ФИЗИКА ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ АЛЬПИНИСТОВ

R2Rteam.ru

Русский перевод

Ричард Дэлани

Физика для промышленных альпинистов.

Предисловие от переводчика.

В первую очередь должен сказать, что эта работа не ставит своей целью никакого коммерческого использования.

В принципе, у меня не было никакой необходимости переводить данный текст. Все вещи, которые описывает автор легко и непринужденно можно найти в свободном доступе, а имея общее среднее образование легко оперировать формулами и расчетами, приведенными здесь.

Однако практика показывает, что, к сожалению, в нашей профессиональной среде мало кто в состоянии не то что рассчитать, но даже понять, откуда берутся те или иные нагрузки, с которыми мы сталкиваемся ежедневно, используя систему канатного доступа.

Отдельным поводом выступило то, что русскоязычной литературы подобного плана лично мне не встречалось, а мои коллеги не все свободно читают технические тексты на английском языке.

Несомненным плюсом данной небольшой по объему работы выступает то, что компактно, простым и вполне доступным языком изложен весь необходимый материал, который мы ежедневно применяем в работе.

Некоторую сложность при переводе вызвало отсутствие соответствующей лексики в нашем профессиональном языке, применительно к некоторым аспектам работы, например – конфигурация навески (I – Y - T), отдельные математические сокращения (BODMAS, SOH-CAH-TOA), поэтому какие-то вещи приходилось переводить дословно, опасаясь потерять специфический смысл, который первоначально закладывал автор.

Зачастую вызывало искреннее недоумение, что простые, казалось бы, вещи автор предпочитает называть «сложными способами». Но это больше относится к разнице в системах образования вообще.

Изыскания автора не касаются расчетов конструкций, используемых в качестве анкерных точек, т.к. это противоречило бы самой сути предельной простоты описательной части – там уже требуются знания сопротивления материалов и материаловедения, а это тема отдельного исследования. Моя задача как переводчика была только в том, чтобы корректно, не теряя информативности, перевести данный текст на грамотный инженерный русский язык.

Надеюсь, мне это удалось.

С уважением, Паршинцев Роман Иванович.
Промышленный альпинист 7-го разряда, IRATA lvl.3.
Конструктивную критику, замечания и пожелания можно присылать по адресу: Stirch@bk.ru

R2Rteam, 2018.

Предисловие от автора.

Этот текст был написан, чтобы помочь промышленным альпинистам в изучении и понимании фундаментальных физических принципов, на которых и основаны так много направлений, использующих веревки.

Некоторым из нас повезло с учителями и наставниками, которые сделали изучение математики и физики действительно интересными.

Мой преподаватель математики из старшей школы, м-р Кэвин Гэррити, был уникален в этом отношении, он учил нас больше понимать, чем заучивать. Благодаря этому подходу мне удалось понять и удерживать в памяти многое.

Изложенное ниже не является чем-то сложным, однако, мне кажется, только очень немногие люди смогут достаточно хорошо все объяснить. Эта работа – моя попытка переформулировать основы и свести воедино знания, благодаря которым наиболее общие сценарии, используемые в канатном доступе, могут быть легко поняты.

К этим знаниям и пониманию я пришел в благодаря большому жизненному опыту и огромному везению, т.к. мне удалось поработать с большим количеством талантливых людей, успешно применявшими подобные навыки.

Далее автор выражает благодарности конкретным людям, имена которых нам ничего не скажут. Волей переводчика я их исключил из текста перевода.

Большинство иллюстраций, сопровождающих текст, были сделаны в программе **vRigger** (в русскоязычном тексте часть рисунков, чувствую, придется заменить). Их официальный сайт - **www.vrigger.com**.

Содержание

Масса.

Масса объекта определяется его объемом и плотностью

Материал	Плотность, кг/м^3
вода	1000
сталь	7850
алюминий	2700
бетон	2400

Математически мы можем выразить это отношение как:

Масса = объем х плотность

Итак, нам необходимо вычислить массу стального блока габаритами 0,2 х 0,3 х 0,212 м

Масса = 0,2 м х 0,3 м х 0,212 м х 7850 кг/м^3 = 99, 852 кг ≈ 100 кг.

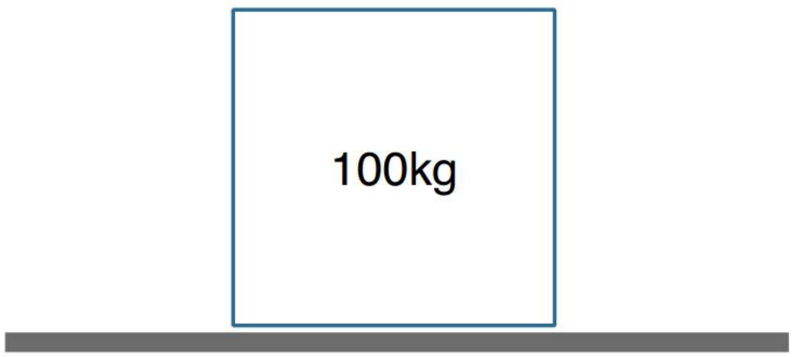
Следует заметить, что полученные единицы измерения (м^3 х м$^{-3}$) взаимосокращаются, оставляя ответ в килограммах.

Сила.

Сила описывает взаимодействие между двумя объектами. Она является векторной величиной и обладает направлением и величиной.

Чтобы предпринять любую форму анализа, полезно уметь рисовать силы, и мы обычно делаем это прямыми линиями со стрелками на конце. Длина линия будет пропорциональна величине, а стрелка обозначает направление.

Представим 100-килограммовый стальной куб, покоящийся на плоской поверхности.



Требуются некоторые взаимодействия, чтобы этот куб покоился:

- поверхность (назовем ее стол) должна быть достаточно прочной для того, чтобы выдержать данный вес (сила гравитации).
- поверхность должна быть плоской, ровной и обеспечивать достаточное трение.

Вес.

Полезно объяснить два термина, которые, как правило, в обычном общении являются взаимозаменяемыми: «масса» и «вес».

Представим человека, экипированного необходимым снаряжением и инструментами для канатного доступа полной массой в 100 кг. Масса определяется объемом и плотностью и эти две характеристики будут неизменными для 100-килограммовой персоны. Одним из наиболее устойчивых мифов, изученных нами с ранних лет - это то, что вес измеряется в килограммах (или фунтах). Это приемлемо в ежедневных ситуациях, но является значительным препятствием для тех, кто желает преуспеть в понимании физики альпинизма.

В действительности, «вес» описывает силу, с которой масса посредством гравитации воздействует на поверхность и измеряется в Ньютонах (Н).

С весом, который человек прилагает к поверхности, мы сталкиваемся каждый день как следствием гравитационного притяжения, направленного к центру Земли.

Мы подсчитываем эту силу умножением массы (100 кг) на ускорение свободного падения, направленного к центру Земли, таким образом, как если бы земной поверхности не существовало. В нормальных условиях ускорение свободного падения принимается равным 9.8 метров в секунду или 9,8 м/с$^{-2}$ и обычно обозначается как **g**.

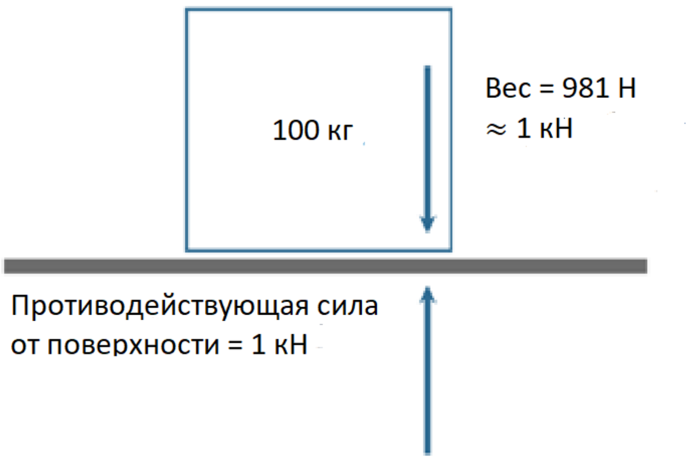
Сила = масса x ускорение, или

$$F = ma.$$

Итак,

Вес = масса x ускорение свободного падения, или

$$P = mg$$



Далее, в этом случае, вес 100-килограммового стального блока будет составлять:

$$P = 100 \text{ кг} \times 9{,}81\text{мс}^{-2}$$

$$P = 981 \text{ кгмс}^{-2} \text{ или } 981 \text{ Н}$$

Для упрощения расчетов в полевых условиях мы принимаем $g \approx 10$ мс$^{-2}$ и получаем:

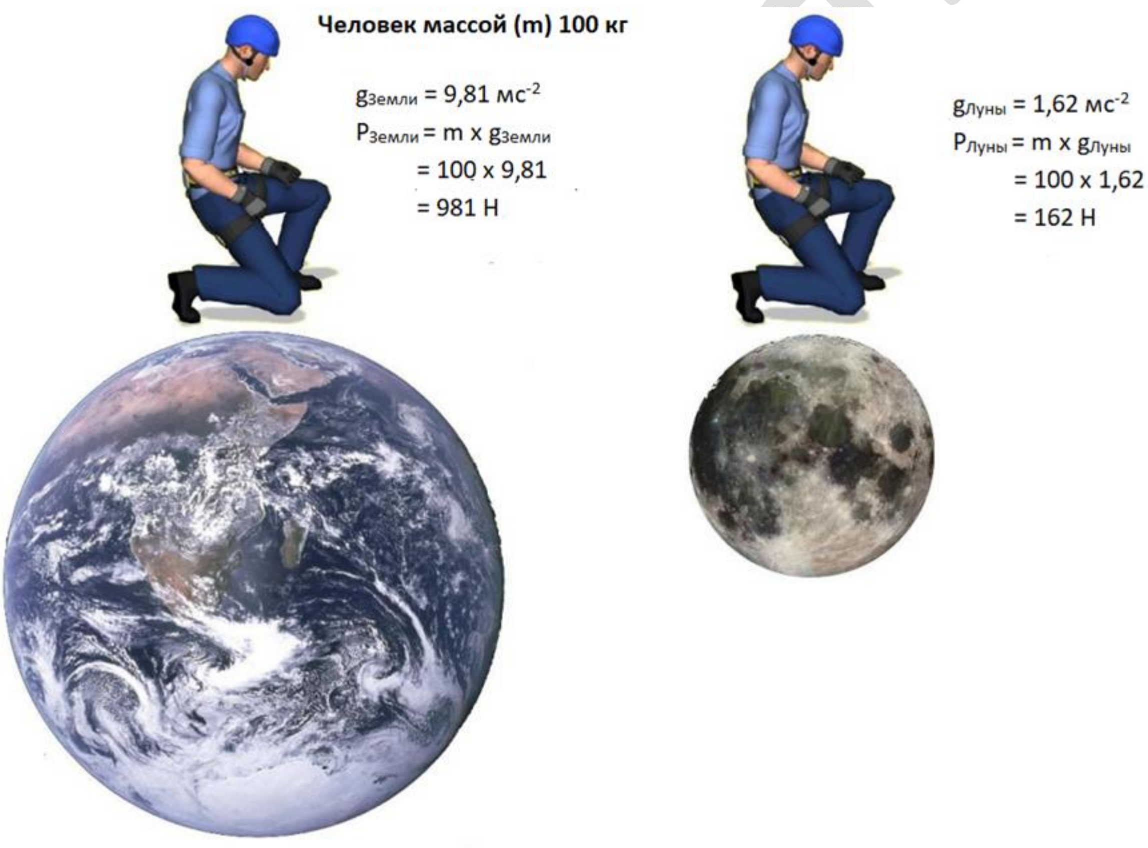
$$P \approx 100 \text{ кг} \times 10 \text{мс}^{-2}$$

$$P \approx 1000 \text{ Н или } 1 \text{ кН.}$$

Для того, чтобы предмету (такому, как 100-кг стальной куб), оставаться неподвижным, необходимо, чтобы силы, действующие на него были сбалансированными и находились в состоянии равновесия. Следует отметить, что для того, чтобы показать силы равной величины, но разной направленности, их изображают так, как показано выше – векторами равной длины со стрелками, обозначающими направление приложения силы.

На практике, обычный карабин из алюминия будет промаркирован отметкой в 30 кН. Это означает, что он в состоянии выдерживать неподвижно висящий груз массой (30,000 Н ÷ 10 мс$^{-2}$=) 3,000 кг.

Т.к. вес является свойством гравитации, вес отдельной массы будет варьироваться в зависимости от местного гравитационного поля (на Луне ощущаться будет меньше).



Векторы

Существуют 2 важных различия в количественных атрибутах, применяемых к объектам – некоторые требуют простого численного обозначения («скалярные» величины), в то время как другие требуют определения величины и направления – «векторные».

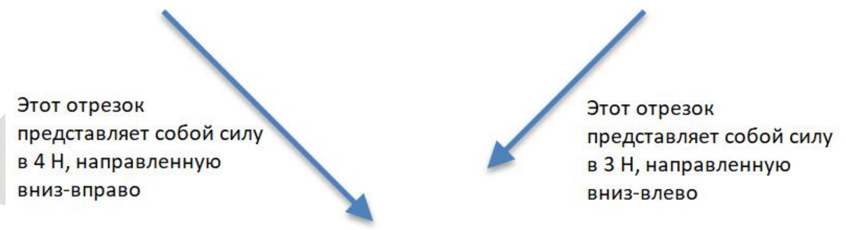
Некоторые общие названия стирают различия, однако, например, есть значительная разница между «скоростью мгновенной» и «скоростью векторной». Мгновенная скорость является скалярной величиной и просто описывает, как быстро что-то движется. Скорость векторная предполагает, что к тому «насколько быстро» следует добавить направление. Машина может двигаться со скоростью 60 км/ч, однако мы можем описать ее векторную скорость как движение с 60км/ч по направлению 45 градусов к истинному северу.

Если нам требуется купить одно яблоко стоимостью $1,00 и один апельсин за $0,50, итоговая стоимость будет скалярной величиной и составит $1,50 (обычное сложение).

Если мы находимся в конце поезда, движущегося в направлении истинного севера со скоростью 60 км/ч, а затем начинаем бежать по этому составу в сторону локомотива со скоростью 10 км/ч, наша векторная скорость (по отношению к земной поверхности) составит 70 км/ч в направлении истинного севера.

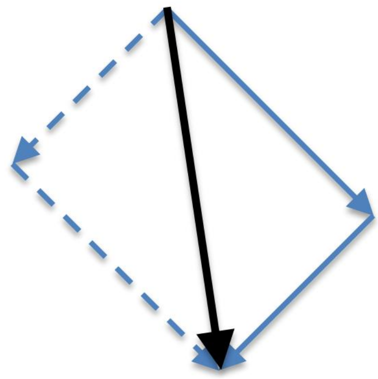
Сложение векторов.

Если мы представляем величину и направление силы в виде отрезка, где его длина пропорциональна величине, а стрелками задаем направление, мы можем изобразить две силы, как показано ниже:



Если две силы прилагаются к объекту одна за одной, совместно или обратным порядком, итоговый результат будет одним и тем же.

Для определения результатов сложения данных векторов, один из отрезков нужно переместить таким образом, чтобы его начало совместилось с концом второго отрезка. Суммой будет являться новый отрезок, выходящий из конца первого отрезка и приходящий в начало второго:



Векторы и навеска.

На данном рисунке мы видим 100-кг груз, подвешенный к анкерным точкам через такелляжную пластину. Используя язык векторной физики, для того, чтобы система была равновесной, все силы, прилагаемые к такелажной пластине, должны взаимоуравновешиваться и быть приведены к нулю (перемещением анкерных точек и пластины мы пренебрегаем).

Ранее мы показали, что графически векторы могут отображать действующие силы.

К пластине присоединены три веревки, направленные в различные стороны. Сила или натяжение в вертикальной веревке (назовем ее V3) создается грузом в 100 кг (≈1 кН) и направлена вертикально вниз. Две другие веревки, присоединенные к пластине, противодействуют силе V3. Назовем их силами V1 и V2.

Если такелажная пластина останется неподвижной, сумма всех трех сил должна свестись к нулю. Треугольник справа от пластины демонстрирует такое сложение векторов.

$$V1 + V2 + V3 = 0.$$

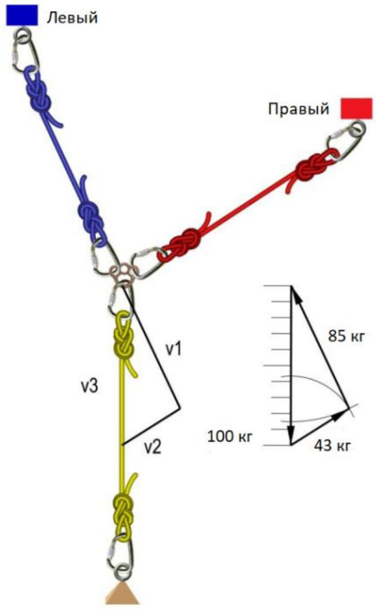
Величина векторов V1 и V2 может быть найдена через отношение их длин к известной длине V3 (создаваемой грузом в 100 кг). Запомните, что это можно использовать и в полевых условиях, рисуя на земле или используя подручные предметы (стержни, палки, шнуры), для выражения отношений длин сторон треугольника.

В данном примере, тщательные измерения показывают, что при наличии груза в 100 кг, синяя анкерная точка испытывает нагрузку в 85 кг, а красная – в 43 кг.

Выражаясь техническим языком:

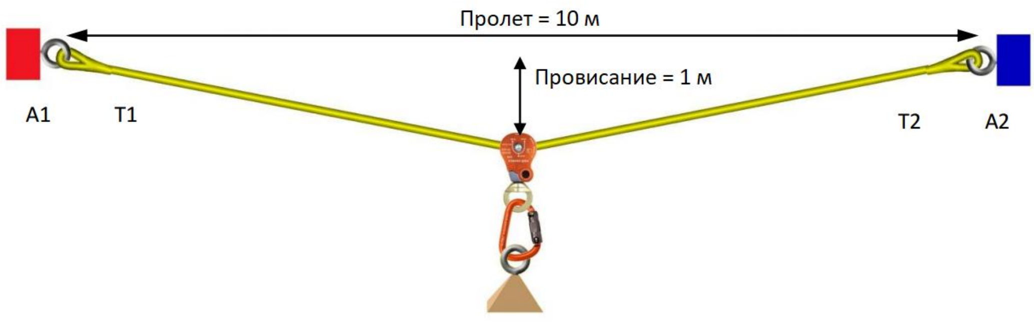
- Груз массой 100 кг создает силу в 1 кН (в действительности 0,98 кН), приложенную к такелажной пластине
- Левый анкер испытывает нагрузку в 0,85 кН (или 0,833 кН)
- Правый анкер испытывает нагрузку в 0,43 кН (или 0,421 кН)

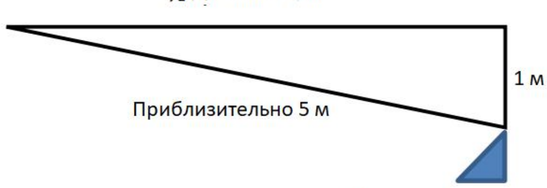
Особое внимание следует обратить на то, что сложение векторов отличается от операции простого математического сложения, и, как и в данном случае, сложение 43 и 85 кг не даст в сумме 100 кг.



Троллеи. Усилия в троллеях.

Представим троллей, натянутый между двумя анкерными точками (А1 и А2). Если данные точки будут находиться на одинаковой высоте и нагрузка приходится на середину пролета, систему можно разделить на две идентичные половины, каждая из которых будет воспринимать нагрузку от половины массы.





Данный треугольник может использоваться для отображения векторов приложенных сил и их величины, т.к. есть прямая зависимость между ними и сторонами треугольника.

- Подвешенный груз массой 50 кг пропорционально передает свой вес стороне треугольника с длиной 1 м.
- Натяжение веревки будет пропорционально длине диагонали (гипотенузе треугольника).

Простой путь расчетов.

- Для троллеев с небольшими провисаниями, скажем, менее 10 % от общей длины пролеты, нормальным будет допустить, что гипотенуза практически равна половине длины пролета.
- Таким образом, в данном примере, натяжение веревки по отношению к подвешенному грузу находится в примерной пропорции 5:1.
- Итак, 5 x 50 кг = 250 кгс (или 2,50 кН).

Многие источники приводят следующую формулу:

$$\text{Натяжение} = \frac{\text{Нагрузка x пролет}}{\text{4 x провисание}}$$

Эта формула является тем, что мы получили ранее и схожим образом опирается на предположение, что гипотенуза треугольника приблизительно равна половине длины пролета и воспринимает половину массы груза, приложенного к треугольнику.

В полном виде расчеты будут выглядеть так:

$$\text{Натяжение} = \frac{\text{Нагрузка}}{2} \text{ x } \frac{{}^{1}\!/_{2}\text{ пролета}}{\text{провисание}}$$

$$\text{Натяжение} = \frac{\text{Нагрузка}}{2} \text{ x } \frac{\text{пролет}}{\text{2 x провисание}}$$

$$\text{Натяжение} = \frac{\text{Нагрузка x пролет}}{\text{2 x 2 x провисание}}$$

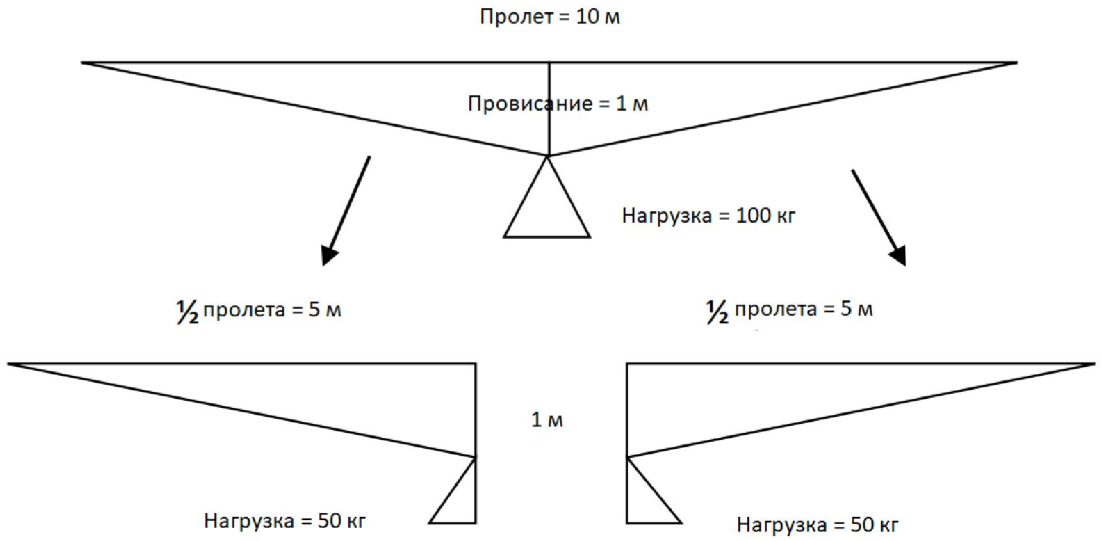
$$\text{Натяжение} = \frac{\text{Нагрузка x пролет}}{\text{4 x провисание}}$$

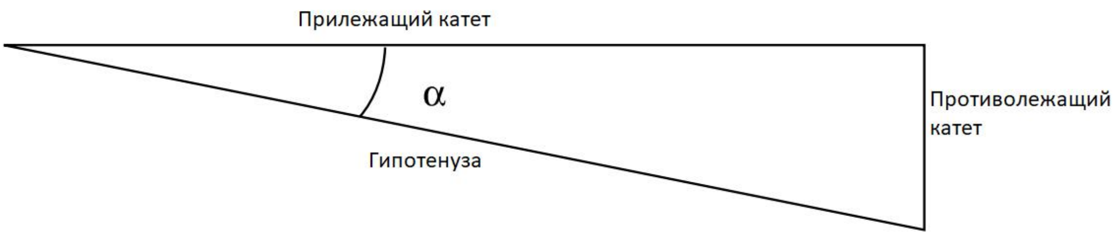
$$\text{Натяжение} = \frac{\text{100 кгс x 10 м}}{\text{4 x 1 м}}$$

$$\text{Натяжение} = \text{ 250 кгс.}$$

Сложный способ – теорема Пифагора.

Расчеты возможно сделать более точными, но это требует знакомства с теоремой Пифагора. Это простое уравнение, возрастом 2500 лет, устанавливающее отношения между сторонами в прямоугольном треугольнике.





Прилежащий катет^2 + противолежащий катет^2 = гипотенуза^2

$$\text{Гипотенуза} = \sqrt{\text{прилежащий катет}^{\mathbf{2}} + \text{противолежащий катет}^{\mathbf{2}}}$$

Итак, для нашего треугольника, длина гипотенузы будет равняться:

$$\text{Гипотенуза} = \sqrt{1^2 + 5^2}$$

$$\text{Гипотенуза} = \sqrt{1 + 25}$$

$$\text{Гипотенуза} = \sqrt{26}$$

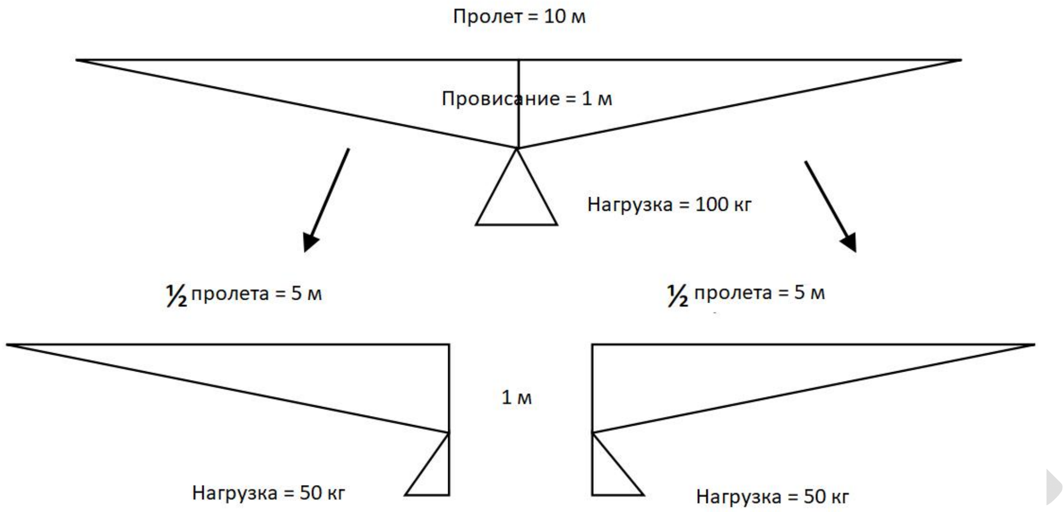
$$\text{Гипотенуза} = 5{,}1$$

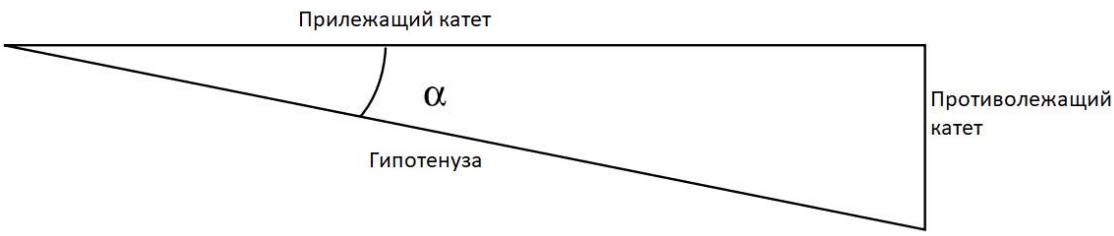
Соответственно, натяжение в веревке будет в соотношении 5,1 к каждому килограмму приложенной массы.

$$\text{T} = \frac{100\ \text{кгс}}{2} \times 5{,}1$$

$$\text{T} = 255\ \text{кгс (Н)}$$

Сложный способ – тригонометрия.





Для данного треугольника (см. приложение для детального описания тригонометрии) справедливо:

$$\tan\alpha = \frac{\text{противолежащий катет}}{\text{прилежащий катет}}$$

Для троллея:

$$\tan\alpha = \frac{1}{5} = 0{,}2$$
$$\alpha = \tan^{-1}(0{,}2) = 11{,}31°$$

Сумма углов треугольника должна равняться 180°. С учетом, что угол между прилежащим и противолежащим катетами составляет 90°, получаем третий угол:

180° – 90° – 11,31° = 78,69°

Таким образом, угол нагрузки посередине пролета будет составлять:

2 x 78,69° = 157,38°

Нагрузку, приходящуюся на анкерную точку можно посчитать, используя отношение противолежащего угла к гипотенузе. В данном случае длина гипотенузы будет равна:

$$\sin\alpha = \frac{\text{противолежащий катет}}{\text{гипотенуза}}$$

$$\sin 11{,}31° = \frac{1}{\text{гипотенуза}}$$

$$\text{гипотенуза} = \frac{1}{\sin 11{,}31°} = 5{,}099\ \text{м}$$

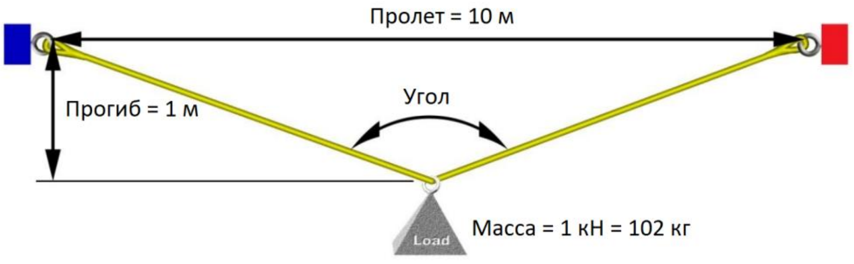
Итак, в треугольнике на каждый килограмм подвешенного груза приходится 5,099 кг нагрузки на анкерную точку. Совместно, для двух треугольников, 100 кг подвешенной массы дает ту же картину как и 50 для каждого треугольника по отдельности, и на каждый анкер троллея приходится 50 x 5,099 или 254,95 кгс (Н).

Резюме и сравнение методов расчета троллеев.

Троллей с провисанием в 10% от длины пролета имеет коэффициент увеличения нагрузки – 2,55.

Груз массой 100 кг, приложенный к середине троллея с подобным отношением провисания к пролету, будет давать нагрузку в 255 кгс на каждую анкерную точку.

Примерный расчет нагрузок на анкерные точки троллеев.



Формула расчета: $\text{Натяжение} = \frac{\text{Нагрузка x пролет}}{\text{4 x провисание}}$

Характеристики						Теорет. значения	Фактич. значение	Погрешность
Пролет (м)	Груз (кг)	Вес (кН)	Провис (м)	Провис (%)	Угол (град)	T (кН)	T (кН)	%
100	102	1,00	1	1	178	25,00	25,00	-0,02
100	102	1,00	2	2	175	12,51	12,50	-0,08
100	102	1,00	5	5	169	5,02	5,00	-0,50
100	**102**	**1,00**	**10**	**10**	**157**	**2,55**	**2,50**	**-1,94**
100	102	1,00	20	20	136	1,35	1,25	-7,15
100	102	1,00	29	29	120	1,00	0,86	-13,50
100	102	1,00	50	50	90	0,71	0,50	-29,29
100	102	1,00	100	100	53	0,56	0,25	-55,28

Данные, приведенные в таблице, получены автором работы, Ричардом Дэлани, RopeLab, 2014.

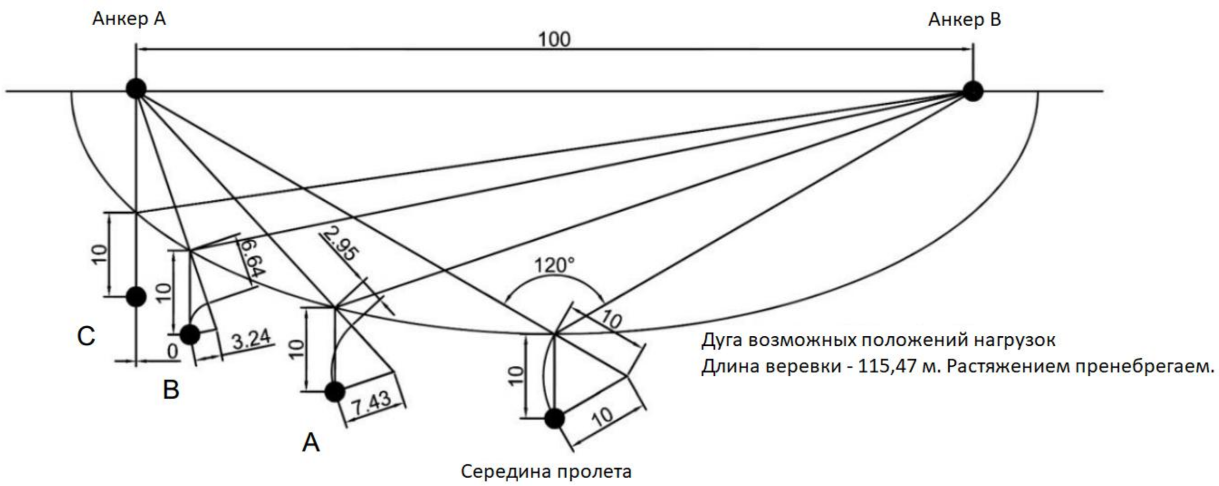
Расчет нагрузки на анкерные точки троллея при перемещении груза.

Существует много идей о расчете нагрузок, приходящихся на анкерные точки троллеев при их различных конфигурациях. На некоторые из них неправильно влияют правила привязки нагрузки (организации навески) - например I-Y-T или: идеальная (параллельная навеска веревок = 50% на каждой из линий), Y-навеска (где при угле 120° между анкерными точками = 100% нагрузки на каждую из них), T – «ужасная» (180° = бесконечное увеличение нагрузки).

Реальность такова, что для троллеев, вышеописанная аналогия с навеской (I-Y-T) применима только в том случае, когда груз находится в состоянии покоя и поддерживается только натянутой троллейной веревкой, т.е. нет никакого натяжения на управляющих веревках. Для системы с анкерными точками, расположенными на одинаковой высоте данная ситуация характерна только в середине пролета.

Для всех иных положений нагрузка может быть в состоянии покоя, только если существует натяжение в одной из управляющих линий. Для постепенного перемещения нагрузки по направлению к анкерной точке, нам требуется еще больше увеличить натяжение в соответствующей управляющей линии.

Схема, приведенная ниже, демонстрирует теоретический пролет в 100 м между анкерными точками A и B. Для достижения внутреннего угла в середине пролета равного 120° нам потребуется 115.47 м нерастяжимой веревки. Для упрощения физических расчетов мы предполагаем, что длина веревки остается неизменной при любых положениях нагрузки. В теории нагрузка (10 кН) может быть приложена в любом месте, отмеченном дугой на схеме. Отрезок в 10 единиц был изображен для обозначения вектора веса, направленного вертикально вниз.



Середина пролета.

Только в этом положении при ослаблении управляющих линий нагрузка на троллей останется неизменной. Т.е. при нагрузке в 10 кН, на каждую анкерную точку троллея будет приходиться те же 10 кН.

Положения А и В.

Для удержания нагрузок в данном положении (слева от середины пролета), требуется некоторое натяжение контрольной линии, идущей от анкерной точки А. Следует отметить, что если объект находится в состоянии покоя при воздействии всех действующих сил, последние являются сбалансированными. Для создания векторного треугольника, сбалансированного приложенным весом в 10 кН, нам потребуется изобразить усилия, параллельные троллею и контрольной линии. Данный треугольник демонстрирует усилие в 7,43 кН на анкерной точке В. Поскольку линия пролета непрерывна, величина натяжения должна быть одинаковой для обоих половин троллея – таким образом, нагрузка на анкерной точке А может составлять только те же 7,43 кН. Затем, измеряя разность в данном треугольнике, находим, что для того, чтобы удержать груз в данном положении, на контрольную линию должна прилагаться нагрузка в 2,97 кН. Сходным образом, для положения В, нагрузка на троллей будет составлять 3,24 кН, а на контрольную линию – 6,66 кН.

Положение С.

В этом теоретическом положении, расположенном прямо под анкерной точкой А, контрольная линия будет полностью воспринимать вес груза; это находит отражение в том факте, что векторный треугольник превращается в прямую линию.

Итог.

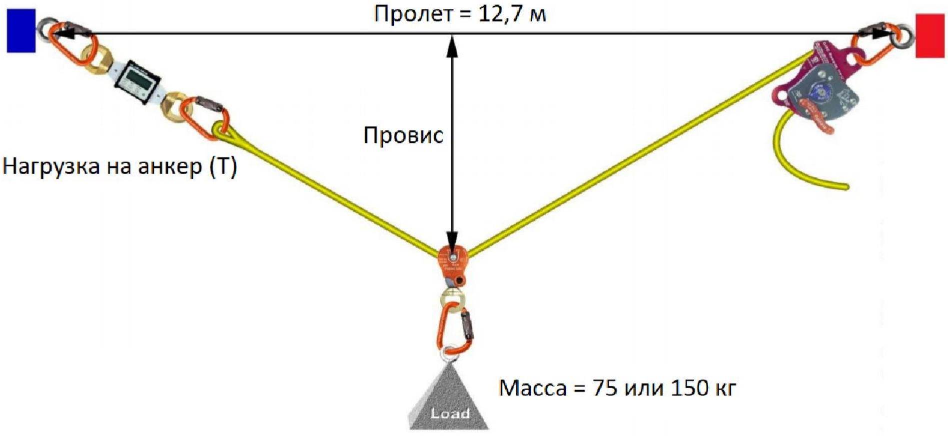
Для троллеев с расположением анкерных точек на одном уровне самым неблагоприятным случаем будет нахождение груза посередине пролета.

Эффект преднатяжения на троллеях.

Интересно подумать, а влияет ли применение преднатяжения на троллее на ход расчетов нагрузок, приходящихся на анкерные точки. В первом приближении ответом будет «нет». Как показано выше, нагрузки напрямую зависят от геометрических характеристик системы.

Пожалуй, все, что стоит знать, это то, что большое преднатяжение, безусловно, приведет к усилению системы.

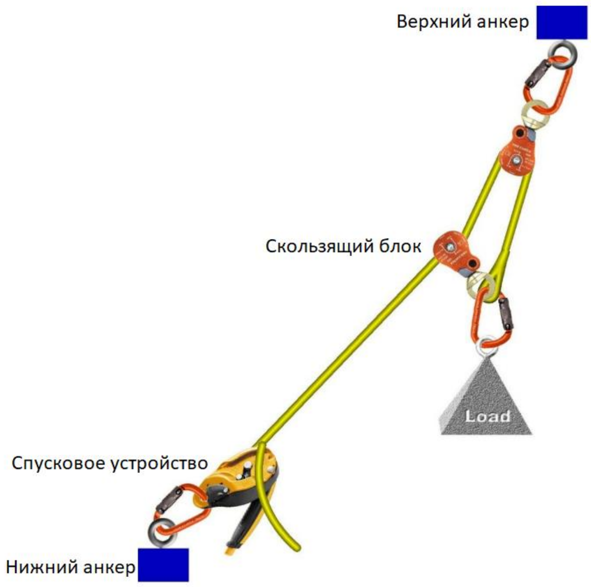
В обсуждениях часто встречается термин «цепная линия» – так называют нормально изогнутую (провисшую) веревку, провешенную между двумя анкерными точками. В нашей практике не является нормальным, когда масса груза значительно превышает массу троллея. Иными словами, при приложении нагрузки к троллею, его ветви распрямляются, а не изгибаются.



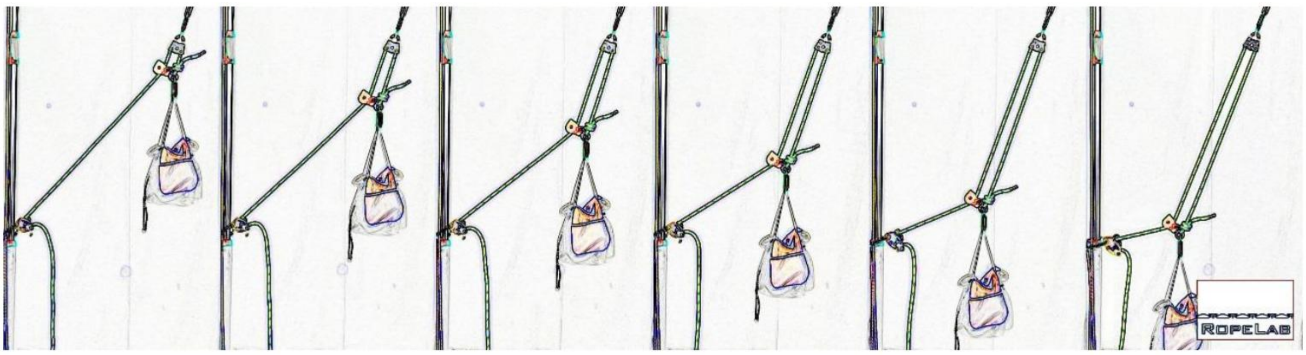
Веревка	Экспериментальные данные						Теория	
	Пролет (м)	Масса (кг)	Пред-натяжение (кН)	Провис (м)	Угол (град)	Нагрузка на анкер (кН)	Угол (град)	T (кН)
11-мм Edelrid Super Static	12,17	75	1,00	1,09	160	2,20	160	2,09
11-мм Edelrid Super Static	12,17	75	1,50	1,02	160	2,35	161	2,23
11-мм Edelrid Super Static	12,17	75	2,55	0,76	167	3,10	166	2,97
11-мм Edelrid Super Static	12,17	150	1,54	1,41	154	3,41	154	3,26
11,1 Polyester Sterling HTP	12,17	75	1,00	0,73	167	3,60	166	3,11
11,1 Polyester Sterling HTP	12,17	75	1,55	0,70	167	3,56	167	3,24
11,1 Polyester Sterling HTP	12,17	75	2,53	0,60	169	4,15	169	3,78
11,1 Polyester Sterling HTP	12,17	150	1,50	0,97	161	4,95	162	4,69
11-мм Nylon Edelrid Dynamic	12,17	75	1,52	1,15	158	2,10	159	1,98
11-мм Nylon Edelrid Dynamic	12,17	150	1,56	1,64	148	2,98	150	2,83

Данные в таблице приведены по результатам исследований Далласа Аткинсона и Ричарда Дэлани, Rope Test Lab, 2014.

Скользящий блок.

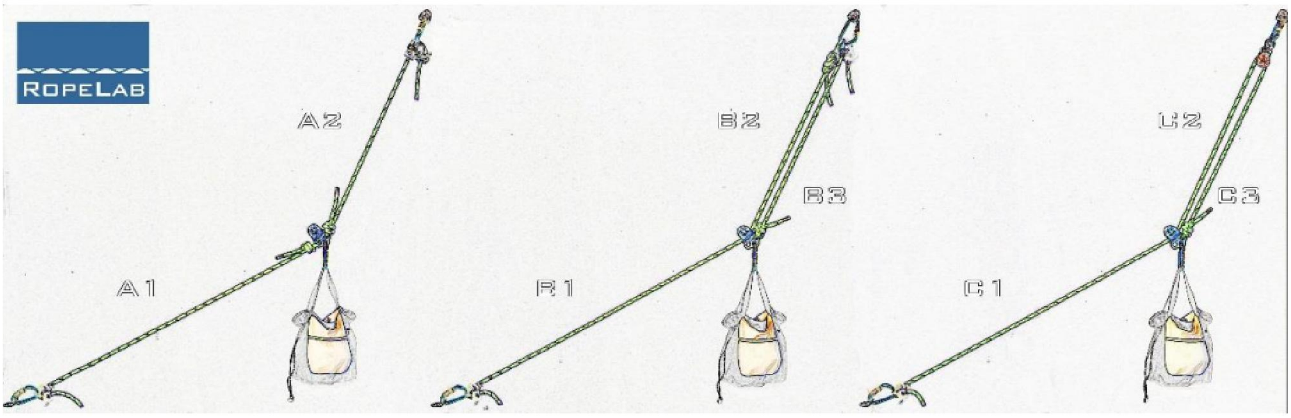


Скользящий блок обычно используется в грузоподъемных операциях, в силу того, что позволяет избегать препятствий по ходу движения груза. В отличие от обычных натянутых перил, скользящий блок натягивается сам по себе и сила натяжения определяется массой перемещаемого груза.



Скользящий блок представляет собой интересный пример для изучения, т.к. с точки зрения математики и физики расчет нагрузок здесь не является очевидным.
Рассмотрим нагрузку, приложенную одинаково к трем различным системам:

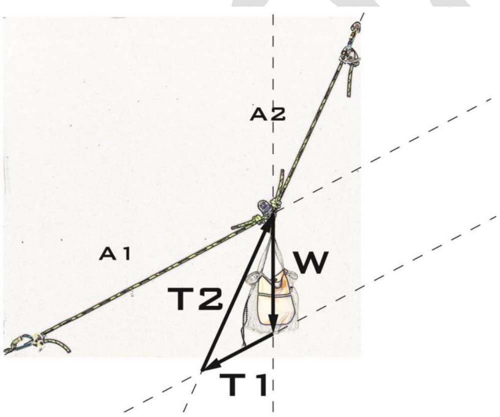
- A: фиксированным анкерным линиям
- B: диагональным перилам
- C: скользящему блоку.



Фиксированные анкерные линии Диагональные перила Скользящий блок

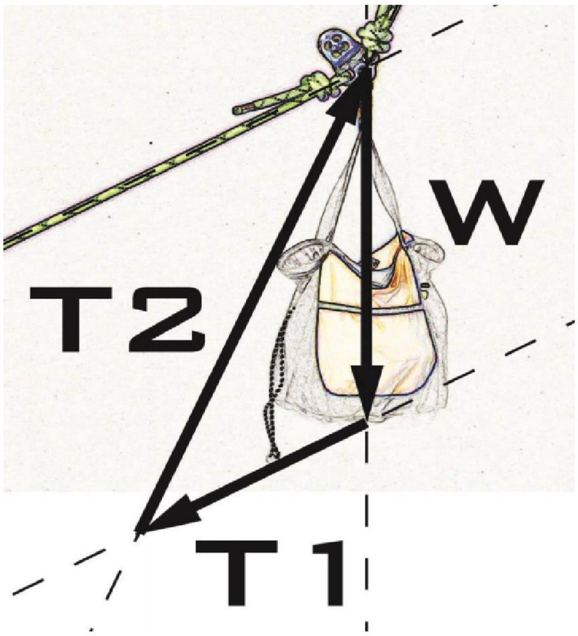
Если блок-ролик, к которому прикреплен груз в каждой из систем является неподвижным, то все силы, действующие на него находятся в равновесии. В первом случае такими силами будут:

- Натяжение от нижнего анкера (A1),
- Натяжение от верхнего анкера (A2),
- Вес груза.



Силы, действующие на блок, представлены T1, T2 и W. Направление каждой из них ограничено и определяется физическими координатами. Относительные величины представлены длинами отрезков со стрелками. Т.к. груз не перемещается, сумма этих векторов равна нулю.

Следует отметить, что длины отрезков взаимосвязаны и пропорциональны отрезку, соответствующему нагрузке (W).

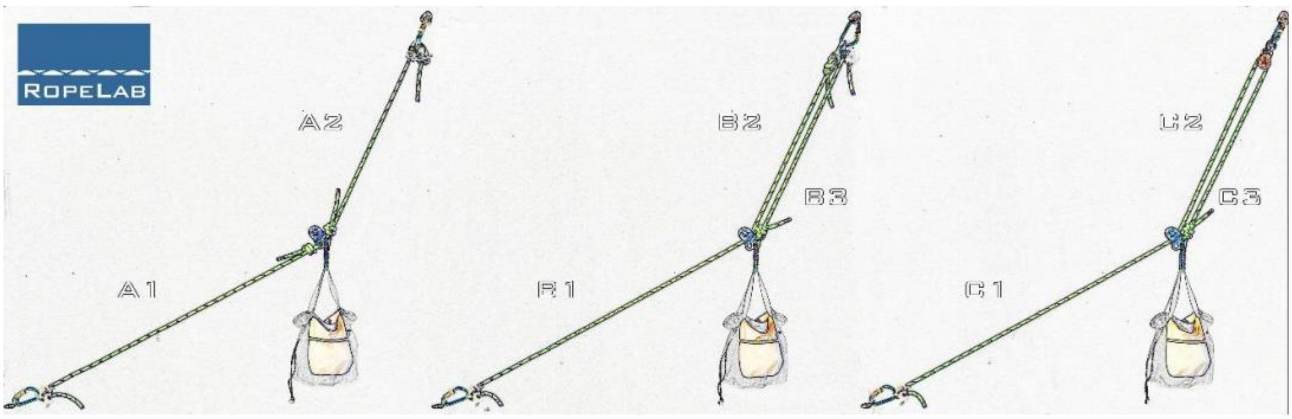


Измеряя длины данных отрезков получаем:

- W = 100 мм
- T1 = 67 мм
- T2 = 140 мм

Эти значения показывают, что при любой нагрузке (100%) натяжение на нижнем анкере составит 67%, а на верхнем - 140%. Таким образом, при грузе весом 1 кН на нижний анкер придется 0,67 кН, а на верхний – 1,40 кН.

Правило треугольников будет применимо для каждого из трех сценариев, упомянутых выше, и нагрузка на анкера будет одинаковой при равных нагрузках.



Фиксированные анкерные линии Диагональные перила Скользящий блок

Важным отличием диагональных перил и скользящего блока является наличие двух веревок, идущих от верхнего анкера к грузу.

Посчитаем усилия при нагрузке в 1 кН для каждого сценария.

Диагональные перила.

Диагональные перила натягиваются между двумя анкерными точками, следовательно, натяжение на перилах является константой (трением в блок пренебрегаем). Нам известно, что на B1 приходится 0,67 кН, таким образом, на B2 нагрузка должна быть такая же. Это означает, что разница в 1,40 кН, требуемая для удержания груза в данном положении, должна быть обеспечена B3. Таким образом:

- B1 = 0,67 кН
- B2 = 0,67 кН
- B3 = 1,40 кН – 0,67 кН = 0,73 кН

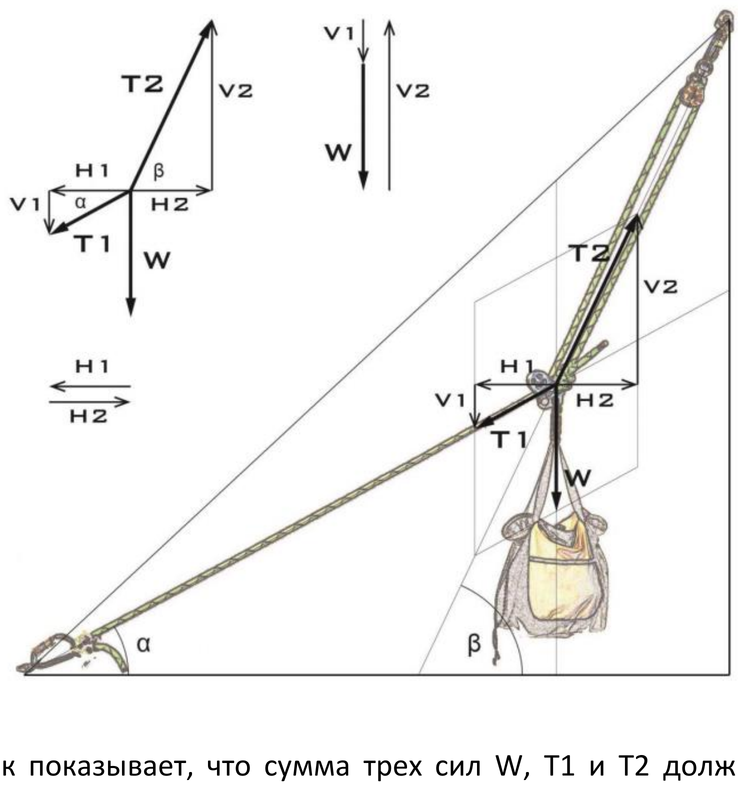
Скользящий блок.

В этом случае веревка идет от нижнего анкера через блок на верхнем анкере и закрепляется на грузе. По всей своей длине веревка должна иметь одинаковое натяжение. Нам уже известно, что на C1 приходится 0,67 кН; соответственно, на C2и C3 тоже.

Также нам известно, что совокупная нагрузка на C2 и C3 составляет 1,40 кН. Но половина ее составит 0,70 кН, а никак не 0,67 кН!

Однако разница между 0,70 кН и 0,67кН составляет менее 5% и может быть списана на такие факторы, как трение, массу веревок и приближения в расчетах.

Детальный анализ скользящего блока.



Данный рисунок показывает, что сумма трех сил W, T1 и T2 должна быть равна нулю, чтобы груз оставался неподвижным. Эти силы могут быть разложены на вертикальные и горизонтальные составляющие, чтобы показать, что:

$$H1 + H2 = 0$$

И

$$W + V1 + V2 = 0$$

При рассмотрении величины каждой из трех сил, мы также получаем:

$$\cos\alpha = {}^{H1}/_{T1}$$
$$\cos\beta = {}^{H2}/_{T2}$$

Учитывая, что данная система представлена одной непрерывной веревкой, величина натяжения по всей ее длине должна быть постоянной. Натяжение от нижнего анкера до висящего груза обозначим как Т1. От груза к верхнему анкеру выходят два конца веревки, каждый из которых испытывает то же натяжение, что и Т1. Следовательно, получаем:

Т2 = 2 x Т1

Теперь можно представить эти уравнения в виде:

$$\text{T1} = {}^{H1}/_{\cos\alpha}$$

$$\text{T2} = {}^{H2}/_{\cos\beta}$$

$$2 \times \text{T1} = {}^{\text{H2}}/_{cos\beta}$$

$$\text{T1} = \frac{\text{H2}}{2 \times cos\beta} = \frac{\text{H1}}{cos\alpha}$$

$$\frac{cos\alpha}{2 \times cos\beta} = \frac{\text{H1}}{\text{H2}}$$

Учитывая, что груз находится в состоянии покоя, величины H1 и H2 равны, следовательно:

$$\frac{cos\alpha}{cos\beta} = 2$$

Это отношение определяет изменение нагрузки при перемещении груза. Мы также можем определить, что точка покоя находится на уровне земли, т.к. здесь α = 0.

$$cos\beta = \frac{cos\alpha}{2}$$

$$cos\beta = \frac{1}{2}$$

Следовательно,

$$\beta = 60°$$

Это означает, что независимо от положения нижнего анкера, угол смещения груза никогда не превысит 57,7% от высоты перемещения (1/tan(60)).
В данных расчетах трение в блоке и вес веревок не учитывались. Если бы мы все же учитывали силу трения, то условную силу натяжения принимали бы равной не 1, а в пределах 0,9 – 0,85.

Это привело бы наше уравнение к виду:

$$T2 = 2{,}253 \times T1$$

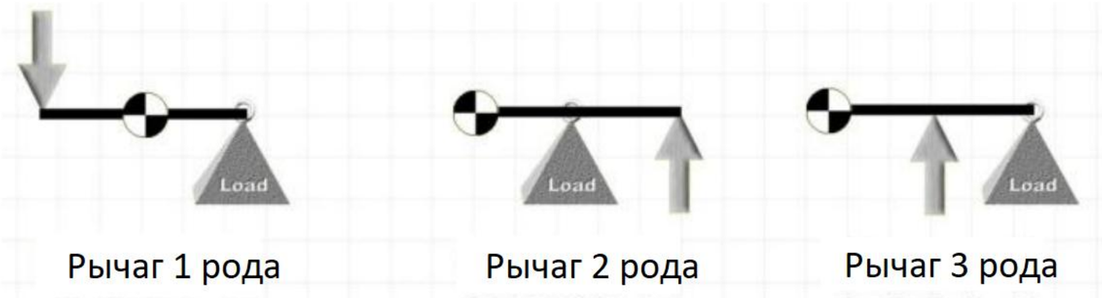
И в этом случае, искомый угол составлял бы 63,4°.

На практике, при использовании скользящего блока, груз опускается на землю на расстоянии примерно в половину высоты перемещения.

Выигрыш в силе.

Рычаги.

Большинство из нас знакомо с рычагами, однако полезно различать три их фундаментальных типа.



Разница между ними заключается во взаимоположениях опоры, нагрузки и точки приложения усилия. Примерами для каждого случая могут выступать:

- Рычаг 1-го рода: весы, качели
- Рычаг 2-го рода: тачка (колесо является опорой)
- Рычаг 3-го рода: подъемный кран.

Выигрыш в силе (ВС) обозначает отношение поднимаемого груза к прикладываемым усилиям и определяется взаимным расположением нагрузки и точкой приложения силы в рычаге. Для того, чтобы поднять вес в 1 кН, в каждом из случаев придется приложить усилие:

- Рычаг 1-го рода: усилие = 1 кН, т.е. выигрыш в силе 1:1
- Рычаг 2-го рода: усилие = 0,5 кН, т.е. выигрыш в силе 2:1 (рычаг увеличивает прилагаемую силу в 2 раза)
- Рычаг 3-го рода: усилие = 2 кН, т.е. выигрыш в силе 0,5:1 или 1:2.

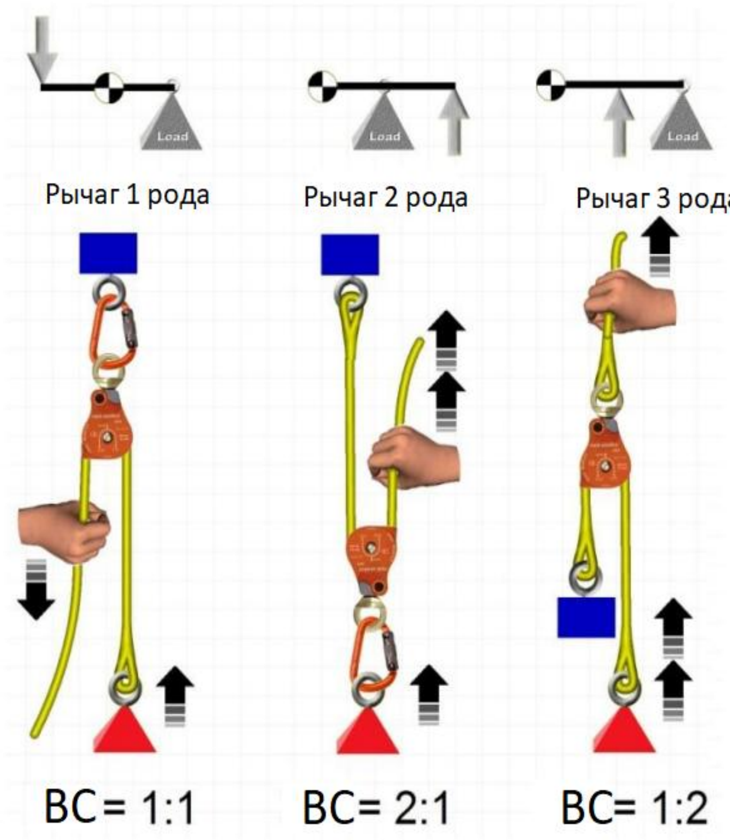
На данном этапе полезно ввести термин **«Работа»**, где:

Работа = сила х перемещение.

Работа – это мера затраченной энергии, или, грубо, насколько вы устали, пока выполнили задание. Используя рычаги 1-го и 2-го рода, можно подумать, что усилий приходится прилагать значительно меньше, однако это сопряжено с увеличением перемещений. Никакой магии, ничто ниоткуда не может появиться.

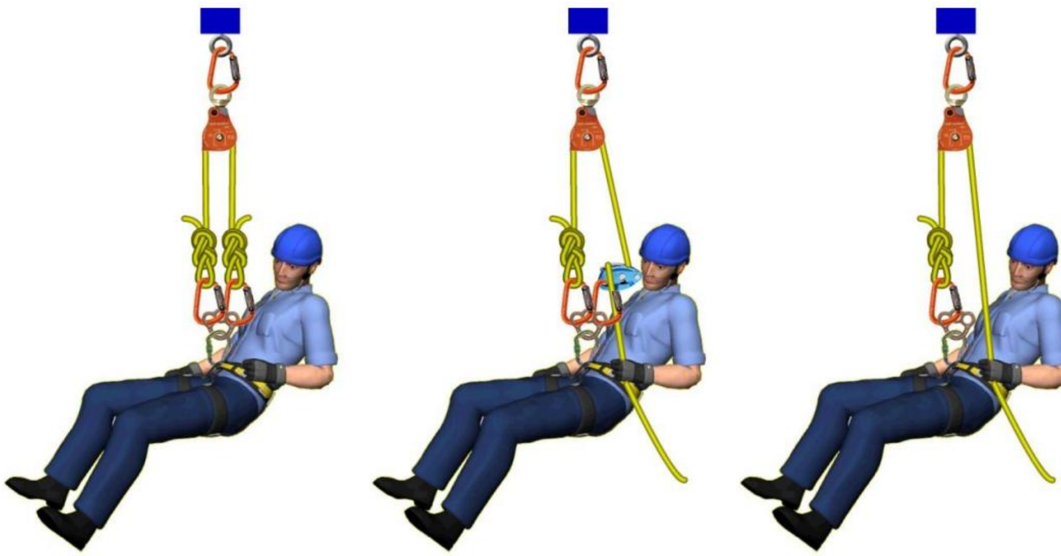
Полиспасты.

В общем случае, полиспасты могут рассматриваться как рычаги. Это становится более очевидным, если рассматривать их как неподвижные системы (все силы уравновешены и находятся в состоянии покоя).



Магия или физика?

Ключевой момент, необходимый альпинистам – понимание разницы нагрузок, приходящихся на анкерную точку, при самостоятельном и при пассивном спуске.
Одиночный спуск.

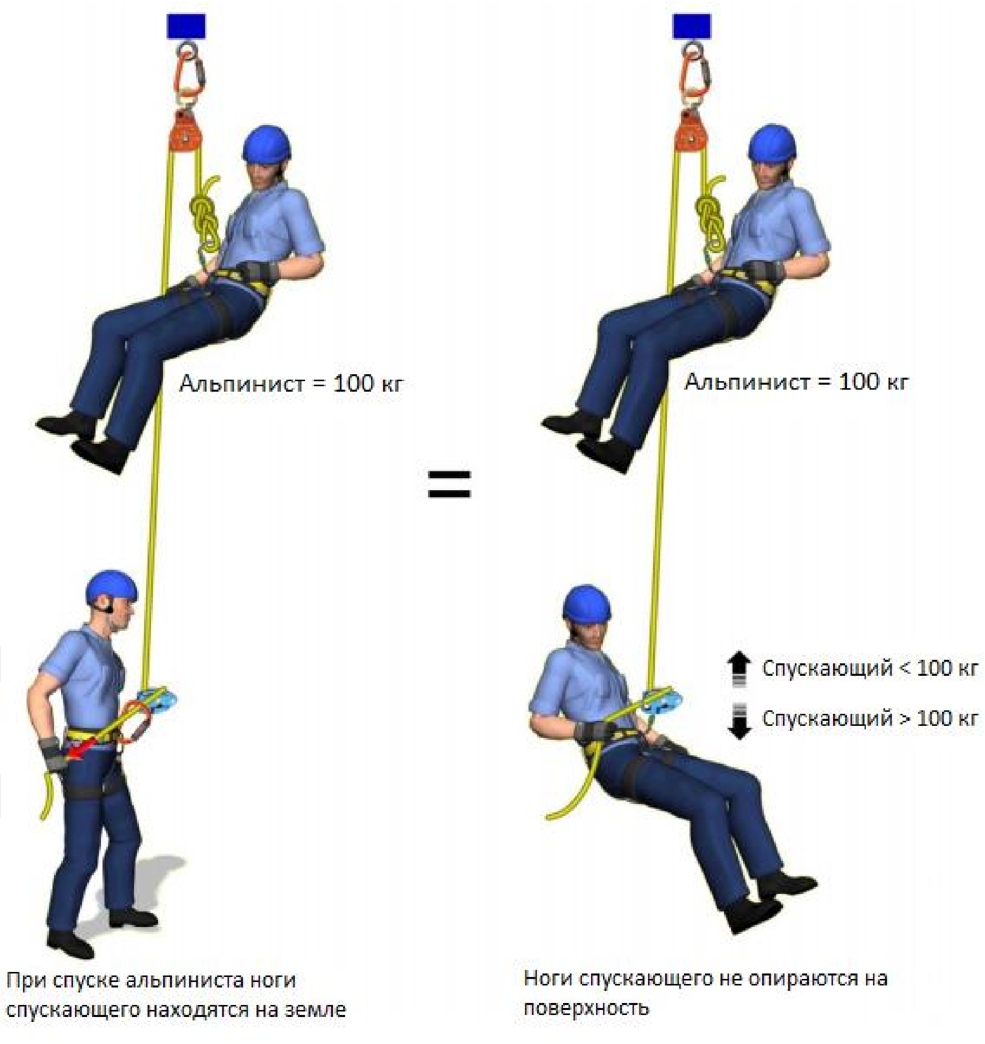


Если альпинист неподвижен, то и нагрузки на всех трех изображениях будет идентичны. Нет никакой разницы, какая ветвь веревки окажется ближней к альпинисту – неподвижная или спусковая.

Во всех трех случаях вес альпиниста поддерживается двумя ветвями веревки. При весе альпиниста в 1 кН, на каждую из ветвей будет приходиться по 0,5 кН. Т.к. эти ветви проходят через блок, их совместное усилие передается на анкерную точку, сообщая усилие в 0,5 кН + 0,5 кН = 1 кН.

Если слегка нажать на ручку спускового устройства на втором рисунке и ослабить веревку, находящуюся в правой руке, система реагирует, пытаясь стабилизироваться единственно возможным способом – альпинист спускается вниз.

Теперь представим пассивный спуск, осуществляемый снизу.



Если 100-кг альпинист поддерживается только одной веревкой, он сообщает усилие веревке в 1 кН. Для того, чтобы он остался неподвижным, к другому концу веревки должна быть приложена масса в 100 кг. Если она будет меньше – альпинист будет спускаться, если больше – подниматься. Это говорит нам о том, что спускающий должен создать усилие в 1 кН, чтобы удержать альпиниста на месте.

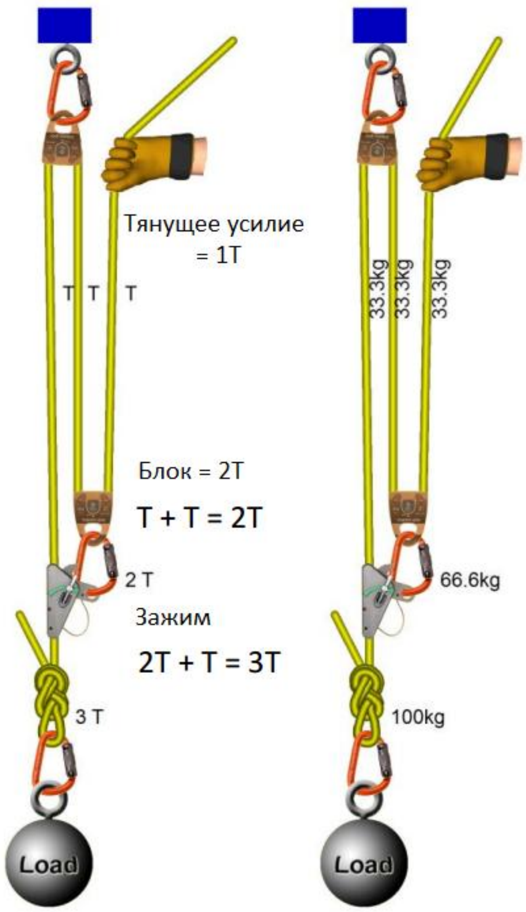
Таким образом, на анкерную точку теперь действует масса альпиниста ПЛЮС масса спускающего, составляя вместе 200 кг. А это является рычагом 1-го рода, либо полиспастом 1:1.

Т-система для подсчета выигрыша в силе.

Расчеты всегда следует начинать с точки приложения усилий (тянущего конца), предполагая, что усилие будет равно 1 единице натяжения (или 1 Т).

Если веревка является непрерывной на всем протяжении и не имеет иных точек присоединения, величина натяжения останется непрерывной по всей длине. Наличие любого зажима на веревке добавляет еще одну единицу натяжения. Для любого изменения направления хода веревки (через блок) требуется сила, обратная по направлению.

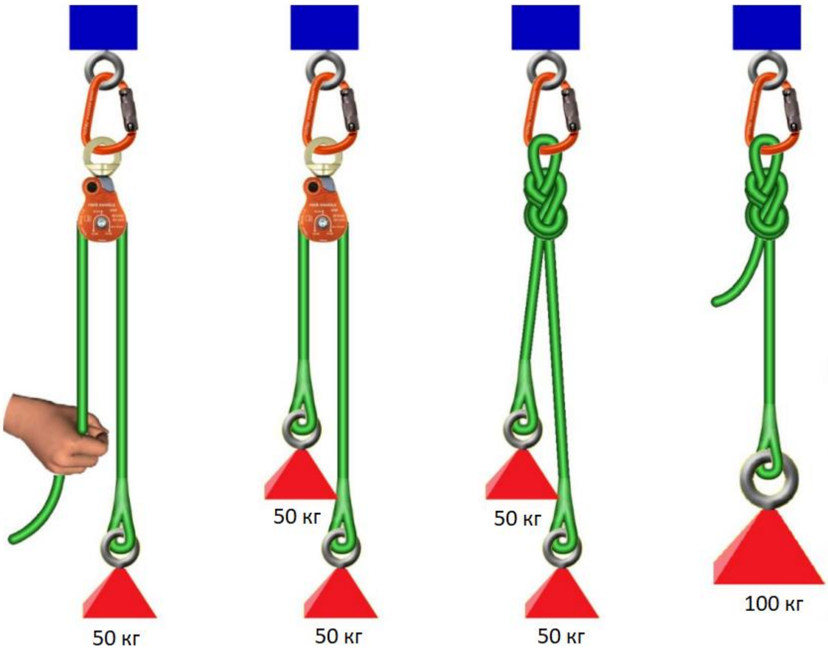
Принимаем силу 1Т в тянущем конце. Натяжение во всех трех ветвях будет равно Т, т.к. веревка нигде не присоединяется в этой части системы. Блок должен противостоять натяжению от двух ветвей веревки – входящей в него (Т) и выходящей из него (Т). Таким образом, Т + Т = 2Т. Зажим добавляет к 2Т, приходящим от блока 1Т, полученную от тянущего усилия. Итак, 2 Т + Т = 3 Т.

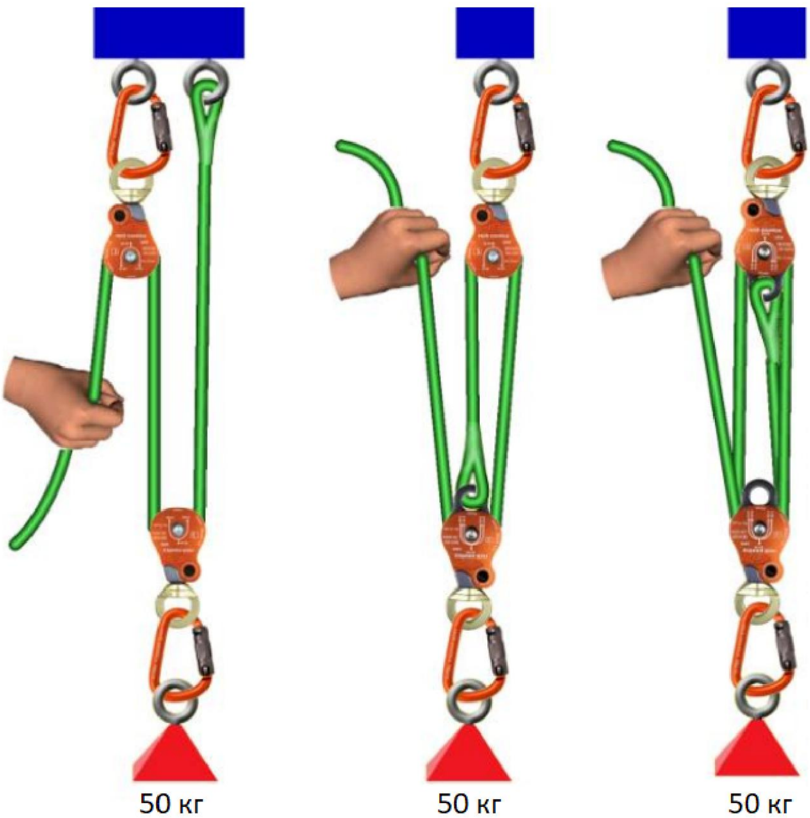


Данная «Т-система» демонстрирует, что каждый отдельный элемент, перенимающий начальное тянущее усилие оказывает влияние на конечный результат. Следовательно, выигрыш в силе в данной системе - 3:1. Иными словами, тянущего усилия в 33,3 кгс будет достаточно для перемещения массы в 100 кг.

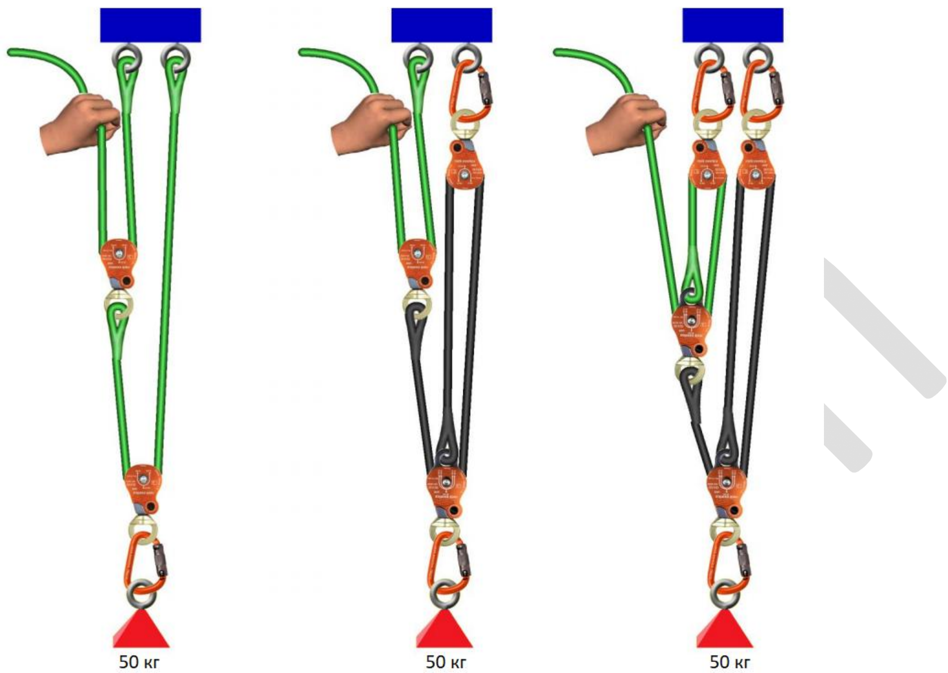
Примеры выигрыша в силе.

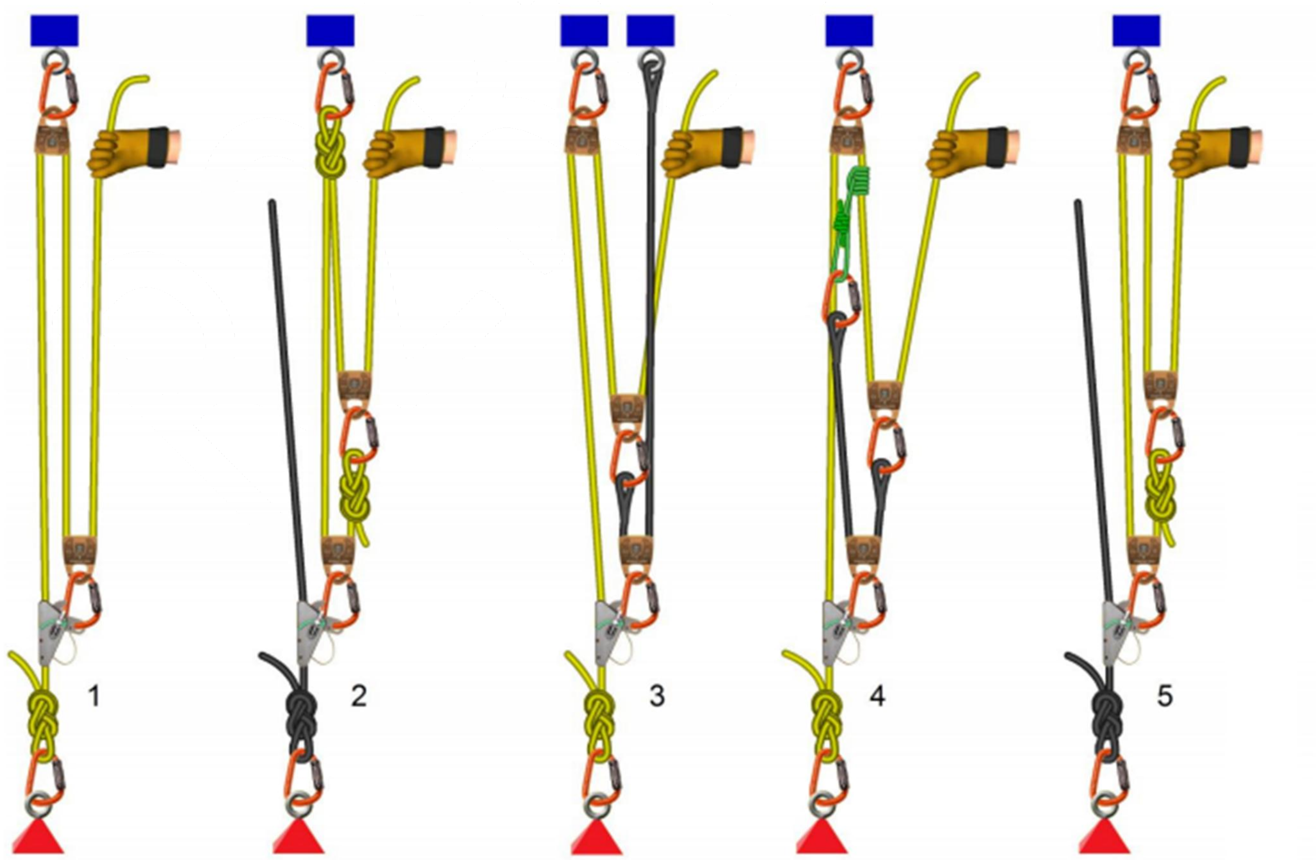
Посчитайте нагрузку на анкерные точки для каждой из этих статичных систем:





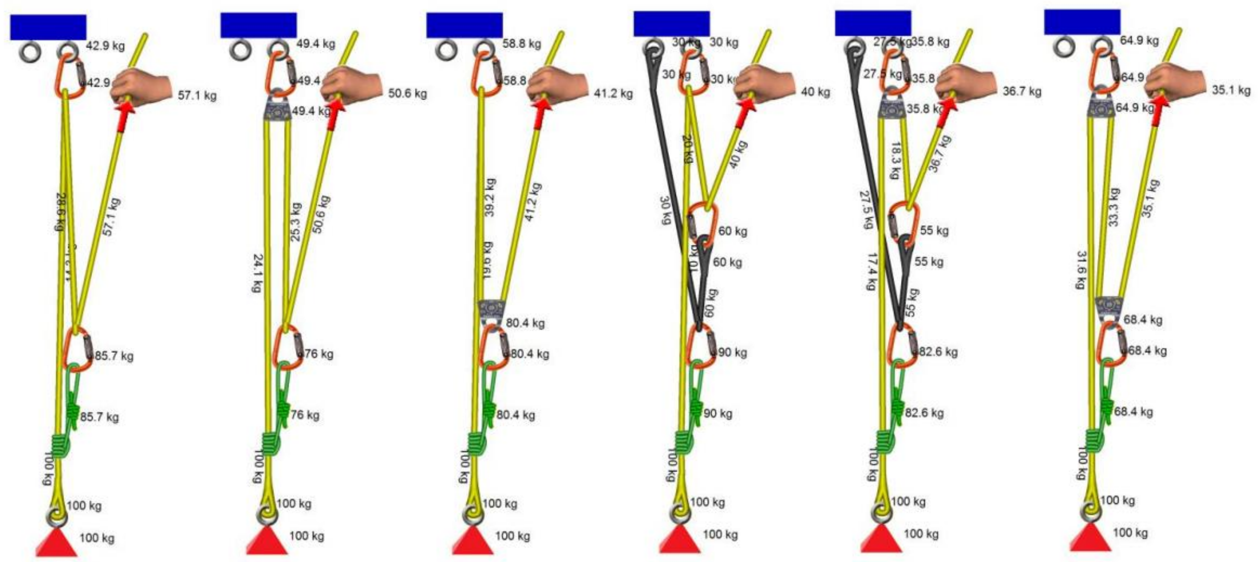
Определите теоретический выигрыш в силе и натяжение в каждой из ветвей веревки в следующих статичных системах:



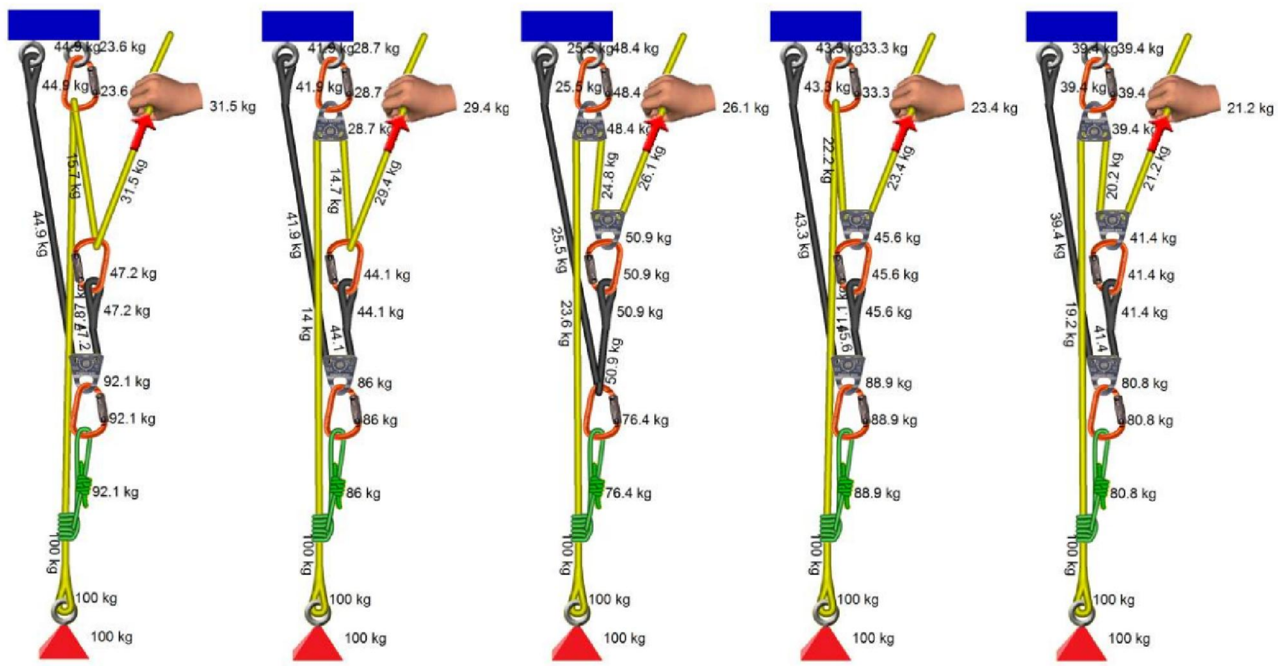


Теоретический и практический выигрыш в силе.

Идеальный выигрыш в силе (ИВС) является частным случаем теоретического выигрыша в силе (ТВС), когда при расчетах игнорируются потери на трение, растяжение и т.п.
Практический выигрыш в силе (ПВС) представляет собой реальный расчет, где потери учитываются. Потери возможно предполагать, моделируя их в различных компонентах системы. Следующее изображение демонстрирует разницу в расчетах при условии потерь на трение в 50 % у карабинов и 5 % у блоков.



ТВС 3:1 ПВС 1,8:1 | ТВС 3:1 ПВС 2:1 | ТВС 3:1 ПВС 2,4:1 | ТВС 5:1 ПВС 2,5:1 | ТВС 5:1 ПВС 2,7:1 | ТВС 3:1 ПВС 2,8:1



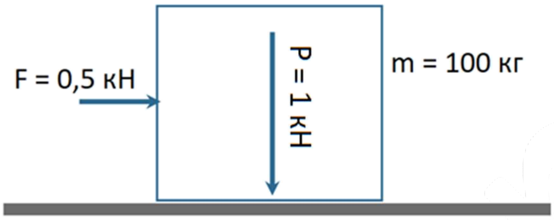
ТВС 5:1 ПВС 3,2:1 | ТВС 5:1 ПВС 3,4:1 | ТВС 5:1 ПВС 3,8:1 | ТВС 5:1 ПВС 4,3:1 | ТВС 5:1 ПВС 4,7:1

Трение.

Трение между плоскими поверхностями.

Если груз требуется переместить по горизонтальной поверхности, тогда отношение между массой и силой, затрачиваемой на перемещение данной массы, можно назвать коэффициентом трения или μ.

$$\mu = \frac{\text{сила, затраченная на перемещение}}{\text{вес объекта}}$$



$$\mu = \frac{500\ \text{Н}}{1000\ \text{Н}}$$

$$\mu = 0{,}5$$

Следует отметить, что единицы измерения (Н/Н) сокращаются и μ является безразмерной величиной. В следующей таблице представлены некоторые интересные (и логичные) примеры:

Груз	Поверхность	μ
сталь	тефлон	0,04
сталь	полифен	0,2
дерево	бетон	0,62
твердые вещества	резина	1,0 – 4,0

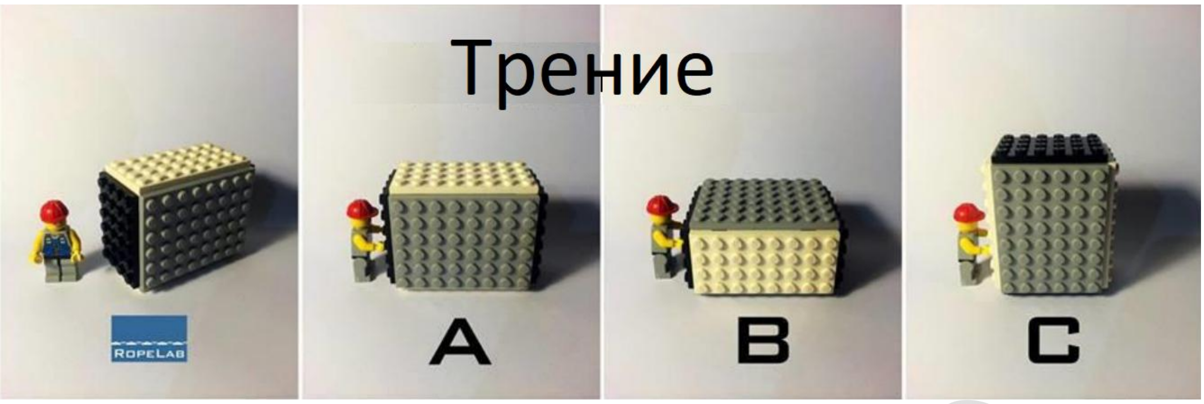
Следует различать, что существует разница между силой, требующейся для начала движения и силой для поддержания движения. Эта разница заключается в тонких отличиях, присущих статическому и динамическому (или кинетическому) трению. Однако эти случаи мы рассматривать не будем.

Трение: одинаковая масса, разное положение.

Наиболее важным моментом, на который стоит обращать внимание – это ориентация объекта (или площадь контакта между объектом и поверхностью). Следующее изображение показывает разницу между положениями A, B и C, которую нужно принимать во внимание при расчете усилий, требуемых для перемещения большого блока по поверхности.

Если мы будем придерживаться всех допущений:

- на пути нет препятствий, груз не заблокирован,
- скорость перемещения низкая, поэтому нет выделения тепла
- соприкасающиеся поверхности плоские
- плотность объекта однородна, поверхность чистая
- поверхность, по которой перемещается груз, непрерывна.



Мы присваиваем следующие свойства перемещаемому объекту:

- состоит из нейлона, масса составляет 48 кг
- поверхность, вдоль которой происходит перемещение – гладкий бетон
- коэффициент трения пары нейлон/бетон – 0,44

Рассмотрим следующее изображение:

Две маленькие детали представляют собой одну и ту же массу (скажем, 2 кг), но данная масса передается полу через одну или две точки контакта. Левая деталь сообщает полу 2 кгс через одну точку, а правая сообщает те же 2 кгс через 2 точки, на каждую из которых приходится половина нагрузки, по сравнению с левой деталью.

Теперь, для большого куба:

- Положение A: Вес в 48 кгс через 32 точки (каждая передает 1,5 кгс)
- Положение B: Вес в 48 кгс через 48 точек (каждая передает 1 кгс)
- Положение C: Вес в 48 кгс через 24 точки (каждая передает 2 кгс)

Если количество точек контакта увеличится, сила, действующая на каждую из них, будет пропорционально уменьшаться, однако общая сила останется неизменной и составит те же самые 48 кгс.

Независимо от ориентации, мы можем вычислить силу, необходимую для перемещения этого объекта.

$$\mu = \frac{\text{сила, затраченная на перемещение}}{\text{вес объекта}}$$

$$\text{Сила} = \mu \times \text{вес}$$

F = 0,44 x 48кг x 9,81м/с

F = 207 Н

Трение на изогнутых поверхностях.

В предыдущем разделе уделялось мало внимания, тому что, в обычной альпинистской практике веревки обычно движутся, проходя через блоки или скользя по изогнутым поверхностям спусковых устройств. И вопрос понимания коэффициента трения здесь является самым важным.

При использовании веревок приходится принимать во внимание и другие значимые факторы:

1. Усилия, растягивающие веревку на внешней стороне изгиба и сжимающие на внутренней стороне.
2. Деформация веревки, проявляющаяся в ее уплощении.
3. Затягивание веревки вокруг поверхности – особенно проявляется в случаях, когда веревка полностью обернута вокруг объекта.

Мы можем пренебречь первыми двумя факторами, если будем придерживаться общепринятого правила, что радиус изгиба не должен составлять менее 4-х диаметров веревки. Именно по этой причине наиболее эффективные блоки имеют диаметр шкива не менее 44 мм (для работы с 11-мм веревками).

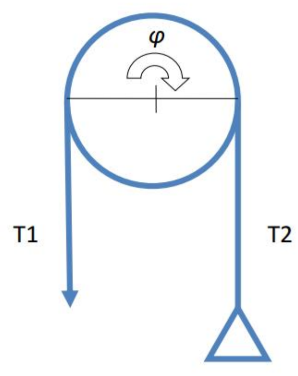
Уравнение кабестана (Уравнение Эйлера для трения каната по цилиндру).

В данном разделе мы рассмотрим третий фактор, который поможет нам в практическом понимании трения применительно к практике работы с веревками. Есть две замечательные книги, касающиеся данной темы:

1. Коэффициент трения в синтетических веревках (Friction Coefficients of Synthetic Ropes, W E Brown, Ocean Technology Department, Naval Undersea Centre, San Diego, California, Feb 1977) and

2. Механика трения при проведении спасательных работ на высоте (The Mechanics of Friction in Rope Rescue, Stephen W Attaway, ITRS 1999)

В случаях криволинейных поверхностей, рассмотрим натяжение в ветвях веревки с обеих сторон изогнутого объекта. Их соотношение описывается уравнением кабестана – функции, как коэффициента трения (μ), так и угла, через который проходит кривая (ϕ).



Некоторые замечания:

- Изогнутый объект не вращается
- T1 = натяжение в веревке слева
- T2 = натяжение в веревке справа
- Силы этих двух натяжений будут различны ввиду трения
- Если нам требуется поднять груз: T1 > T2 + трение
- Если нам требуется опустить груз: T1 + трение < T2.

Уравнение кабестана утверждает, что отношение T1 к T2 будет равным $e^{\mu\phi}$, или:

$$\frac{\text{T1}}{\text{T2}} = e^{\mu\varphi}$$

Эта функция является экспоненциальной, это означает, что *e* (число Эйлера) возводится в степень µ x ф. «*e*» одно из замечательных чисел математики (подобно «π») и обычно принимается равным 2,71828. В инженерных калькуляторах для вычисления этой функции присутствует кнопка «e^x». Обратная функция в данном случае обозначается ln(x) и вычисляет натуральный логарифм от x.

Для вычисления практического значения отношения T1/T2, нам требуется:

1. Измерить угол ф в радианах.

Большинству людей известны меры углов в градусах. Круг разделяется от 0° до 360°. В нашем случае веревка оборачивается на половину круга - 180°. Радианы представляют собой альтернативную меру угла. Круг представляет собой 2π радианов (тоже самое, что 360°). Т.е., веревка проходит через π или 3,14159 радианов.

2. Использовать соответствующие справочники для определения коэффициента трения µ для данных материалов. В данном примере примем, что нейлоновая веревка перегибается через трубу из гальванизированной стали большого диаметра, и коэффициент трения µ для данной пары будет составлять 0,2.

3. Назначить значение массе, которая определит значение «T2». Примем 100 кг.

Итак, для спуска:

$$\text{T1} = \text{T2}: e^{\mu\varphi}$$

$$\text{T1} = m \times g: e^{\mu\varphi}$$

$$\text{T1} = 100 \text{ кг} \times 9{,}81\text{мс}^{-2}: e^{(0{,}2\times 3{,}14159)}$$

$$\text{T1} = 980: 1{,}874$$

$$\text{T1} = 522{,}9 \text{ Н}$$

В практическом смысле это означает, что спуске 100-кг, со стороны ветви T1 груз будет ощущаться как 53,4 кг (522,9 Н ÷ 9,8 мс^{-2}).

Для подъема:

$$\text{T1} = \text{T2} \times e^{\mu\varphi}$$

$$\text{T1} = m \times g \times e^{\mu\varphi}$$

$$\text{T1} = 100 \text{ кг} \times 9{,}81\text{мс}^{-2} \times e^{(0{,}2\times 3{,}14159)}$$

$$\text{T1} = 980 \times 1{,}874$$

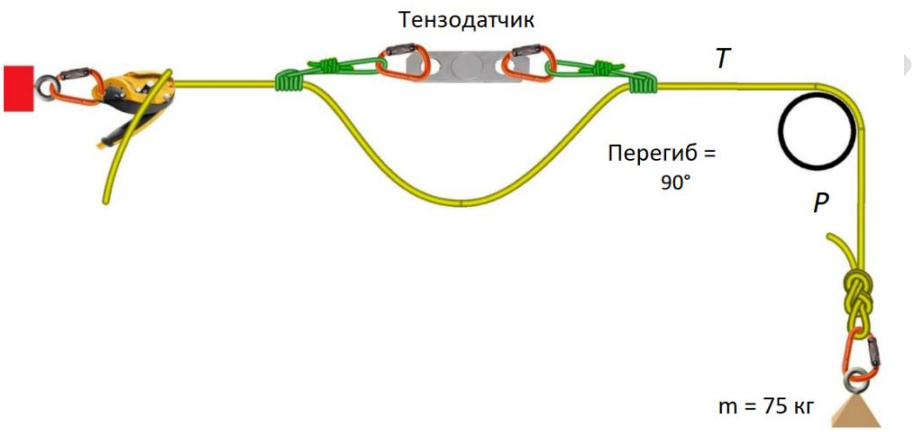
$$\text{T1} = 1837 \text{ Н}$$

Иными словами, при подъеме 100-кг, со стороны ветви T1 груз будет ощущаться как 187-килограммовый (1837 Н ÷ 9.8 мс^{-2}).

Измерение коэффициента трения.

Многие источник содержат таблицы с коэффициентами трения для широкого спектра материалов, однако они не всегда подходят для ситуаций работы с веревками. Дня нас актуальней будут варианты нейлон vs. полиэстер, песчаник vs. гранит или анодированный алюминий vs. полированный.

Тензодатчики становятся все более доступными, поэтому мы на практике в состоянии измерить некоторые аспекты нашей работы и получить полезные массивы информации. На первый взгляд, может показаться необходимым наличие двух тензодатчиков для вычисления коэффициента трения μв любой ситуации. При проведении тестов может использоваться стандартный известный груз, но и в этом случае может возникнуть неопределенность, связанная с неизвестностью массы веревки между перегибом и грузом. Наиболее простой способ – выбрать груз произвольной массы, но лучше тот, что соответствует реальным условиям, скажем 75 кг, и произвести следующие действия.



Используя данное оборудование можно опустить испытуемый груз (обозначим вес как P) и в процессе спуска измерить натяжение ($T_{спуска}$) в веревке выше перегиба. В соответствии с уравнением кабестана, в процессе спуска:

$$\frac{\mathrm{P}}{\mathrm{T}_{\text{спуска}}} = e^{\mu\varphi}$$

Следовательно

$$\mathrm{P} = \mathrm{T}_{\text{спуска}} \times e^{\mu\varphi}$$

Тот же датчик используем для измерения натяжения при подъеме груза ($T_{подъема}$). На этот раз уравнение кабестана принимает вид:

$$\frac{\mathrm{T}_{\text{подъема}}}{\mathrm{P}} = e^{\mu\varphi}$$

Итак,

$$\frac{\mathrm{T}_{\text{подъема}}}{e^{\mu\varphi}} = \mathrm{P}$$

В обоих случаях Р остается неизменным, поэтому мы можем объединить два уравнения:

$$\frac{\mathrm{T}_{\text{подъема}}}{e^{\mu\varphi}} = \mathrm{T}_{\text{спуска}} \times e^{\mu\varphi}$$

Приводим уравнение к виду:

$$\frac{\mathrm{T}_{\text{подъема}}}{\mathrm{T}_{\text{спуска}}} = e^{\mu\varphi} \times e^{\mu\varphi} = 2e^{\mu\varphi}$$

Помня, что обратной функцией e^{x} является ln(x), получаем:

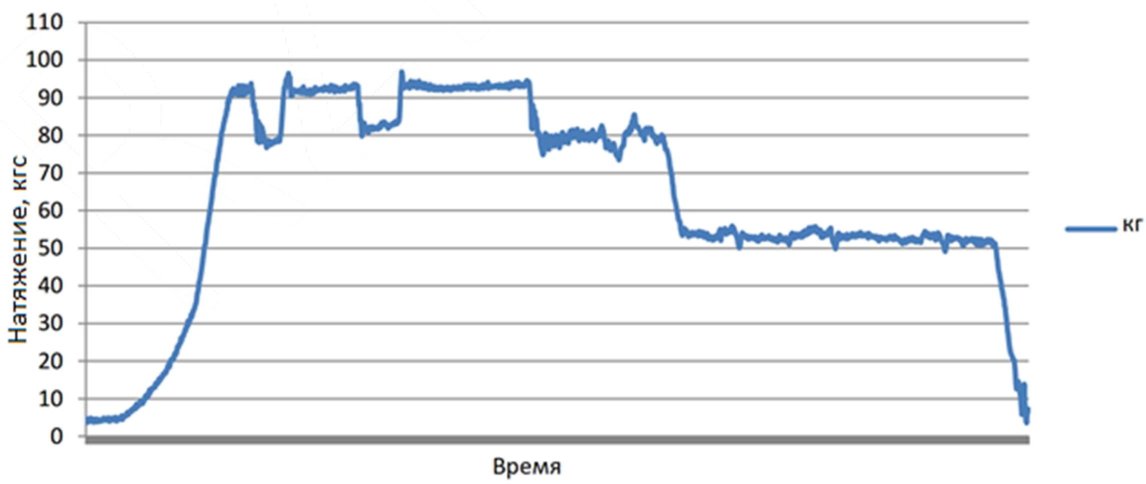
$$\ln\left(\frac{\mathrm{T}_{\text{подъема}}}{\mathrm{T}_{\text{спуска}}}\right) = 2\mu\varphi$$

Итак, наконец:

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{\mathrm{T}_{\text{подъема}}}{\mathrm{T}_{\text{спуска}}}\right)}{2\varphi}$$

Это конечное уравнение имеет практический смысл для определения коэффициента трения в конкретных случаях, напрямую связанных с альпинизмом.

Результаты тестов.
Веревка: 11.1mm Sterling HTP,
Перегиб 90° через алюминиевую полированную трубу, диаметром 60 мм.
Груз массой 75 кг: подъем, приведение системы в статичное положение, спуск.



Тесты начинались с того, что груз массой 75 кг покоился на земле. Натяжение постепенно (использовалась низкоскоростная аккумуляторная лебедка) повышалось и измерялось тензодатчиком, встроенным в систему.

Наблюдения:

- Все натяжение было измерено в кгс для простоты понимания.
- После того, как натяжение достигало 90 кгс, груз начинали опускать.
- По прошествии небольшого промежутка времени, спуск останавливался и груз приводился в состояние покоя, оставляя натяжение в 80 кгс.
- Данный цикл повторялся 2 или более раз, с небольшими превышениями натяжения до 96 кгс – это требовалось для преодоления статического трения при начале движения.
- Натяжение, необходимое для поддержания движения груза наверх составляло примерно 92 кгс.
- После перерыва система переключалась на спуск, и груз опускался вниз за один цикл с натяжением при спуске примерно в 53 кгс.
- Угол перегиба (ф) составлял 90°, или π/2 радианов.

$$\mu_{\frac{\text{алюминий}}{\text{полиэстер}}} = \frac{ln\left(\frac{\mathrm{T}_{\text{подъема}}}{\mathrm{T}_{\text{спуска}}}\right)}{2\varphi}$$

$$\mu = \frac{ln\left(\frac{92}{53}\right)}{2 \times \frac{\pi}{2}}$$

$$\mu = \frac{0{,}5515}{3{,}14159}$$

$$\mu = 0{,}175$$

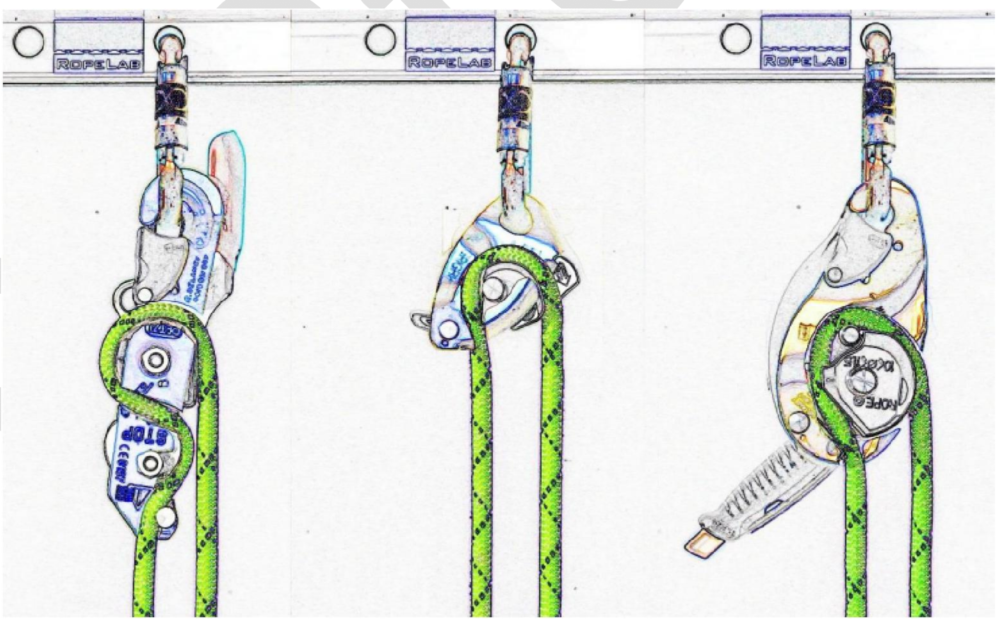
Измеренный коэффициент трения μ теперь можно использовать для подсчета трения, производимого алюминиевыми устройствами совместно с веревками из полиэстера. Простейшим примером может послужить подсчет необходимого количества оборотов веревки вокруг алюминиевой трубы для спуска груза массой 75 кг:

Обороты	Угол	$e^{\mu\varphi} = \frac{\mathrm{P}}{\mathrm{T}_{\text{спуска}}}$	$\mathrm{T}_{\text{спуска}}$, необходимая для спуска 100 кг
¼	90° = π/2 радианов	1,32	75,97
½	180° = π радианов	1,73	57,71
1	360° = 2π радианов	3,00	33,30
2	720° = 4π радианов	9,02	11,09
3	6π радианов = 3 оборота	27,08	3,69
4	6π радианов = 4 оборота	81,31	1,23
5	8π радианов = 5 оборотов	244,15	0,41
6	10π радианов = 6 оборотов	733,15	0,14

В реальных условиях это должно означать, что 4 оборота веревки вокруг алюминиевой трубы практически на 100% останавливают движение. Отсюда вспомним практическое «правило 4-х витков» для незатягивающихся узлов.

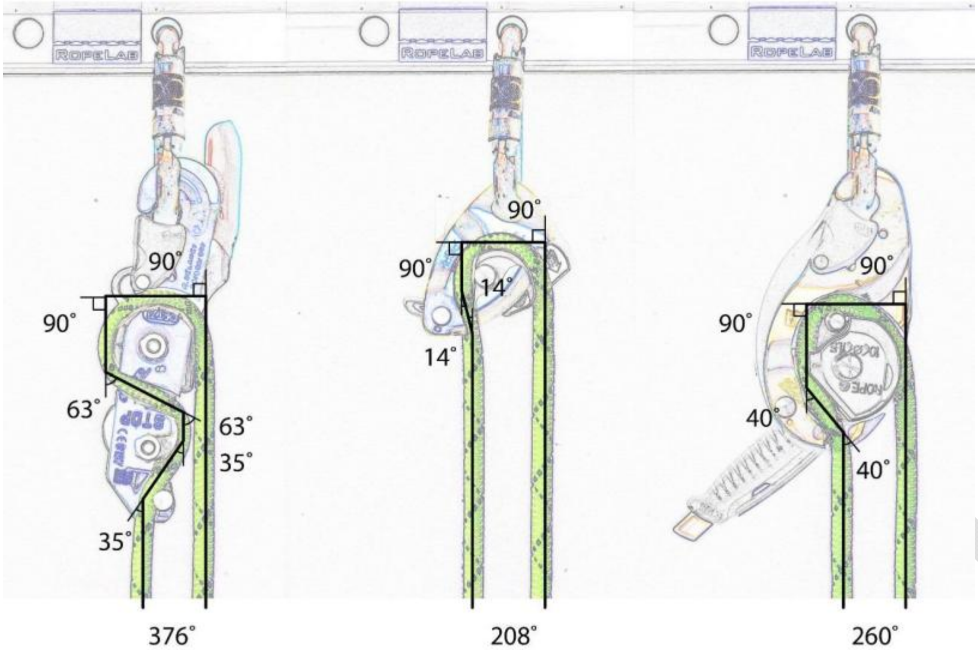
Веревка	Перегиб	$T_{подъема}$	$T_{спуска}$	Угол	μ
Sterling HTP	50 мм алюминий	98	50	90	0,21
Edelrid SS	50 мм алюминий	88	35	180	0,15
Edelrid SS	50 мм алюминий	89	49	90	0,19
Sterling HTP	60 мм анод. алюминий	92	53	90	0,18
Edelrid SS	60 мм анод. алюминий	87	36	180	0,14
Edelrid SS	60 мм анод. алюминий	92	52	90	0,18
Sterling HTP	43 мм гальв. сталь	103	47	90	0,25
Edelrid SS	43 мм гальв. сталь	125	37	180	0,19
Edelrid SS	43 мм гальв. сталь	92	47	90	0,21
Edelrid SS	10 мм сталь	127	29	180	0,24
Edelrid SS	12 мм сталь	140	31	180	0,24
Edelrid SS	Деревянная плоскость	179	17	180	0,37
Edelrid SS	Деревянный брус	140	15	180	0,36
Edelrid SS	бетон	135	34	90	0,44

Трение в автоблокантах.



Данное изображение демонстрирует различные спусковые устройства, являющиеся частью подъемно-спусковых систем. Мы можем использовать уравнение кабестана для предсказания потерь на трение в каждом из устройств, если оно используется в качестве блока.

Сперва определим угол, через который проходит веревка в каждом случае.



Посчитав углы и принимая коэффициент трения (μ) в 0,2, получаем.

Petzl Stop

$$\frac{\mathrm{T1}}{\mathrm{T2}} = e^{\mu\varphi}$$

$$\frac{\mathrm{T1}}{\mathrm{T2}} = e^{0{,}2\times(376\div360\times2\times\pi)}$$

$$\frac{\mathrm{T1}}{\mathrm{T2}} = 3{,}715$$

Petzl GriGri2

$$\frac{\mathrm{T1}}{\mathrm{T2}} = e^{0{,}2\times(208\div360\times2\times\pi)}$$

$$\frac{\mathrm{T1}}{\mathrm{T2}} = 2{,}067$$

Petzl I'Ds

$$\frac{\mathrm{T1}}{\mathrm{T2}} = e^{0{,}2\times(260\div360\times2\times\pi)}$$

$$\frac{\mathrm{T1}}{\mathrm{T2}} = 2{,}478$$

Данные числа являются мультипликаторами, или отношениями исходящего и выходящего натяжений. Они подразумевают, что, например, при использовании **Petzl I'Ds** в качестве верхнего блока (с функцией блокировки), нам потребуется приложить усилие в 2,478 кН для поднятия веса в 1 кН.

Если вы хотите ранжировать эти автоблоканты, то прежде всего обратите внимание на **GriGri2**, затем на **I'Ds**, а **Stop** стоит рассматривать в последнюю очередь. Предполагается, что подобное использование оборудования не противоречит предписаниям производителя.

Тест эффективности различных устройств.

Посмотрим на эффективность различных устройств, используемых в качестве верхнего блока в простом полиспасте 1:1. Какая сила потребуется каждому из них для подъема 1 кН.

- Rock Exotica Omni Block 1.5: 1,10 кН
- Petzl P50: 1,12 кН
- Petzl mini pmp: 1,15 кН
- BD pulley: 1,16 кН
- CMI pulley: 1,25 кН
- Petzl оранжевый пластиковый: 1,25 кН
- Petzl micro traxion: 1,14 кН
- Petzl mini traxion: 1,35 кН
- Одиночный карабин: 1,69 кН
- Сдвоенные карабины: 1,86 кН
- Petzl IDs: 2,65 кН
- Petzl Gri-Gri1: 2,23 кН
- Petzl Gri-Gri2: 2,21 кН
- CMC mpd: 1,07 кН

Интересно, что предсказанные и измеренные значения для IDs (2,478 и 2,65) и GriGri2 (2,067 и 2,21) достаточно близки. Несоответствие, безусловно, допустимое, учитывая то, что вычисление коэффициентов трения в предыдущем разделе осуществлялось с известной степенью приближения.

Подъем и спуск через бетонный перегиб.

Спасатели и промышленные альпинисты часто делают навеску на горизонтальной поверхности, а затем веревки проходят через перегиб в 90° и спускаются вниз. Это не имеет значения при статических нагрузках, однако для подъема и спуска есть определенные практические соображения.

Измеренные значения показывают, что перегиб подобный данному будет иметь эффективность 2:1, помогая при спуске и затрудняя подъем. При подъеме груза с помощью устройства без подшипников, ситуация становится гораздо хуже.

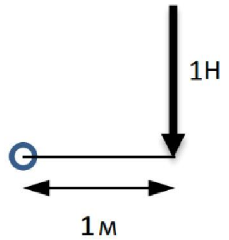
Сжатие и растяжение.

Растяжение и сжатие – две возможные силы, которые могут оказывать влияние на отдельные части системы. Проще говоря, силы растяжения являются результатом тянущих усилий, а сжимающие –толкающих. Твердый предмет, такой как кусок алюминиевой трубы, может быть использован в обоих случаях – может держать на себе подвешенный груз в 100 кг (растяжение) или быть опорной стойкой, воспринимая сжимающие нагрузки. Гибкие элементы, такие как веревка, будут полезными только в случае растяжения.

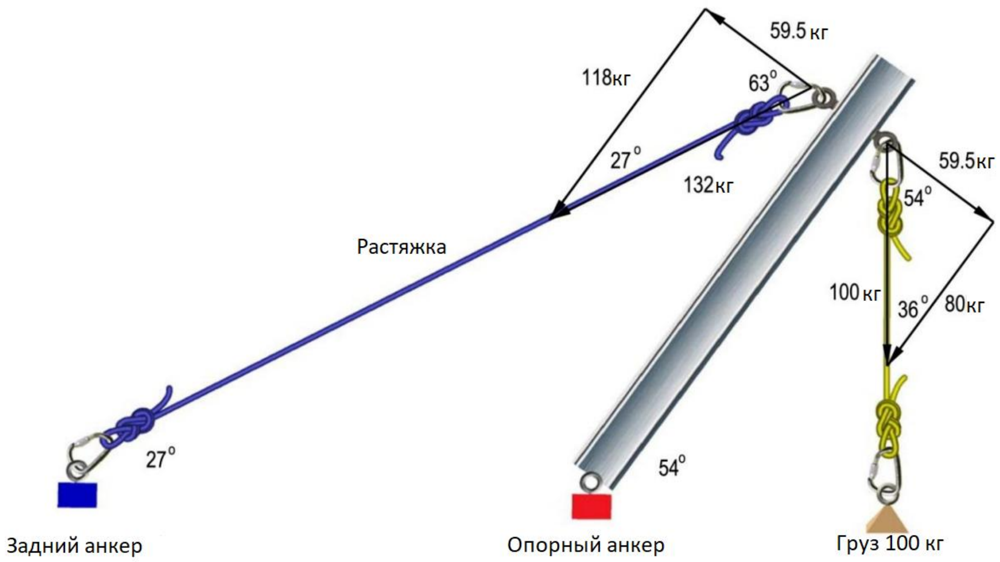
Если предположить, что свойства объекта (площадь поперечного сечения, плотность, материал) являются неизменными по его длине и объект имеет точки соприкосновения с другими объектами только по своим краям, также резонно предположить, что силы растяжения/сжатия также будут неизменными.

Крутящий момент.

Момент – вращающая сила, измеряемая в Ньютоно-метрах (Нм). Момент в 1 Нм эквивалентен приложению силы в 1 Н на плечо в 1м.



Растяжки и опорные стойки: растяжение и сжатие.



На этом изображении представления типичная конфигурация гуся. Основание стойки представляет собой шарнирно-неподвижный анкер. Главный вопрос будет заключаться в том, какое усилие будет приходиться на растяжку, если на систему подвесить груз массой в 100кг?

Даже если система находится в равновесии, для ответа на данный вопрос нужно предположить, что груз стремится повернуть стойку по часовой стрелке, а опорный анкер будет осью вращения. Для расчета вращающей силы или момента нам необходимо узнать, какое усилие в грузовой веревке в действительности прилагается перпендикулярно стойке. Следует отметить, что в системе будет присутствовать сила, вызванная висящим грузом, параллельная стойке.

Изображение и измерение этих сил дает 59,5 кгс вращающей силы и 80 кгс сжатия, прилагаемых к вершине стойки. Вращение стойки предотвращается только натяжением растяжки. Натяжение в ней также может быть разложено на момент и сжатие. Для предотвращения вращения, растяжке требуется сообщить силу, равную той, что действует на грузовую веревку – 59,5 кгс, но противоположную по направлению.

Завершая треугольник линией, параллельной стойке и производя измерения, получаем силу растяжения в 132 кгс.

Расчет момента и сжатия, используя тригонометрию.

Т.к. мы разложили силы, растягивающие канат на взаимоперпендикулярные компоненты (силу сжатия стойки и вращение), у нас получился прямоугольный треугольник и мы можем использовать тригонометрические отношения.

Для грузовой веревки:

$$\text{Сила вращения} = 100 \times \sin(36{,}51°) = 100 \times 0{,}595 = 59{,}5 \text{ кгс}$$

Для растяжки:

$$\text{Натяжение} = 59.5 \div \sin(26{,}8°) = 59.5 \div 0{,}45 = 132 \text{ кгс}$$

Измерительные приборы.

В недавнем времени появилась насущная необходимость в понимании и измерении сил, действующих на веревочные системы. Новые приборы стали гораздо более доступными, что сделало процессы измерений менее похожим на сложные научные исследования, но более доступными для обычных промышленных альпинистов.

Приборы для измерения силы (динамометры) – явление не новое и давно используются в грузоподъемных работах. Большинство из них достаточно тяжелые (несколько кг) и обеспечивают считывание информации в реальном времени – либо с помощью цифрового экрана, либо перемещением стрелки. Однако существуют некоторые ключевые факторы, которые стоит учитывать в выборе подобных приборов.

Масса измерительного прибора.

Фундаментальным принципом научного эксперимента выступает тот факт, что присутствие наблюдателя изменяет систему. Внедрение 5-кг прибора (динамометр и соединительные звенья) в систему канатного доступа является значительным ее преобразованием и, конечно, окажет влияние на эксперимент. Если данный прибор измеряет пиковые нагрузки в точке присоединения веревки, то его наличие достаточно ощутимо, т.к. его масса будет заведомо больше, чем масса всей веревки, присоединенной к анкерной точке.

Разрешающая способность и максимальный масштаб.

Если вам требуется измерить миллиметры, используйте 30-см линейку; шкала деления линейки составляет 1 мм. Если требуется измерить 100 м, пользуйтесь 100-метровой рулеткой; шкала деления рулетки – 1 см и измерить 1 мм подобной рулеткой будет весьма проблематично.

Тоже самое касается и приборов для измерения нагрузки. В идеале, вы можете купить динамометр с максимумом измерения в 20 тонн (20.000 кг или 200 кН). Однако, при этом желательно, чтобы шкала деления составляла 100 кг (0,5 % от верхней границы). Дисплей подобных устройств в состоянии показать и нагрузки, близкие к килограммовым, но точность отображения все равно будет стремиться к 100 кг.

Большинство приборов могут нагружаться на 150 % без разрушения, однако этого стоит избегать.

Итак, для систем канатного доступа, достаточно нетипичным является наличием отдельных элементов с MBS более 50 кН, хотя приборы с 5-тонной (50 кН) подойдут для динамических тестов – логика их использования в данном случае такова, что система защиты от падения разрушится прежде измерительного прибора.

Точность измерений[1].

Прямо говоря, при обсуждении физики, термин «точность» имеет несколько значений. Точность предполагает и сравнение измеренных значений с эталонными, и меру повторяемости в измерениях. Например, 30-см линейка непонятного производителя может быть промаркирована от 0 до 30 см, однако сравнив ее с установленными образцами, такая линейка может оказаться длиной всего в 29,6 см. такой рулеткой вполне можно проводить различные измерения, но их точность окажется не достаточной.

Производители динамометров используют термин «точность» для описания погрешностей. Динамометр с точностью измерений в 0,5 % от максимального значения в 50 кН будет давать погрешность в +/-0,25 кН (5.000 кг плюс/минус 25 кг). Данные погрешности применяются ко всей шкале измерений, следовательно, если измеренная нагрузка составит 100 кг, то фактически ее нужно понимать как 100 кг (+/-25 кг).

Частота.

В цифровых комплексах измерения нагрузок, таких как специальные видеокамеры частота означает то, как часто открывается затвор объектива и измеряется в кадрах в секунду или Герцах (Гц). При съемке с частотой 1 кадр в секунду у вас получится так называемая «замедленная съемка». Для испытаний с медленными перемещениями и оценки относительно статичных систем, частотные характеристики съемки не сильно важны. Замедленная съемка с частотой срабатывания затвора в 1 Гц все равно будет фиксировать всю информацию, пока что-то не сломается как раз в эту секунду между кадрами.

Для динамических тестов, где пиковые нагрузки важны, все меняется. Требуемая частота в электронных приборах известна как «частота Найквиста» (пропускная способность канала) и означает, что если вам необходимо наблюдать событие, происходящее с определенной частотой, прибор учета должен работать на частоте как минимум в два раза большей. Люди не могут расслышать звуки, превышающие 22 кГц, однако аудио компакт-диски имеют частоту звучания, по меньшей мере, 44 кГц или 44 тысячи колебаний в секунду.

Наиболее распространенный стандарт безопасности для систем защиты от падения утверждает, что максимально допустимая нагрузка на человека не должна превышать 6 кН. Проблема этого утверждения в том, что оно не предполагает минимальное время воздействия данной силы. 6 кН, воздействующие в течение 1 секунды – очевидно плохо. Однако, что если пиковое воздействие в 6 кН длится всего 1/100 секунды? Вероятно, правильный ответ будет: «это зависит от…» Чтобы быть уверенным, что мы фиксируем событие, длящееся 1/100 секунды, минимальная частота (частота Найквиста) должна составлять 200 кадров в секунду или 200 Гц. Это, вероятно, нижний частотный порог для всех тестов с падением, однако, для получения четких графиков нагрузок и быть уверенным в полученных данных, частота фиксирования должна составлять 500 Гц и более.

[1] Название раздела переведено условно, т.к. в английском оригинале выглядит как «Accuracy and Precision», что дает нам «Точность и точность».

Приложение: язык математики и физики.

Математические и научные обозначения.

Прежде чем углубиться в язык физики, нам необходимо уточнить стандартные способы обозначения различных отношений величин и значения отдельных символов. Стандартная «стенография» включает в себя обозначение сокращений порядков чисел в пределах 1.000. Метр (м) – стандарт длины в метрической системе. Часто перед м находятся другие буквы, обозначающими ближайшие диапазоны тысяч. Наиболее часто используемыми являются:

- μ или «микро»(1 микрометр = 1 μм = 0,000001 м = $1x10^{-6}$ м)
- м или «милли» (1 миллиметр = 1 мм = 0,001 м = $1x10^{-3}$ м)
- к или «кило» (1 километр = 1 км = 1.000 м = $1x10^{3}$ м)

Стандартными мерами измерений являются:

- длина или расстояние: метр (м)
- время: секунда (с)
- масса: килограмм (кг)

Эти единицы могут сочетаться, в совокупности давая:

- скорость: метры в секунду (мс$^{-1}$)
- ускорение: метры в секунду за секунду (мс$^{-2}$)
- сила: Ньютон (Н)
- работа: Джоуль (Дж)
- момент: Ньютон·метр (Н·м).

Также отмечу, что обычно умножение обозначается как «х», однако нормальным считается и опускать этот знак. Следующие пункты будут идентичны:

- сила равна массе, умноженной на ускорение
- сила равна массе, умноженной на время, умноженной на скорость
- Сила = масса х ускорение
- F = m x a
- F = ma

Схожим образом, «деление» или «разделить на» может быть представлено одним из следующих способов:

- Масса равна силе, разделенной на ускорение
- m = F ÷ a
- m = Fa^{-1}
- m = F/a
- $F = \frac{m}{a}$

Следующим будет «возведение в степень». Типичными примерами будут:

- 3^2 = три в квадрате = 3, возведенное во вторую степень = 3 x 3 = 9
- 2^3= два в кубе = 2, возведенное в 3 степень = 2 x 2 x 2 = 8
- 2 м x 3 м = 6 м^2 = 6 квадратных метров (мера измерения площади)
- 10 метров в секунды = 10 м разделенных на 1 с = 10 м/1 с = 10 м/с = 10 мс$^{-1}$
- 9,8 мс$^{-2}$= 9,8 метров за секунду в квадрате = 9,8 метров в секунду за секунду

Математические действия[2].

Нам нужно хорошо понимать математику и ее представление в письменном виде. Это не сложно, есть только небольшое количество основ, которые следует обозначить во избежание двусмысленности.

Одним из ключевых моментов является четкое определение пути решений уравнений и какое из действий (x, ÷, +, - и т.д.) будет иметь преимущество. Без этого понимания, следующее уравнение может иметь два возможных решения:

$$2+3\times4=?$$

Это:

$$2+3\times4=5\times4=20$$

или:

$$2+3\times4=2+12=14$$

Правильный ответ можно получить только при наличии стандартного метода выполнения таких вычислений. Данная таблица демонстрирует этот стандартный метод, где приоритетность операторов убывает сверху вниз.

Сокращение	Значение	Пример
()	Скобки	(2+3)×4 = 5×4 = 20
^	Степень	5^2 = 20
÷	Деление	20÷4 = 5
×	Умножение	4×6 = 24
+	Сложение	2+3 = 5
-	Вычитание	7 - 4 = 3

Применяя ее к уравнению «2 + 3 х 4 = ?», получаем, что умножение предшествует сложению. Таким образом, сначала умножаем 3 на 4, а затем к ответу прибавляем 2.

$$2+3\times4=2+12=14$$

Теперь мы можем решить и следующее уравнение:

$$2\times4+6\div(1+2)-3^2=?$$

$$2\times4+6\div3-3^2=?$$

$$2\times4+6\div3-9=?$$

$$2\times4+2-9=?$$

$$8+2-9=?$$

$$10-9=1$$

И полученный ответ является единственным правильным.

[2] В русском языке нет соответствия многим аббревиатурам, приведенным в данном разделе и ниже по тексту. Поэтому, для устранения путаницы непонятные буквы и сокращения заменены всем известными обозначениями. Однако акроним BODMAS (brackets – order – division – multiplication – addition - subtraction) полезен для понимание приоритетности математических действий (в порядке уменьшения приоритета – скобки – степень – деление – умножение – сумма - разность).

Научные функции.

Ниже приведены некоторые научные функции, которые пригодятся нам в данной книге.

Сокращение	Значение	Обратная функция	Пример
sin(x)	синус угла x	$\sin^{-1}(x)$ или arcsin (x)	sin(30°) = 0,5
cos(x)	косинус угла x	$\cos^{-1}(x)$ или arcos(x)	cos(45°) = 0,707
tan(x)	тангенс угла x	$\tan^{-1}(x)$ или arctan(x)	tan(60°) = 1,732
e^x	экспоненциальная функция, или число *e*, возведенное в степень x	ln(x)	$e^{2,6}$ = 13,464
ln(x)	натуральный логарифм от x	e^x	ln(13,464) = 2,6
x^2	x в квадрате, или x умноженное на x	$\sqrt{x}$	$5^2 = 5×5 = 25$
$\sqrt{x}$	квадратный корень из x	x^2	$\sqrt{36 = 6}$

Тригонометрия.

Треугольники проявляют себя в любой работе с веревками. Хотя и существует множество практических правил, которые помогают нам в понимании действующих сил, иногда требуется быть более точным в расчетах и высчитывать действительные значения.

Тригонометрия, изучаемая в старших классах, может помочь в этом. Однако, в то же время, большинство из нас не могут применить эти знания на практике, т.к. быстро забыли эти принципы. Одним из таких полезных акронимов выступает SOH-CAH-TOA[3].

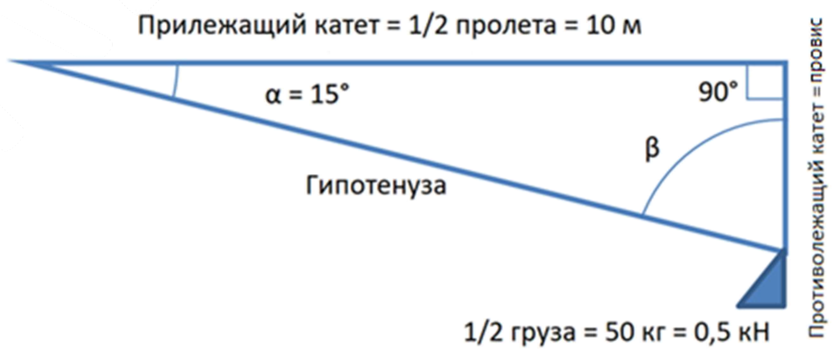
В нашем случае просто следует запомнить:

sin = противолежащий ÷ гипотенуза(SOH)

cos = прилежащий ÷ гипотенуза (CAH)

tan = противолежащий ÷ гипотенуза (TOA).

Это все, что требуется знать, а калькулятор сделает за нас все остальное. Треугольник, как упоминалось выше, представляет собой половину нагруженного троллея. Все, что нам известно – пролет 20 м, α = 15°, а нагрузка – 100 кгс (1 кН).



[3] В русском языке аналога нет и практического смысла не имеет.

Для этого треугольника мы можем вычислить провис, используя следующее отношение:

$$\tan\alpha = \text{противолежащий катет} \div \text{прилежащий катет}$$

$$\tan 15° = \text{провис} \div 10\ \text{м}$$

$$\text{провис} = 10\ \text{м} \div \tan\alpha$$

$$\text{провис} = 10\ \text{м} \div 0{,}268$$

$$\text{провис} = 2{,}68\ \text{м}$$

Схожим образом, мы можем вычислить длину веревки, необходимую с учетом данной нагрузки:

$$\cos\alpha = \text{прилежащий катет} \div \text{гипотенуза}$$

$$\cos 15° = 10\ \text{м} \div \text{гипотенуза}$$

$$\text{гипотенуза} = 10\ \text{м} \div \cos 15°$$

$$\text{гипотенуза} = 10\ \text{м} \div 0{,}966$$

$$\text{гипотенуза} = 10{,}35\ \text{м}$$

Теперь, когда мы хорошо изучили геометрию треугольников, мы можем использовать ее для определения нагрузок на анкерные точки, возникающих при работе. Геометрия треугольников определяет величину и направление векторов, возникающих в данных системах.
1. Используя длины сторон треугольника, мы можем определить натяжение в веревках и нагрузки на анкер:

$$\text{Провис} \div \text{гипотенуза} = \frac{1}{2}\ \text{груза} \div \text{натяжение веревки}$$

$$\text{Натяжение веревки} = \frac{\text{груз} \times \text{гипотенуза}}{2 \times \text{провис}} = \frac{1\ \text{кН} \times 10{,}35\ \text{м}}{2 \times 2{,}68\ \text{м}} = 1{,}93\ \text{кН}$$

2. Альтернативным способом определения натяжения веревки будет использование следующих отношений:

$$\sin\alpha = \frac{\text{противолежащий катет}}{\text{гипотенуза}}$$

$$\sin 15° = \frac{0{,}5\ \text{кН}}{\text{T}}$$

$$\text{T} = \frac{0{,}5\ \text{кН}}{\sin 15°} = \frac{0{,}5\ \text{кН}}{0{,}259} = 1{,}93\ \text{кН}$$

3. Для сравнения посчитаем нагрузку, используя формулу, часто применяемую в такелажных работах:

$$\text{T} = \frac{\text{груз} \times \text{пролет}}{4 \times \text{провис}}$$

$$\text{T} = \frac{1\ \text{кН} \times 20\ \text{м}}{4 \times 2{,}68\ \text{м}} = 1{,}865\ \text{кН}$$

Это приближенные вычисления, опирающиеся на утверждение, что гипотенуза приблизительно равна половине пролета. При увеличении провиса, разница возрастает и уравнение становится все менее точным.

Меры углов.

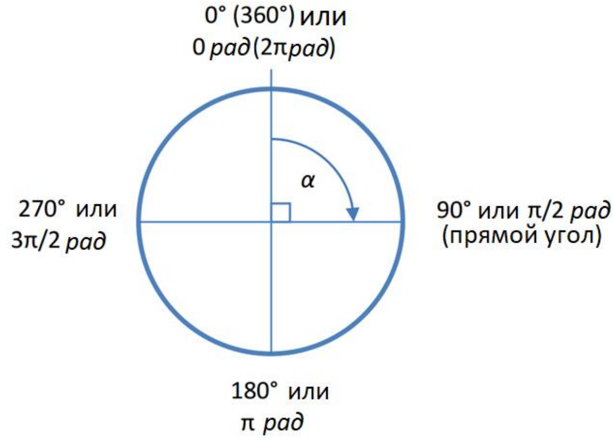
Наиболее часто углы измеряют в градусах, полный круг состоит из 360 градусов (360°). Другой единицей измерения является радиан, и хотя он не часто встречается в повседневном языке, для математики он обычен. Различные таблицы используют радианы для подсчета трения в кабестане (в случае альпинизма – это различные спусковые устройства). По определению, круг состоит из 2π (приблизительно 6,28) радианов.

Почему мы используем радианы? Несмотря на то, что радианы могут казаться необычными, во многих математических расчетах их использование упрощает установление отношений, в частности, между радиусом и длиной окружности.

$$\text{Длина окружности} = 2 \times \pi \times r \ \text{ или } \ C = 2\pi r$$

Обычно углы измеряются от 0° (север компаса), проходя по часовой стрелке, минуя точки востока (90°), юга (180°), запада (270°) и возвращаясь к Северу (360° = 0°).

Продолжая двигаться далее, можем столкнуться со случаем, когда веревка проходит 720°; иными словами - совершая два полных оборота вокруг объекта. Когда речь идет о конкретных неизвестных углах, их стоит как-то назвать, и обычно их обозначают греческими буквами α, β или γ.



Прямоугольные треугольники.

Прямоугольными треугольниками называют такие, у которых есть внутренний угол, равный 90°. Тригонометрия использует математические отношения между длинами сторон и другими углами прямоугольных треугольников. Сумма внутренних углов любого треугольника всегда будет равняться 180°.

Для нахождения угла β, назовем три стороны треугольника, как показано на рисунке. В прямоугольном треугольнике всегда будет существовать гипотенуза. В данном треугольнике найдем угол β следующим образом:

$$90° + \alpha + \beta = 180°$$

Итак:

$$\beta = 180° - 90° - \alpha$$

$$\beta = 90° - 15°$$

$$\beta = 75°$$