

Б.А. ГАРФ

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ АЛЬПИНИСТСКОЙ ВЕРЕВКИ



Наиболее характерной чертой, отличающей советский альпинизм от буржуазного спорта, является массовость, общедоступность, стремление обеспечить безопасность любого восхождения. Советский альпинизм должен быть безаварийным и, естественно, что вопросы страховки альпинистов, при продвижении их по сложному рельефу, имеют первостепенное значение.

Экспериментальные работы, проведенные под руководством заслуженного мастера спорта Е.А. Казаковой (см. «Ежегодник», гг. 1948 и 1949), позволили подробно осветить различную методику страховки (через плечо, поясницу, ледоруб, крюк, уступ и т.д.), а также выявили необходимость достаточного проправливания веревки при падении. В этом же направлении проводилась работа заслуженным мастером спорта В.М. Абалаковым. Однако до сих пор остается недостаточно освещенным вопрос о прочности веревки и, в особенности, ее динамической прочности.

В различных пособиях по альпинизму можно встретить указания на то, что альпинистская веревка должна обладать прочностью в 1000-1200 кг при диаметре 1012 мм (см. Черепова — Юхина, Рототаева — Юхина и др.). Однако этого совершенно недостаточно. В практике наших высокогорных лагерей неоднократно бывали случаи, когда льняные или пеньковые альпинистские веревки, дававшие вполне удовлетворительные результаты при предварительных статических испытаниях, в то же время рвались при динамическом рывке. Падение альпинистов со сравнительно незначительной высоты приводило к тяжелым травмам и даже к их гибели.

Совершенно очевидно, что кроме так называемой прочности веревки, т.е. значения разрывающей нагрузки, громадную роль играют и упругие

свойства веревки. Под последними мы понимаем зависимость между усилиями, действующими на веревку, и ее удлинением.

Мы временно оставляем вопрос о протравливании веревки. Практика показывает, что при страховке через уступ, страхующий (если только он не обладает большим опытом и достаточным хладнокровием) обычно, забыв о необходимости протравливания веревки, стремится чисто инстинктивно, судорожным движением, рывком, зажать ее «намертво» на уступе. Последствия этого, как известно, не оправдывают подобных действий. Кинетическая энергия падения при этом рывке поглощается одним лишь удлинением веревки, и возникающее громадное натяжение влечет за собой травму сорвавшегося, либо приводит к разрушению веревки и еще более тяжелой катастрофе.

Вполне понятно, что в рассмотренном нами случае решающую роль играют упругие свойства веревки. Если веревка способна поглотить кинетическую энергию падения, не разорвавшись, то катастрофа может быть предотвращена, и сорвавшийся альпинист отделается в худшем случае незначительным повреждением. При применении же специальных поясов, вместо обычного обвязывания узлом «Булинь» или «петлей проводника», нагрузка распределяется на грудную клетку человека значительно более равномерно, предохраняя его от возможности травмирования.

Таким образом, основной величиной, характеризующей качество альпинистской веревки, является поглощаемая ею энергия при рывке. При статической нагрузке веревки (без рывка) поглощаемая ею работа будет равна:

$$W_{ct} = \int_0^{\lambda_{max}} P d\lambda. \quad [1]$$

Здесь λ — удлинение веревки,

λ_{max} — удлинение веревки при разрыве,

P — усилие в веревке.

Так как зависимость $P = f(\lambda)$ для веревки не является аналитической функцией, то и величина статической работы будет найдена графическим интегрированием кривой $P = f(\lambda)$.

Очевидно, величина удлинения будет пропорциональна свободной длине веревки (до точки закрепления), обозначаемой нами l_0 . Иначе говоря, формула (1) может быть выражена в виде:

$$W_{\text{ст.}} = l_0 \int_0^{\delta_{\max}} P d\delta. \quad [2]$$

Здесь δ — относительное удлинение $= \frac{\lambda}{l_0}$.

При падении некоторого груза G с высоты H , работа, которая должна быть поглощена веревкой, равна

$$W_{\text{дин.}} = G(H + \lambda). \quad [3]$$

Примем в первом приближении, что кинетическая энергия при падении поглощается работой растяжения веревки и что

$$W_{\text{ст.}} = W_{\text{дин.}}$$

$$\text{Отсюда} \quad l_0 \int_0^{\delta} P d\delta = G(H + \lambda) = G(H + l_0 \delta). \quad [4]$$

В предельном случае, при выходе на всю свободную длину веревки по вертикали, высота падения равна удвоенной ее длине, иначе $H = 2l_0$, и тогда формула (4) примет вид:

$$\int_0^{\delta} P d\delta = G(2 + \delta). \quad [5]$$

В этом случае, как видно из формулы (5), усилие в веревке не зависит от высоты падения и является исключительно функцией упругих свойств веревки, т.е. характера зависимости $P = f^{(\delta)}$.

Предположим, что зависимость между P и δ будет линейной:

$$P = k\delta.$$

Тогда, переходя к моменту разрыва, найдем, что:

$$\left| \int_0^{\delta_{\max}} P d\delta = \frac{P_{\max} \delta_{\max}}{2} \right.$$

$$\frac{P_{\max} \delta_{\max}}{2} = G(2 + \delta_{\max}). \quad [6]$$

$$P_{\max} = \frac{4G}{\delta_{\max}} + 2G.$$

Если, например, максимальное относительное удлинение при разрыве $\tau_{\max} = 0,2$ (для веревки из сизаля), получим

$$P_{\max} = 22G.$$

Тогда, при весе альпиниста $G = 80$ кг, веревка должна обладать прочностью

$$P_{\max} = 22 \cdot 80 = 1760 \text{ кг.}$$

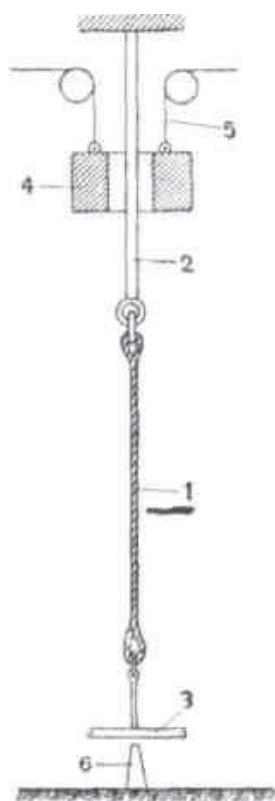
Отсюда ясно, что альпинистская веревка из сизаля, обладающая прочностью не выше 1100-1300 кг, неминуемо порвется при свободном падении охраняемого, без протравливания веревки. В рассмотренном примере картина была нами упрощена, в частности, тем, что зависимость $P = f(\delta)$ принята линейной. В действительности же дело более сложно, так как кривая $P = f(\delta)$ обращена выпуклостью вниз и, следовательно,

$$\int_0^{\delta} P d\delta < \frac{P\delta}{2}.$$

Из рассмотренного ясно, что величина относительного удлинения δ_{\max} имеет решающее значение, так как увеличение δ_{\max} позволяет при той же прочности веревки поглотить значительно большую энергию.

За последнее время в практике воздухоплавания и парашютного дела получили применение веревки из искусственного волокна — нейлона или перлона, обладающие малым весом, высокой прочностью и, что еще более существенно, значительным удлинением. Нейлоновые веревки имеют все основания вытеснить почти полностью пеньковые или льняные веревки в альпинистской практике.

В начале этой работы мы приняли a priori, что анергия деформации веревки при статическом и динамическом ее нагружении изменяется по одному и тому же закону. Обратимся в подтверждение высказанного к данным эксперимента. Так, из сообщений американской печати мы узнаем, что в 1945 г. в США была проведена работа по 'Сравнению динамической прочности альпинистских веревок из сизала и нейлона, употребляемых для горных частей американской армии¹.



1. Схема испытаний веревки на динамическую прочность

Испытанию подвергались две серии образцов:
а) четырехстренговая веревка из сизала диаметром 9/16" (14,287 мм) со свободной длиной 5 футов (1,524 м) и 10 футов (3,048 м); б) трехструнговая веревка из нейлона (сорт № 300), диаметром 7/16" (11,112 мм), со свободной длиной 5 и 10 футов.

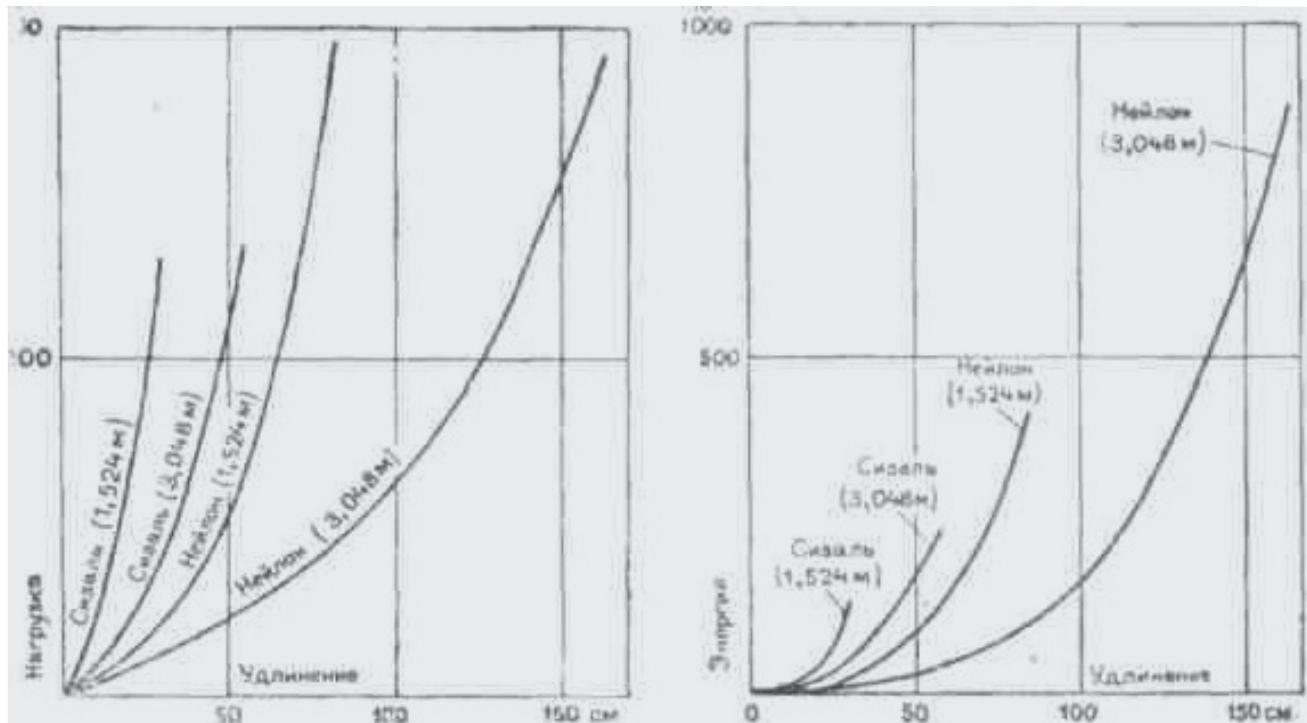
Образцы были предварительно выдержаны в течение 72 часов при температуре $t = 21 \pm 1$ °C и относительной влажности $65 \pm 20/0$.

Статические испытания производились сорокатонной горизонтальной гидравлической машиной, на девятитонной шкале. Скорость деформации 2,5 см/мин. Схема установки для динамических испытаний см. на рис. 1.

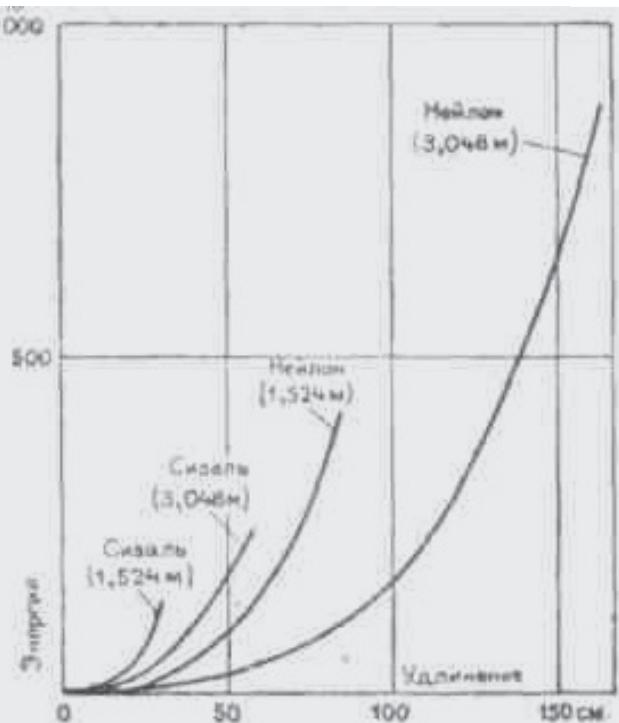
Образцы веревки 1 с двумя стандартными заплетками на концах присоединялись одним концом к направляющему стержню 2, другим — к грузовой платформе 3. Груз 4 удерживался на заданной высоте веревками 5 и, после перерезания последних, падал на грузовую платформу, динамически нагружая веревку.

¹ Journal of Research on the national Bureau of standards volume 35 № 5, 1945 Stanford B. Newman and Helen Wheeler «Impact strength of Nylon and of Seasal Ropes».

Для замера удлинений под грузовой платформой устанавливалась глиняная колонка 6, которая сминалась под ударом.



2. Зависимость между нагрузкой и удлинением веревки.



3. Зависимость между энергией и удлинением веревки.

Естественно, что при динамических испытаниях нельзя было замерить удлинение веревки при полном разрыве последней. В этом случае деформация и энергия определялись при разрыве двух из трех стренг для нейлоновых образцов и трех из четырех стренг для сизалевых образцов.

Уже при беглом сравнении бросается в глаза, что нейлоновая веревка может поглотить работу вдвое большую, чем веревка из сизаля. Прочность нейлоновой веревки, несмотря на ее меньший диаметр, на 40% больше.

На рис. 2 построены кривые $P = f(\lambda)$, полученные в результате статических испытаний (пересчитанные нами на метрические меры).

На рис. 3 нанесены кривые энергий деформаций $W_{ct} = f(\lambda)$ для тех же образцов.

При динамических испытаниях на пятифутовых и десятифутовых образцах высота падения груза принималась равной удвоенной свободной

длине веревки. Как и следовало ожидать, разрушение при статических и динамических испытаниях происходило по заплете.

Эксперимент показал, что максимальное удлинение (при разрушении) примерно одинаково при статическом и динамическом затружении. Это видно из таблицы 1.

Таблица 1

Материал	Номинальная длина (в см)	λ_{\max} статич. (в см)	λ_{\max} динамич. (в см)
Сизаль	152,4	28,9	30,7
	304,8	56,8	52,6
Нейлон	152,4	82,7	75,5
	304,8	167,0	170,0

Произведенные динамические испытания показали, что энергия, поглощаемая веревкой при динамическом нагружении, больше по своей величине, чем энергия деформации при статическом загружении. Это наглядно видно из данных таблицы 2.

Таблица 2

Образец	Максимальная энергия при статическом нагружении до разрушения (кг/м)	Максимальная энергия при динамическом наружении до разрыва всех стренг кроме одной (кг/м)
Сизаль (152,4 см) . . .	130	250
Сизаль (304,8 см) . . .	250	435
Нейлон (152,4 см) . . .	420	605
Нейлон (304,8 см) . . .	880	1 220

Из этой таблицы видно, что динамическая энергия не менее чем на 40% превосходит статическую. Приравнивая статическую и динамическую энергию, мы допускаем ошибку в пользу прочности. Поэтому вполне надежно можно определить динамические характеристики веревки, исходя из данных статических испытаний, а именно, из равенства

$$W_{ct} = G(H + \lambda_{max}).$$

Примем, как и прежде,

$$\begin{aligned} P &= 2l_0 \\ \lambda_{max} &= \delta_{max} l_0. \end{aligned} \tag{7}$$

Введем обозначение «отнесенная работа деформации» $\bar{W}_{ct} = \frac{W_{ct}}{l_0}$,

иначе говоря, работа деформации на единицу длины веревки.

Вставив в формулу (7), получим

$$W_{ct,max} = G(2 + \delta_{max}). \tag{8}$$

По результатам испытаний, средние значения

$$\bar{W}_{ct,max} = 83,5 \text{ (кг/м) / м для сизаля.}$$

$$\bar{W}_{ct,max} = 272 \text{ (кг/м) / м для нейлона.}$$

$$\delta_{max} = 0,19 \text{ для сизаля,}$$

$$\delta_{max} = 0,54 \text{ для нейлона.}$$

Вставляя эти значения в формулу (8), сможем определить максимальное значение груза G , который может выдержать веревка при свободном падении его с высоты равной двойной свободной длине:

$$G_{max} = 38 \text{ кг для сизаля,}$$

$$G_{max} = 107 \text{ кг для нейлона.}$$

Отсюда можем сделать вывод, что нейлоновая веревка выдерживает без разрушения динамический рывок при свободном падении альпиниста с любой высоты, даже при жестком закреплении конца веревки без протравливания. Сизалевая веревка при этом неизбежно разорвется.

Сравнение весовых качеств сизалевой и нейлоновой веревок, также убеждает в неоспоримом преимуществе последней.

Принимая приведенные выше диаметры (14,287 мм для сизаля и 11,112 мм для нейлона), получим погонный вес:

сизалевой веревки — $g = 122 \text{ г/м}$,

нейлоновой веревки — $g = 60 \text{ г/м}$.

Преимущественно в весе более чем в два раза. При обычной длине веревки в 30 м это дает экономию в весе до 1,86 кг.

Другое, не менее важное преимущество нейлона — почти абсолютная его иепромокаемость, сохранение своего веса даже в условиях дождя или снегопада. Нейлон хорошо противостоит изменению температуры в пределах +50 — 50 °C, не подвержен гниению.

ВЫВОДЫ

Основной оценкой качества альпинистской веревки служит не максимальная (разрушающая) нагрузка, а способность поглощения энергии.

При динамическом нагружении верёвки максимальная поглощенная энергия во всех случаях больше, чем максимальная энергия деформации той же веревки при статическом загружении.

Нейлоновая веревка благодаря высокой прочности и удлинению способна поглотить вдвое большую энергию, чем веревка из сизала. Свободное падение альпиниста при жестко закрепленной веревке может выдержать только веревка из нейлона. Остальные типы веревок такой нагрузки не выдерживают.

Все сказанное нами о прочности веревок из нейлона не должно привести к выводам о том, что их применение исключает необходимость правильной организации страховки, как это показано в опубликованных в двух выпусках нашего «ежегодника» работах Е.А. Казаковой.

Никак нельзя закреплять наглухо веревку, даже изготовленную из нейлона, обладающую, как сказано выше, исключительным удлинением. При сильном динамическом рывке нейлоновая веревка может остаться неповрежденной, но сила самого рывка будет такова, что он приведет к болезненным травмам альпиниста. Правильное протравливание веревки необходимо независимо от материала, из которого она изготовлена.

Исключительные механические и эксплуатационные качества нейлоновой веревки говорят о необходимости срочного внедрения ее в практику альпинистских лагерей и спортивных групп. Производство веревок из нейлона может быть без особых трудностей освоено советскими фабриками.