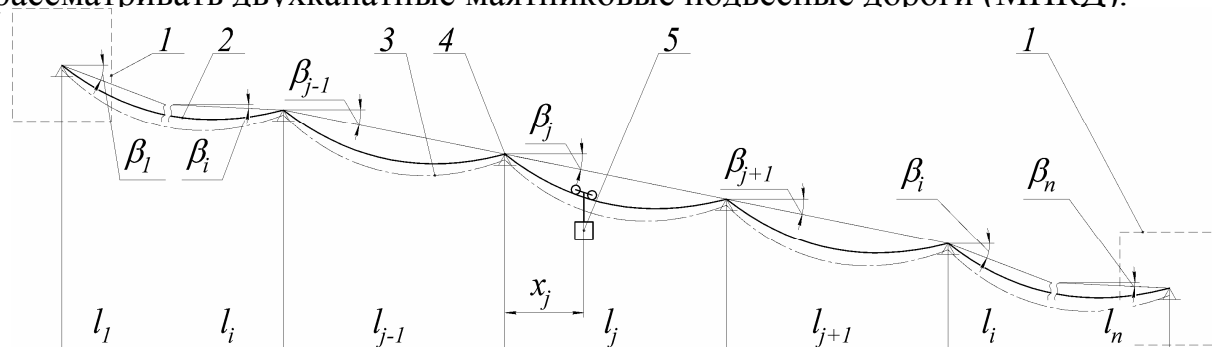


Рисунок. 1. Схема двухканатной МПКД

Анализ исследований и публикаций. По данным статистики [3], отображающей безопасность использования различных видов городского транспорта с целью обеспечения пассажироперевозок, канатные дороги являются наиболее безопасными, в то время как троллейбусы занимают второе место (в 4 раза больше несчастных случаев), трамваи – третье (в 5 раз больше) и автотранспорт – четвертое (в 8 раз больше). Однако за последние годы безопасность использования канатных дорог различных типов снизилась, что объясняется увеличением количества импортируемых дорог, эксплуатировавшихся в других странах и не имеющих полного пакета технической документации, позволяющей определить важные показатели дальнейшего использования сооружения. Поэтому одним из способов повышения безопасности использования канатных дорог и, в частности, реализации пассажироперевозок, является улучшение условий проведения экспертиз с целью определения необходимых технических параметров [4].

Другой задачей является повышение критериев безопасного использования проектируемых дорог. Постановлением Кабинета Министров Украины от 15.10.2003 пассажирские подвесные канатные дороги были включены в список оборудования повышенной опасности в составе грузоподъемных машин, что требует повышения точности методик проектного расчета и исследования существующих канатных дорог, а также внедрения современных технологий в системы управления и контроля.

Решению первой части проблемы существенно способствует математическое моделирование процессов, сопровождающих работу дороги. Данному вопросу посвящена работа [5], в которой рассматривается статическая нагруженность канатных систем как вантовых, но не учитывается изменение параметров, определяющих усилия растяжения канатов, при перемещении вагонов. Результатам внедрения современных

технологий и способов диагностики посвящены работы [6-9], авторы которых

практически не затрагивают вопросы прочности элементов канатной дороги.

Постановка задачи. Целью работы является обоснование принципов формирования математической модели нагруженности несущего каната маятниковой подвесной дороги на основании применения принципа модульной компоновки с использованием основных положений теории гибких нитей.

Изложение основного материала. Известна [2, 10, 11] и широко применяется методика расчета натяжения канатов, в основе которой лежит допущение о том, что кривая их провисания – цепная линия – несущественно (2...3 % по силовому расчету [2]) отличается от квадратичной параболы, что значительно упрощает проектирование однопролетных (например, верхний участок дороги «Мисхор – Ай-Петри») и длиннопролетных дорог (в последнем случае несущий канат разбивается на отрезки, закрепленные и натянутые на якорных и натяжных промежуточных станциях). Однако наиболее распространены многопролетные МПКД с длинами пролетов до 500 м. В подобных случаях несущий канат может быть рассмотрен как многопролетная гибкая нить, провисающая между опорами по параболам. При этом кривые провисания каната определяются основными характеристиками пролетов (длина l и угол наклона хорды β) и горизонтальной составляющей натяжения H .

Согласно принципу модульной компоновки [1], при проектировании изделие целесообразно представлять в виде отдельных независимых структурных единиц – модулей, характеризующихся базовыми (входными) и определяемыми (выходными) величинами. При моделировании нагруженности несущего каната подвесной дороги в качестве модулей можно рассматривать пролеты с характерными расчетными признаками.

При классификации пролетов назначим пролет, в котором в данный момент перемещается вагон, базовым (j -ым). Тогда все пролеты можно условно разделить на лежащие выше ($i < j$) и ниже ($i > j$) базового; при этом частными случаями выделяем $j=1$ и $j=n$, где n – количество пролетов дороги (см. рис. 1).

В основу математической модели положим равновесие несущего каната на опорных башмаках при любом положении $\delta_j = x_j / l_j$ вагона в пролете (здесь x_j – координата, указывающая расстояние от верхней опоры пролета до точки приложения веса вагона P по горизонтали). Данное условие может быть представлено формулой Эйлера

$$T_{нб} / T_{сб} = \exp(\mu \cdot \varphi), \quad (1)$$

где $T_{нб}$ и $T_{сб}$ – натяжение несущего каната возле опоры, на которой рассматривается равновесие (зависит от i);

μ – коэффициент трения в паре «несущий канат – опорный башмак»;

φ – угол обхвата башмака канатом.

Первым модулем считаем пролет $i < j$ (рис. 2). В данном случае вагон перемещается в пролете, опорные точки которого характеризуются высотными отметками, меньшими, чем опоры рассматриваемого пролета. Следовательно,

$$T_i^B = T_{i-1}^H \cdot \exp(\mu \cdot \varphi_{i-1,i}), \quad (2)$$

где T_{i-1}^H и T_i^B – натяжения каната возле опоры, разделяющей $(i-1)$ -ый и i -ый пролеты.

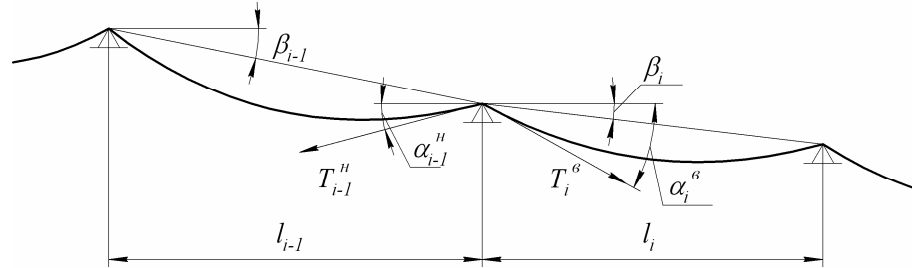


Рисунок. 2. Расчетная схема модуля № 1

Данное условие реализуется такой математической моделью ($i = 2, j = 1$):

$$H_i \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_i^B} = H_{i-1} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{i-1}^H} \cdot \exp\left(\mu \cdot \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha_i^B - \operatorname{tg} \alpha_{i-1}^H}{1 + \operatorname{tg} \alpha_i^B \cdot \operatorname{tg} \alpha_{i-1}^H}\right); \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_i^B = \operatorname{tg} \beta_i + \frac{ql_i}{2H_i \cos \beta_i}; \quad \operatorname{tg} \alpha_{i-1}^H = \operatorname{tg} \beta_{i-1} - \frac{ql_{i-1}}{2H_{i-1} \cos \beta_{i-1}}, \quad (4)$$

где α_{i-1}^H и α_i^B – углы наклона касательных к кривым провисания отрезков каната возле опоры, разделяющей $(i-1)$ -ый и i -ый пролеты; q – погонный вес каната.

Вторым модулем можно считать пролет $i > j$ (рис. 3). В этом случае высотные отметки опорных точек рассматриваемого пролета меньше тех, что характеризуют j -ый пролет, поэтому

$$T_i^H = T_{i+1}^B \cdot \exp(\mu \cdot \varphi_{i,i+1}), \quad (5)$$

что находит отражение в следующей системе уравнений ($i = j + 1, n - 1$):

$$H_i \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_i^H} = H_{i+1} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{i+1}^B} \cdot \exp\left(\mu \cdot \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha_{i+1}^B - \operatorname{tg} \alpha_i^H}{1 + \operatorname{tg} \alpha_{i+1}^B \cdot \operatorname{tg} \alpha_i^H}\right); \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{i+1}^B = \operatorname{tg} \beta_{i+1} + \frac{ql_{i+1}}{2H_{i+1} \cos \beta_{i+1}}; \quad \operatorname{tg} \alpha_i^H = \operatorname{tg} \beta_i - \frac{ql_i}{2H_i \cos \beta_i}. \quad (7)$$

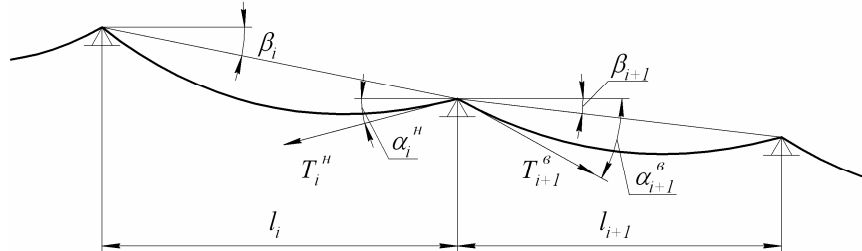


Рисунок. 3. Расчетная схема модуля № 2

Третий модуль отображает частный случай расположения вагона на трассе, а именно в первом пролете ($j = 1$), и описывает равновесие несущего каната на опоре, разделяющей первый и второй пролеты (рис. 4). Поскольку высотные отметки опорных точек первого пролета больше величин соответствующих характеристик второго пролета, то

$$T_1^H = T_2^B \cdot \exp(\mu \cdot \varphi_{1,2}), \quad (8)$$

что может быть представлено следующей системой уравнений ($\delta_1 = \operatorname{var}(0;1)$):

$$H_1 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_1^H} = H_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_2^B} \cdot \exp(\mu \cdot \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha_2^B - \operatorname{tg} \alpha_1^H}{1 + \operatorname{tg} \alpha_2^B \cdot \operatorname{tg} \alpha_1^H}); \quad (9)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_1^H = \operatorname{tg} \beta_1 - \frac{ql_1}{2H_1 \cos \beta_1} \cdot (1 + 2k_1 \cdot \delta_1); \quad (10)$$

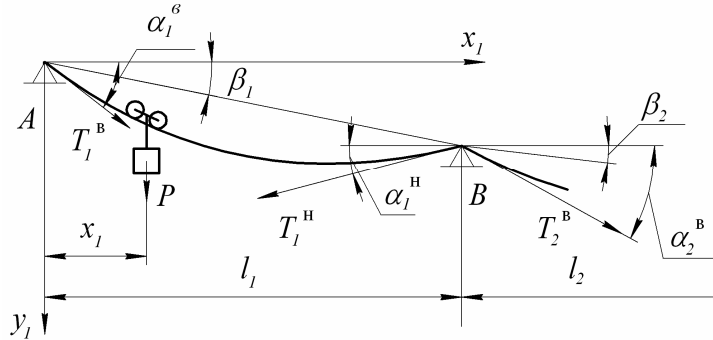


Рисунок. 4. Расчетная схема модуля № 3

$$\operatorname{tg} \alpha_2^B = \operatorname{tg} \beta_2 + \frac{ql_2}{2H_2 \cos \beta_2}; \quad k_1 = \frac{P}{ql_1} \cos \beta_1. \quad (11)$$

Четвертый модуль является наиболее общим в части моделирования пролета, в котором перемещается вагон, поскольку включает в себя все случаи $j = 2, n - 1$ (рис. 5). Особенности равновесия несущего каната на опорах могут быть описаны следующей системой уравнений:

$$H_j \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_j^B} = H_{j-1} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{j-1}^H} \cdot \exp(\mu \cdot \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha_j^B - \operatorname{tg} \alpha_{j-1}^H}{1 + \operatorname{tg} \alpha_j^B \cdot \operatorname{tg} \alpha_{j-1}^H}); \quad (12)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_j^B = \operatorname{tg} \beta_j + \frac{ql_j}{2H_j \cos \beta_j} [1 + 2k_j (1 - \delta_j)]; \quad (13)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{j-1}^H = \operatorname{tg} \beta_{j-1} - \frac{ql_{j-1}}{2H_{j-1} \cos \beta_{j-1}}; \quad (14)$$

$$H_j \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_j^H} = H_{j+1} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{j+1}^B} \cdot \exp(\mu \cdot \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha_{j+1}^B - \operatorname{tg} \alpha_j^H}{1 + \operatorname{tg} \alpha_{j+1}^B \cdot \operatorname{tg} \alpha_j^H}); \quad (15)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_j^H = \operatorname{tg} \beta_j - \frac{ql_j}{2H_j \cos \beta_j} \cdot (1 + 2k_j \cdot \delta_j); \quad (16)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{j+1}^B = \operatorname{tg} \beta_{j+1} + \frac{ql_{j+1}}{2H_{j+1} \cos \beta_{j+1}}; \quad k_j = \frac{P}{ql_j} \cos \beta_j. \quad (17)$$

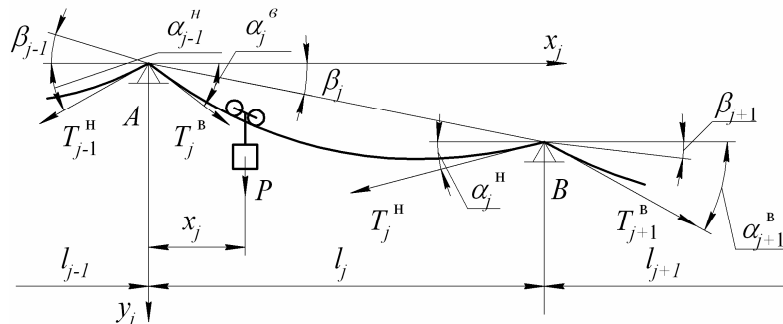


Рисунок. 5. Расчетная схема модуля № 4

При этом $\delta_j = \text{var}(0;1)$. Также считаем, что канат смещается в пролет, в котором движется вагон, из смежных (указанный пролет более нагружен).

Последним случаем моделирования перемещения вагона является рассмотрение последнего n -ого пролета (рис. 6). При этом учет наличия натяжного устройства производится путем введения в математическую модель дополнительных блоков формул, что позволяет описать равновесие несущего каната на опоре, разделяющей $(n-1)$ -ый и n -ый пролеты, следующей системой уравнений (канат смещается в сторону n -ого пролета):

$$H_n \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha_n^B} = H_{n-1} \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha_{n-1}^H} \cdot \exp(\mu \cdot \arctg \frac{\text{tg} \alpha_n^B - \text{tg} \alpha_{n-1}^H}{1 + \text{tg} \alpha_n^B \cdot \text{tg} \alpha_{n-1}^H}); \quad (18)$$

$$\text{tg} \alpha_n^B = \text{tg} \beta_n + \frac{q l_n}{2 H_n \cos \beta_n} [1 + 2 k_n (1 - \delta_n)]; \quad (19)$$

$$\text{tg} \alpha_{n-1}^H = \text{tg} \beta_{n-1} - \frac{q l_{n-1}}{2 H_{n-1} \cos \beta_{n-1}}; \quad k_n = \frac{P}{q l_n} \cos \beta_n. \quad (20)$$

При этом $\delta_n = \text{var}(0;1)$.

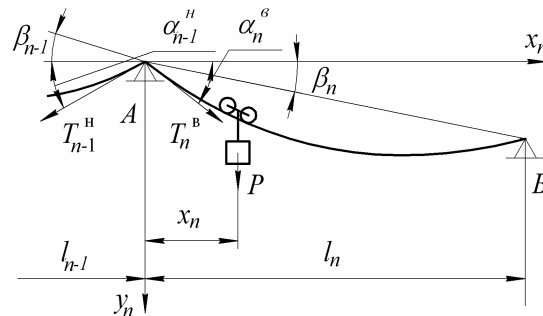


Рисунок 6. Расчетная схема модуля № 5

В соответствии с Правилами устройства и безопасной эксплуатации (ПУБЭ) пассажирских подвесных канатных дорог [12] и ПУБЭ грузовых подвесных дорог [13] «несущие канаты должны иметь натяжные устройства в виде груза или (при обосновании расчетом) быть заякорены с двух сторон». Оба случая нашли свое отражение при разработке модульной математической модели.

В ситуации, когда оба конца несущего каната заякорены, его длина L_K при перемещении вагона остается постоянной (упругим удлинением и температурными деформациями в пределах данной работы пренебрегаем). Распространяя понятие модуля математической модели на описание особенностей натяжения несущего каната на конечных станциях, запишем модуль № 6 в следующем виде:

$$L_K = \sum_{i=1}^{j-1} \left[\frac{l_i}{\cos \beta_i} + \frac{q^2 l_i^3 \cos \beta_i}{24 H_i^2} \right] + \left[\frac{l_j}{\cos \beta_j} + \frac{q^2 l_j^3 \cos \beta_j}{24 H_j^2} (1 + 12 \delta_j (1 - \delta_j) (k_j^2 + k_j)) \right] + \sum_{i=j+1}^n \left[\frac{l_i}{\cos \beta_i} + \frac{q^2 l_i^3 \cos \beta_i}{24 H_i^2} \right]; \quad L_K = \text{const}. \quad (21)$$

Практика конструирования маятниковых подвесных дорог показывает [2, 10], что натяжное устройство может располагаться как на верхней (имеющей большую высотную отметку), так и на нижней станции. Это

обусловлено особенностями построения профиля дороги, а также целесообразностью размещения натяжных устройств двух смежных отрезков несущего каната длиннопролетной дороги на одной двойной натяжной станции либо размещением натяжного устройства к несущему канату на одной станции с приводом (обычно верхней) из соображений удобства обслуживания и ремонта.

Пусть $G_0 = const$ – величина рабочего усилия натяжного устройства несущего каната, а $k_0 = const$ – коэффициент, учитывающий сопротивление перемещению рабочего органа устройства при движении вагона, тогда размещение натяжного устройства на верхней станции может быть описано модулем № 7 в следующем виде ($\delta_1 = \text{var}(0;1)$):

$$H_1 \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha_1^B} = G_0 \cdot k_0; \quad (22)$$

$$\text{tg} \alpha_1^B = \text{tg} \beta_1 + \frac{ql_1}{2H_1 \cos \beta_1} [1 + 2k_1(1 - \delta_1)]; \quad (23)$$

$$k_1 = \frac{P}{ql_1} \cos \beta_1; \quad P = \begin{cases} const, & j = 1; \\ 0, & j \neq 1. \end{cases} \quad (24)$$

Аналогичным образом формируется модуль № 8, учитывающий размещение натяжного устройства на нижней станции ($\delta_n = \text{var}(0;1)$):

$$H_n \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha_n^H} = G_0 \cdot k_0; \quad (25)$$

$$\text{tg} \alpha_n^H = \text{tg} \beta_n - \frac{ql_n}{2H_n \cos \beta_n} \cdot (1 + 2k_n \cdot \delta_n); \quad (26)$$

$$k_n = \frac{P}{ql_n} \cos \beta_n; \quad P = \begin{cases} const, & j = n; \\ 0, & j \neq n. \end{cases} \quad (27)$$

Основным преимуществом методики является возможность составления математической модели нагруженности несущего каната, а также процесса его перемещения относительно опор маятниковой подвесной дороги с профилем любой сложности путем набора соответствующих модулей в необходимом количестве.

Следует отметить, что при моделировании маятниковых подвесных дорог используется один из модулей № 3, 4, 5, а также один из модулей № 6, 7, 8, в то время как количество модулей № 1 и 2 определяется профилем дороги.

Рассмотрим возможность применения разработанной методики на примере моделирования нагруженности несущего каната маятниковой пассажирской подвесной канатной дороги санатория «Ясная Поляна» (МППКД-ЯП, г. Ялта), профиль которой приведен на рис. 7.

При составлении систем уравнений, описывающих равновесие каната на опорах, движение вагона следует рассматривать как происходящее в каждом пролете отдельно, поэтому математическая модель будет состоять из четырех частей (по количеству пролетов). Данный подход неудобен из-за громоздкости модели, однако целесообразен при исследовании процессов, сопровождающих движение вагона в определенном пролете.

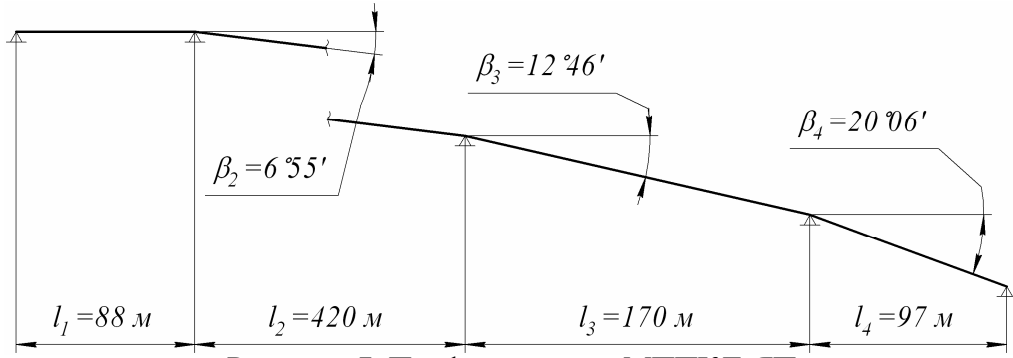


Рисунок. 7. Профиль дороги МППКД-ЯП

При движении вагона в первом пролете математическая модель имеет следующую структуру:

- модуль № 1 – не используется (нет пролетов, располагающихся выше j -ого при $j = 1$);
- модуль № 2 – 2 шт. (для второго и третьего пролетов – $i = \overline{2, 3}$);
- модуль № 3 – 1 шт. (вагон перемещается в первом пролете, $j = 1$);
- модули № 4 и 5 – не используются (поскольку в модель входит модуль № 3);
- модуль № 6 – 1 шт. (натяжное устройство отсутствует);
- модули № 7 и 8 – не используются (поскольку в модель входит модуль № 6).

В соответствии с указанной структурой математическая модель, описывающая равновесие несущего каната на опорах при движении вагона в первом пролете, имеет вид ($\delta_1 = \text{var}(0; 1)$):

$$H_1 \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha_1^H} = H_2 \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha_2^B} \cdot \exp(\mu \cdot \text{arctg} \frac{\text{tg} \alpha_2^B - \text{tg} \alpha_1^H}{1 + \text{tg} \alpha_2^B \cdot \text{tg} \alpha_1^H}); \quad (28)$$

$$\text{tg} \alpha_1^H = \text{tg} \beta_1 - \frac{ql_1}{2H_1 \cos \beta_1} \cdot (1 + 2k_1 \cdot \delta_1); \quad (29)$$

$$\text{tg} \alpha_2^B = \text{tg} \beta_2 + \frac{ql_2}{2H_2 \cos \beta_2}; \quad k_1 = \frac{P}{ql_1} \cos \beta_1; \quad (30)$$

$$H_2 \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha_2^H} = H_3 \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha_3^B} \cdot \exp(\mu \cdot \text{arctg} \frac{\text{tg} \alpha_3^B - \text{tg} \alpha_2^H}{1 + \text{tg} \alpha_3^B \cdot \text{tg} \alpha_2^H}); \quad (31)$$

$$\text{tg} \alpha_3^B = \text{tg} \beta_3 + \frac{ql_3}{2H_3 \cos \beta_3}; \quad \text{tg} \alpha_2^H = \text{tg} \beta_2 - \frac{ql_2}{2H_2 \cos \beta_2}; \quad (32)$$

$$H_3 \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha_3^H} = H_4 \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha_4^B} \cdot \exp(\mu \cdot \text{arctg} \frac{\text{tg} \alpha_4^B - \text{tg} \alpha_3^H}{1 + \text{tg} \alpha_4^B \cdot \text{tg} \alpha_3^H}); \quad (33)$$

$$\text{tg} \alpha_4^B = \text{tg} \beta_4 + \frac{ql_4}{2H_4 \cos \beta_4}; \quad \text{tg} \alpha_3^H = \text{tg} \beta_3 - \frac{ql_3}{2H_3 \cos \beta_3}; \quad (34)$$

$$L_k = \left[\frac{l_1}{\cos \beta_1} + \frac{q^2 l_1^3 \cos \beta_1}{24H_1^2} (1 + 12\delta_1(1 - \delta_1)(k_1^2 + k_1)) \right] + \left[\frac{l_2}{\cos \beta_2} + \frac{q^2 l_2^3 \cos \beta_2}{24H_2^2} \right] \quad (35)$$

$$+ \left[\frac{l_3}{\cos \beta_3} + \frac{q^2 l_3^3 \cos \beta_3}{24H_3^2} \right] + \left[\frac{l_4}{\cos \beta_4} + \frac{q^2 l_4^3 \cos \beta_4}{24H_4^2} \right]; \quad L_k = const.$$

Решение системы (28) — (35) может быть получено с использованием пакетов математических программ (например, «MathCAD»). При этом базовыми величинами являются характеристики пролетов ($l_1 - l_4$, $\beta_1 - \beta_4$), длина каната L_k , его погонный вес q и вес вагона P , а искомыми — горизонтальные составляющие натяжения каната ($H_1 - H_4$), которые, в отличие от традиционных представлений, основанных на некоторых допущениях [2], близки по значению, но не равны.

Для иных случаев нагружения ($j = 2, 4$) укажем лишь структуры моделей (табл. 1).

Таблица 1 Структуры математических моделей пролетов МПКД-ЯП

№ модуля	1	2	3	4	5	6	7	8
$j = 1$	–	2	1	–	–	1	–	–
$j = 2$	–	1	–	1	–	1	–	–
$j = 3$	1	–	–	1	–	1	–	–
$j = 4$	2	–	–	–	1	1	–	–

Выводы. Полученные результаты позволяют определить:

- 1) усилия в несущем канате, как в произвольном сечении, так и экстремальные значения (min, max);
- 2) параметры кривой провисания несущего каната в пролетах с вагоном и без такового;
- 3) сопротивление перемещению вагона в пролете.

Каждая из задач, несмотря на одинаковые исходные данные, требует дополнительных вычислений с использованием ЭВМ или без неё.

Литература

1. Орлов, П. И. Основы конструирования. Справочно-методическое пособие: в 2 кн. / П. И. Орлов. – М.: Машиностроение, 1988. – 2 кн.
2. Беркман, М. Б. Подвесные канатные дороги / М. Б. Беркман [и др.]. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
3. Олехнович, А. И. Рациональные области применения пассажирских канатных дорог как средства городского транспорта / А. И. Олехнович // Труды ВНИИПТМАШ. Исследования канатных дорог. – 1969. – № 1. – С. 3-43.
4. Пірко, В. М. Експертиза канатних доріг: досвід, проблеми, перспективи / В.М. Пірко // Матеріали міжнародних науково-практичних конференцій по підйомним спорудженням за 2005 год. Перспективи ринку ліфтів, ескалаторів, канатних доріг в Україні (08-10.12.2005). – Одеса : Астропринт, 2006. – С. 212-215.
5. Шимановська, М. О. Статика та формоутворення просторових вантових систем з проковзними вантами : автореферат дис. ... канд. техн наук : захищена 05.10.2007 / Шимановська Марина Олександрівна. – К., 2007. – 21 с.
6. Сванидзе, Л. Г. Связь вагонов канатной дороги со станциями / Л. Г. Сванидзе, В.Ф. Супрунов // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2007. – №5. – С. 41-43.
7. Мироненко, А.С. Неразрушающий контроль стальных канатов пассажирских канатных дорог / А.С. Мироненко, И. И. Шпаков // Монтажные и специальные работы в строительстве. Стальные конструкции. – 2007. – № 9. – С. 9-11.

8. Сванидзе, Л. Г. Окружные усилия на шкивах канатных дорог / Л.Г. Сванидзе, В.Ф. Супрунов // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2008. – №7. – С. 48-50.
9. Сванидзе, Л.Г. Изоляция электрооборудования канатных дорог / Л.Г. Сванидзе, В.Ф. Супрунов // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2008. – №8. – С. 48-51.
10. Дукельский, А.И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны / А.И. Дукельский. – М.-Л.: Машиностроение, 1966. – 485 с.
11. *Wire rope engineering handbook. US Steel Supply.* – 82 p.
12. Правила устройства и безопасной эксплуатации пассажирских подвесных канатных дорог. – М.: Металлургия, 1975. – 56 с.
13. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузовых подвесных канатных дорог. – М.: Недра, 1973. – 30 с.

Надійшла до редакції 26.05. 2010

© Ю.К. Горячев, А.С. Куропятник