

А. М. ШОЛОМОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СТОЕК, ПОДКРЕПЛЕННЫХ ШПРЕНГЕЛЯМИ

Одним из способов повышения критической силы сжатого стержня с большой гибкостью является подкрепление его шпренгелями. Простейшие схемы такого стержня с подкреплением показаны на рисунке 1. В статье автора [3] изложены основы теории расчета на устойчивость стержней (стоек), сжатых осевыми силами и подкрепленных шпренгелями. В той же статье описана методика экспериментального исследования устойчивости таких стоек и методика замеров усилий и деформаций.

В настоящей статье приводятся некоторые результаты дальнейших исследований, целью которых являлось экспериментальное изучение влияния шпренгелей на повышение критической силы сжатых стоек с большой гибкостью.

Шпренгели в нашем случае представляют собой ряд параллельно расставленных поперечных распорок (на рис. 1 б — 1—0—1, 2—0—2, 3—0—3, 4—0—4 и 5—0—5) и тяги, образующих пояса. Распорки соединены со стойкой (АВ на рис. 1) жестко или шарнирно.

Тяги могут быть двух типов:

а) тяги-струны, то есть пояса шпренгелей, выполненные из гибкой проволоки или тросов, шарнирно прикрепленных к концам стойки.

Существенной особенностью таких тяг является то, что они не скреплены с концами распорок, ввиду чего точки касания струны к ним меняются при деформации стойки. На концах распорок могут быть поставлены ролики, чтобы уменьшить трение при проскальзывании тяг.

б) Тяги-звенья, то есть пояса шпренгелей, составленные из отдельных звеньев (гибких или жестких), шарнирно связанных с концами распорок и со стойкой.

Стойку, подкрепленную шпренгелями, будем для краткости называть системой. Отрезки стойки между двумя соседними распорками или между крайней распоркой и опорой будем называть пагелями. Величина критической силы рассматриваемой нами системы находится в тесной связи с конструкцией шпренгелей. В первую очередь особое влияние оказывает степень статической неопределимости этой конструкции.

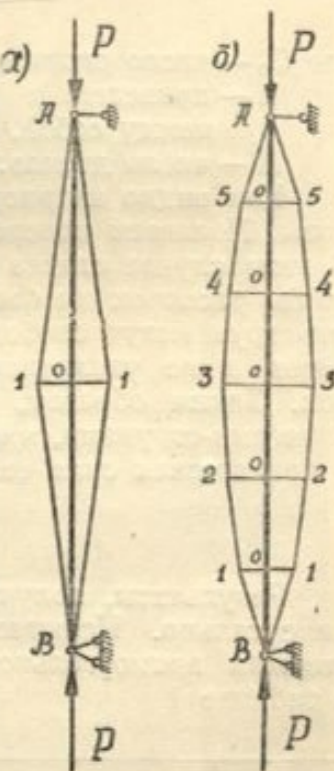


Рис. 1.

Так, например, теоретические исследования показали, что если число связей, которые налагаются на стойку шпренгелями, $n = 1$, то

$$P_{кр} = P_{n+1} = \frac{4\pi^2 EJ}{l^2} = 4P_0, \quad (1)$$

$$\text{а при } n = 2 \quad P_{кр} = P_{n+1} = \frac{9\pi^2 EJ}{l^2} = 9P_0,$$

где $P_{кр}$ — критическая сила системы,

P_{n+1} — порядок критической силы при n связях,

P_0 — критическая сила стойки без подкреплений (Эйлера сила).

Дальнейшие экспериментальные исследования показали, что увеличение числа связей n влечет за собой повышение критической силы системы.

Если пояса шпренгелей представляют собой тяги-струны, то увеличение числа распорок не увеличивает степени статической неопределимости системы, а следовательно, и ее критической силы. Поясним эту мысль примером. Число лишних неизвестных системы подсчитывается по формуле

$$L = C_0 + 2Ш - 3Д, \quad (2)$$

где C_0 — число опорных стержней,

Ш — приведенное число простых шарниров, связывающих диски между собой,

Д — число дисков.

Как видно из рисунка 1, для обеих схем величины C_0 и Ш одинаковы. Полагаем поперечные распорки жестко скрепленными со стойкой. В этом случае стойка вместе с распорками образует один диск, сколько бы распорок ни было прикреплено к ней. Пояса шпренгелей в виде тяг-струн могут свободно (без учета трения) скользить по концам распорок и не увеличивают числа шарниров с увеличением числа распорок. Таким образом, сколько бы панелей ни образовали шпренгели с тягами-струнами, число лишних неизвестных системы не увеличится, и критическая сила ее определится формулой

$$P_{кр} \leq \frac{4\pi^2 EJ}{l^2}. \quad (3)$$

Результаты, получаемые по формуле (3), были подтверждены экспериментально. Испытанию были подвергнуты дуралевые и стальные стержни прямоугольного сечения. Некоторые данные о них приведены в таблице 1.

Таблица 1

№ стойки	Размеры в мм			Материал	Гибкость λ	P_0 кг	Тяги	
	l	h	b				материал	размеры в мм
11	1000	30	2	Дураль	1730	1,38	Сталь	Ø 0,8
12	996	30	3	»»»	1150	4,68	»»»	Ø 0,8
2	997	56	5,7	Сталь	606	172	»»»	Ø 2
6	986	57	6,65	»»»	603	174,4	»»»	Ø 2
3	997	56	5,73	»»»	601	174,0	»»»	Ø 2

Натяжение тяг производилось тандерами. Для дуралевых стоек ввиду большой их гибкости натяжение тяг было слабым, чтобы избежать начального искривления стоек. Для многопанельных стоек было принято параболическое очертание пояса шпренгелей. Результаты испытаний дуралевых стоек приведены в таблице 2. Расхождение в величине коэффициента устойчивости η для различных схем незначительно, что

полностью подтверждает формулу (3). То, что по абсолютной величине $\eta < 4$, объясняется громадной гибкостью стержней и невозможностью дать тягам сколько-нибудь заметное предварительное натяжение без искривления стойки. Это объяснение подтверждается результатами испытания стальных стоек с меньшей гибкостью (табл. 3).

Таблица 2

Схема по рис.	$\eta = \frac{P_{кр}}{P_э}$ при	
	$b = 3$	$b = 2$
2	2,79	2,79
3	3,36	—
4	3,06	3,13
5	3,36	3,56
6	3,36	3,07
7	3,36	3,19
8	3,36	3,36

Таблица 3

№ стойки	Число панелей	$\eta = \frac{P_{кр}}{P_э}$
2	3	4,12
6	3	3,97
3	2	3,97

На рисунках 2, 3, 4, 5, 6, 7 и 8 показана стойка № 12 с различными схемами шпренгелей в момент потери устойчивости.

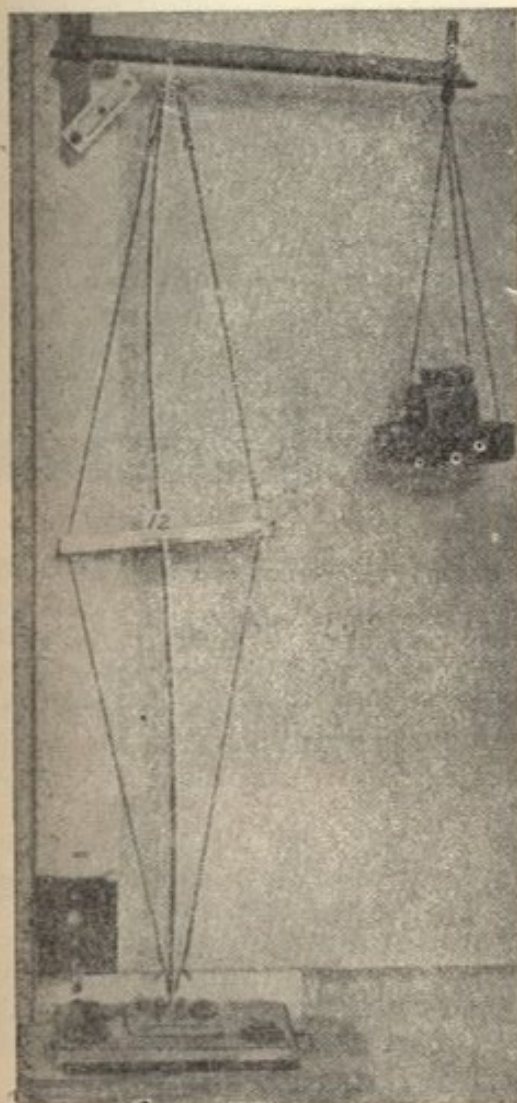


Рис. 2.

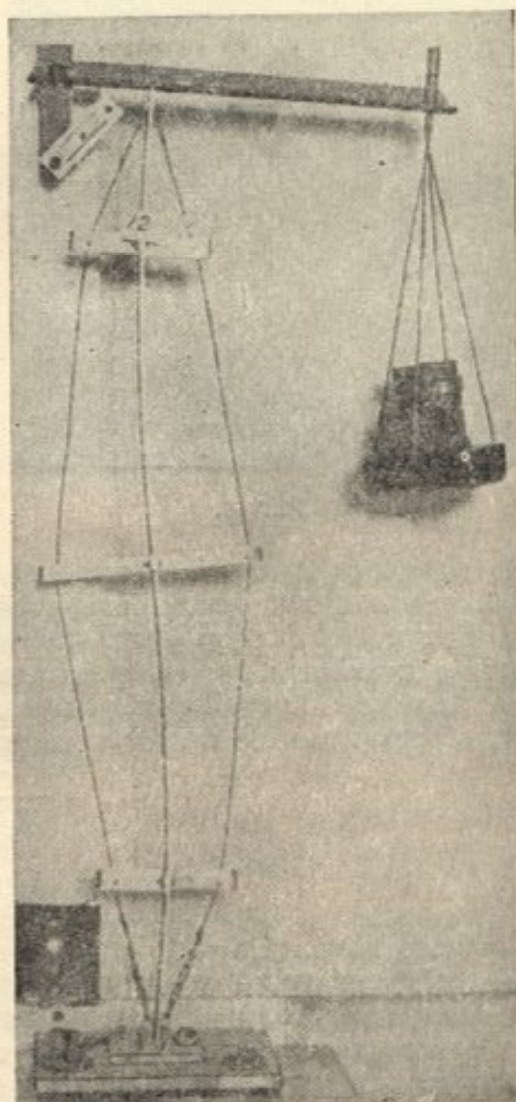


Рис. 3.

Изменение величины предварительного натяжения тяг, размеров и очертаний пояса шпренгелей, жесткости тяг, а также изменение дру-

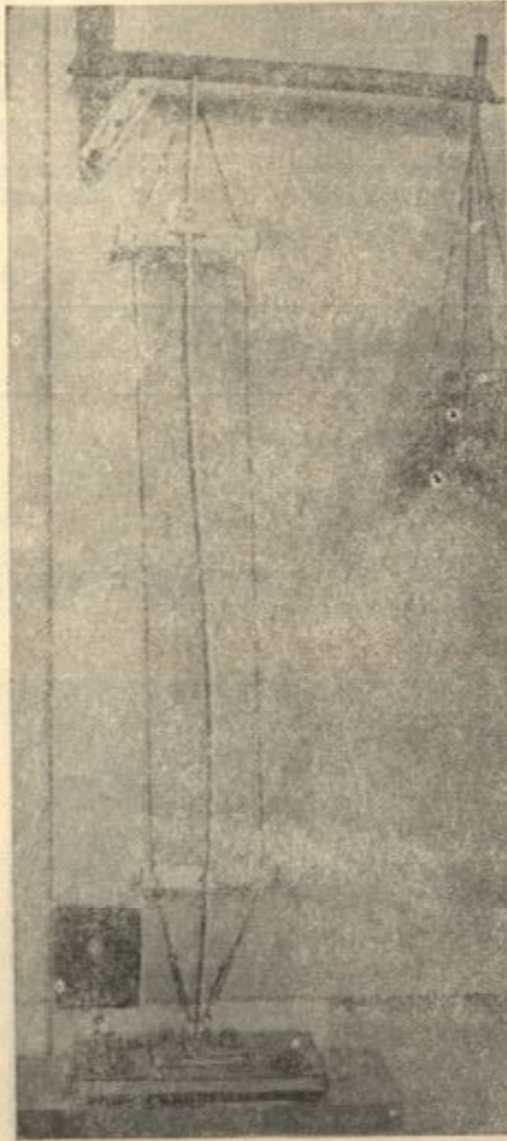


Рис. 4.

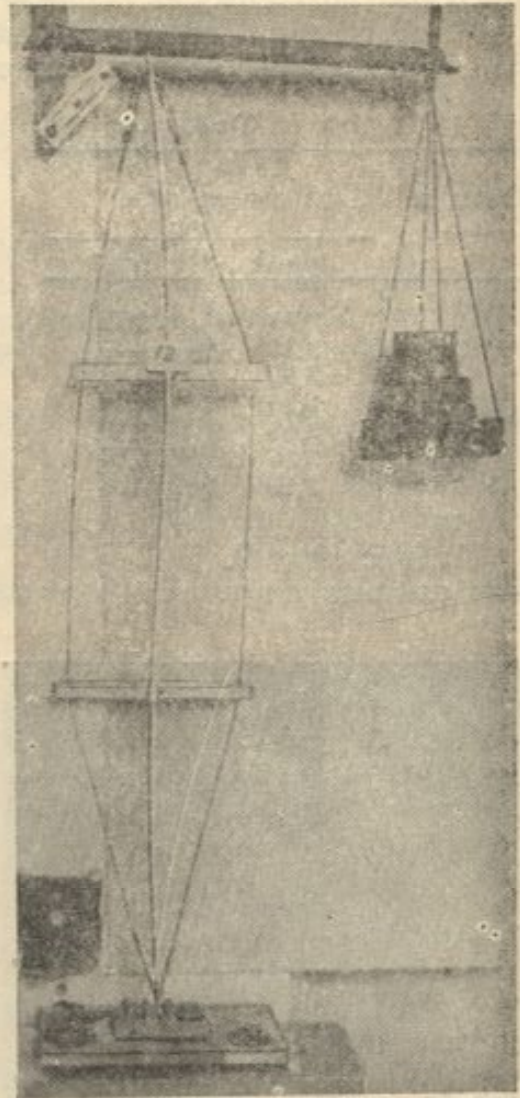


Рис. 5.

гих факторов при тягах-струнах не может привести к существенному увеличению критической силы стойки.

Критерии для резкого повышения несущей способности сжатой стойки, подкрепленной шпренгелями, могут быть найдены из рассмотрения формулы критической силы многоопорного стержня для случая, когда расчет можно вести по длине одной панели.

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 EJ}{\left(\mu \frac{l}{n}\right)^2} = \eta P_э, \quad (4)$$

$$\text{где } \eta = \frac{n^2}{\mu^2} = \frac{P_{кр}}{P_э}, \quad (5)$$

n — число панелей,

μ — коэффициент приведенной длины.

Как известно, $\mu = 1$ для шарнирно опертых концов стержня, $\mu = 0,7$ для одного защемленного и другого шарнирно опертого конца и $\mu = 0,5$ для обоих защемленных концов.

Чтобы предельно повысить несущую способность стойки большой гибкости одинакового сечения, подкрепленной шпренгелями, надо сконструировать их таким образом, чтобы расчет на устойчивость всей системы мог вестись по длине одной панели и чтобы коэффициент μ в

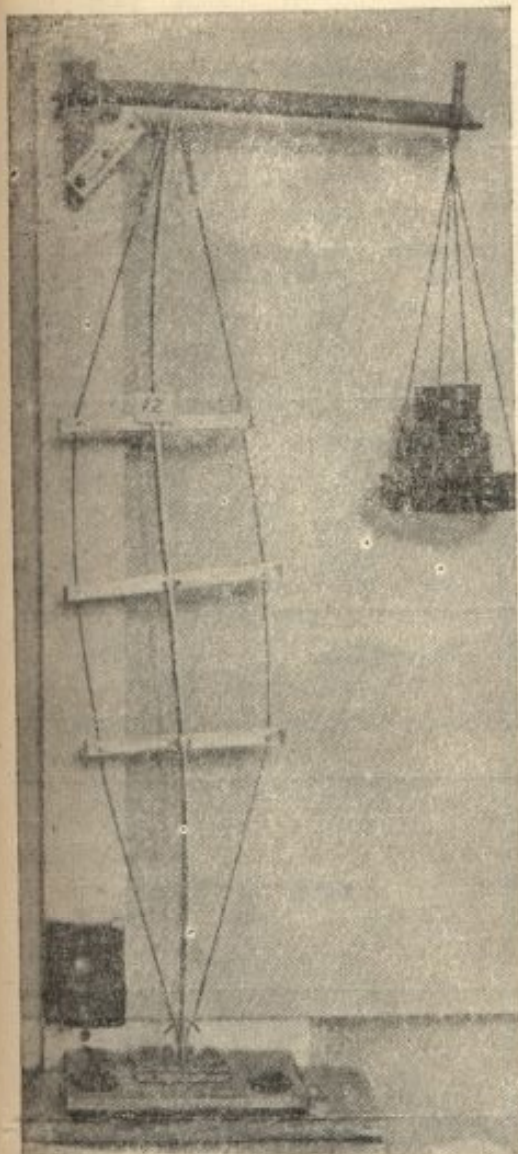


Рис. 6.

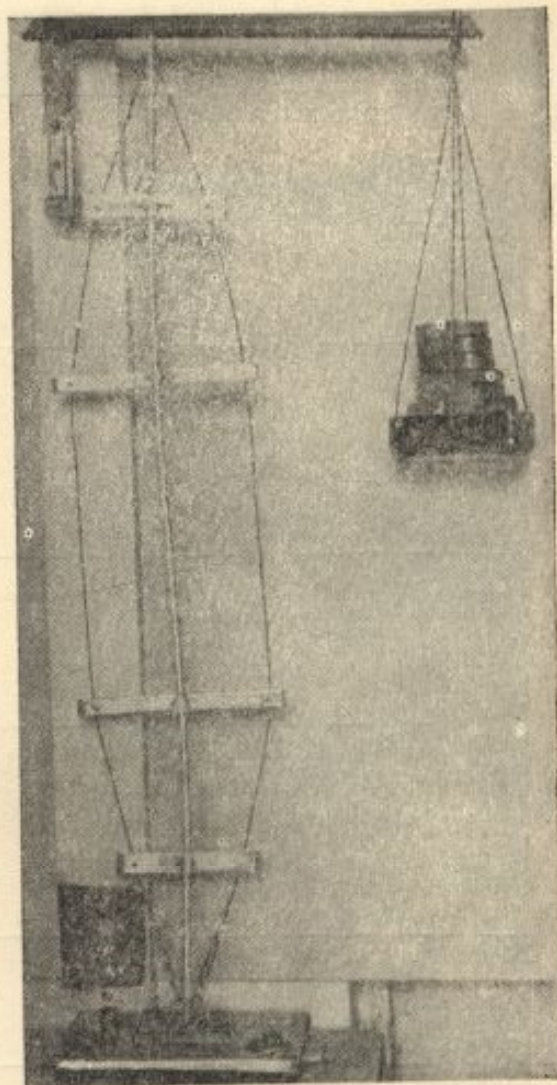


Рис. 7.

данных условиях был наименьшим. Оптимальной является такая конструкция шпренгелей, которая препятствует не только смещению, но и повороту стойки в узловых точках. Эти положения подтверждаются серией опытов, проведенных со стойками большой гибкости и различными схемами шпренгелей. В отличие от предыдущих испытаний, тяги были устроены в виде отдельных зеев, шарнирно связанных с концами распорок.

Рассмотрим на примере стойки, подкрепленной шестипанельным шпренгелем (рис. 1 б), как изменяется степень статической неопределенности системы с изменением устройства тяг.

Так как пояса шпренгелей выполняются из гибкой проволоки, то они работают только на растяжение, то есть при выпучивании стойки по одной полуволне работает лишь один пояс. Для такой системы с односторонним шпренгелем подсчитаем число лишних неизвестных по формуле (2).

При шарнирном опирании концов $C_0 = 3$, для тяг-струн — $Ш = 2$ и $Д = 2$; для тяг зеев — $Ш = 12$ и $Д = 7$.

В первом случае $Л = 3 + 2 \cdot 2 - 3 \cdot 2 = 1$,

во втором случае $Л = 3 + 2 \cdot 12 - 3 \cdot 7 = 6$.

В таблице 4 приведены результаты части испытаний.

Таблица 4

№ п/п	Тип схемы	Наибольшая теоретически возможная величина η при		Стержень		Тяги		Крепление распорки со стойкой	Крепление звеньев тяг со стойкой	Полученное $\eta = \frac{P_{\text{д.р.}}}{P_2}$
		$\mu = 1$	$\mu = 0,7$	Материал	Гибкость λ	Материал	Размеры в мм			
1		4	8,16	Сталь	600	Сталь	Ø2,2	Жесткое	Шарнирное	6,46
2		9	18,4	Дураль	1150	Алюминий	10 × 1,5	»	»	5,27 8,94
4		16	32,7	»	1730	»	10 × 2 10 × 2	Шарнирное Жесткое	Шарнирное Жесткое	3,22 18,5
5		36	73,5	Дерево » Дураль	1120 865 1250 1150	Медь Сталь Алюминий	Ø0,8 Ø2,2 15 × 1,0 10 × 1,5	Полужесткое жесткое » »	» » » »	25,0 32,6 32,8 28,4

Как видно из проведенных испытаний, увеличение степени статической неопределимости системы за счет замены тяг-струн тягами-звеньями решающим образом влияет на увеличение критической силы стойки, однако рассмотренные схемы не позволили добиться значения η большего, чем при $\mu = 1$. Превышение этой величины в записи 5 объясняется значительным трением в шарнирах, что для других схем не допускалось. Рассмотренные схемы при неточной сборке не в состоянии воспрепятствовать повороту поперечных распорок, ввиду чего изгиб стоек для всех схем происходил по двум, часто несимметричным, полуволнам. Стремление «подкрепить» стойку на длине каждой полуволны и превратить поперечные распорки в заделки привело нас к конструкции шпренгелей, показанных на рисунках 9 и 10. Крайние распорки расчленины звеньями тяг. Средние распорки (рис. 9) служат только для шарнирного закрепления средних наклонных звеньев.

В таблице 5 приведены результаты испытания систем такой конструкции:

Результаты испытаний стоек 68, 68а и 68б показывают, что тяги, устроенные из отдельных звеньев, дают наилучший результат. Сравнение результатов испытания стоек 73 и 69б показывает, что полужесткое крепление звеньев тяг со стойкой резко повышает критическую силу системы. Такое же влияние оказывает увеличение жесткости самих звеньев (испытания стоек 66б и 69б).

Однако подкрепление стойки шпренгелями, содержащими сравнительно жесткие звенья тяг, превращает конструкцию в комбинированную систему. Практи-

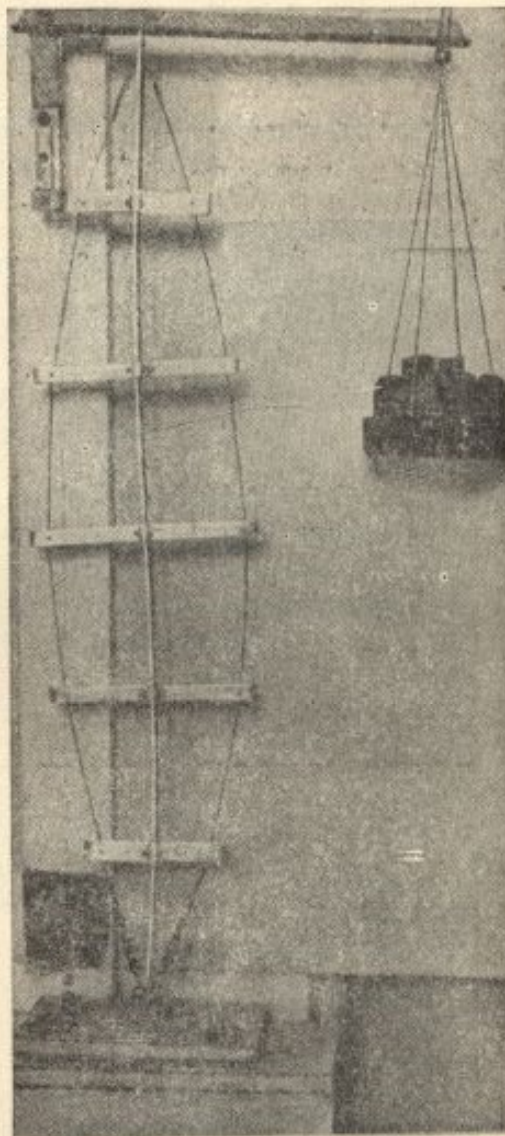


Рис. 8.

Таблица 5

Обозначение стойки	Гибкость стойки	Тяги		Крепление звеньев со стойкой	Изменения, внесенные в предыдущее устройство	Полученное $\eta = \frac{P_{кр}}{P_0}$
		Материал	Размеры в мм			
68	1150	Сталь	∅ 1,0	Шарнирное		21,4
»	»	»	»	»	Крайние звенья тяг заменены на ∅ 1,5	
68а	»	»	»	»	Наклонные звенья тяг заменены струнами на длине половины стойки	22,2
68б	»	»	»	»	Боковые звенья тяг разделены пополам и шарнирно соединены не только с крайними, но и со средними распорками	11,8 14,4

(Продолжение табл. 5)

Обозначение стойки	Гибкость стойки	Тяги		Крепление звеньев со стойкой	Изменения, внесенные в предыдущее устройство	Полученное $\gamma = \frac{P_{кр}}{P_2}$
		Материал	Размеры в мм			
73	1730	Алюминий	10×2	Шарнирное		32,4
666	»	»	10×1,5	Полужесткое		48,0
696	»	»	10×2	»		70,0
75	1150	Сталь	∅1,0	Шарнирное	Шпренгели по схеме (рис. 9), но шестипанельные	37,0

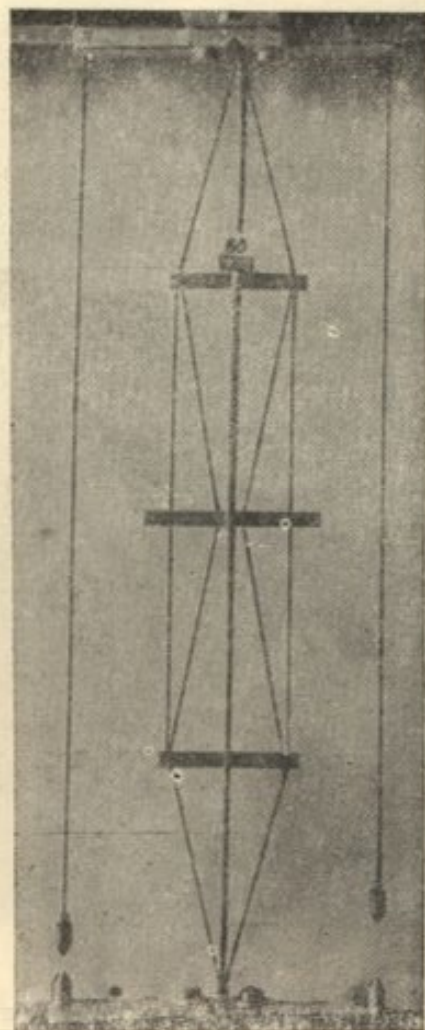


Рис. 9.

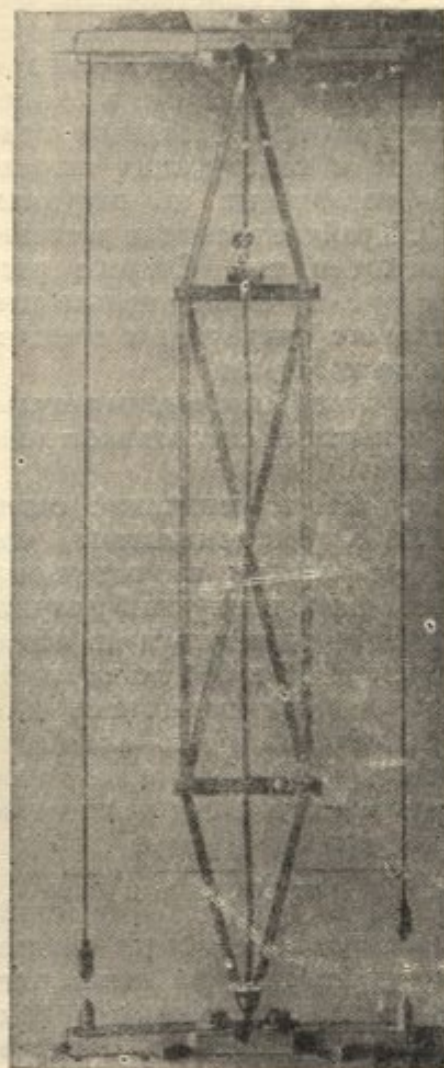


Рис. 10.

чески наибольший интерес представляют шпренгели, содержащие легкие проволочные тяги, звенья которых работают только на растяжение. Некоторое представление об экономии веса материала, расходуемого на стойку, подкрепленную шпренгелями, дает таблица 6.

Стойка по рисунку	Вес стойки в г			Экономия материала в % $\frac{G_2 - G_1}{G_2} 100$
	без шпренгелей G_2 г	с шпренгелями G_1 г	равноустойчивой, но без шпренгелей G_2 г	
9	240	360	665	46
10	160	380	677	44

ВЫВОДЫ

1. Известные в литературе и в практике подкрепления стоек шпренгелями содержат в качестве поясов гибкую проволоку или тросы, не скрепленные с поперечными распорками. Такие тяги-струны при любом числе панелей не могут обеспечить повышение критической силы системы более четырехкратного, то есть

$$\eta = \frac{P_{кр}}{P_0} \leq 4.$$

2. Пояса шпренгелей, состоящие из такой же гибкой проволоки или тросов, но скрепленных шарнирно с распорками, то есть тяги, состоящие из отдельных звеньев, обеспечивают резкое увеличение критической силы системы. При четырехпанельном шпренгеле в испытанных конструкциях достигнуто значение $\eta = 20-22$, при шестипанельном шпренгеле $\eta = 35-37$.

3. Наиболее эффективной является конструкция шпренгелей, у которой распорки жестко скреплены со стойкой, а тяги состоят из отдельных звеньев, шарнирно связанных со стойкой и с концами распорок, что позволяет увеличить степень статической неопределимости системы.

При этом оптимальным является такое устройство шпренгелей, когда каждая распорка расчленина двумя наклонными звеньями, шарнирно связанными со стойкой и с распорками, а концы последних также связаны между собой отдельными звеньями (рис. 9 и 10).

4. Наружные очертания поясов шпренгелей и длина распорок существенного влияния на величину критической силы не оказывают.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корноухов И. В. Прочность и устойчивость стержневых систем. Стройиздат, 1949, стр. 178—179.
2. Нудельман Я. Л. Новый способ повышения устойчивости стержней. Инженерный сб. АН СССР, т. 1, вып. 1, 1941.
3. Шоломов А. М. Устойчивость стоек, подкрепленных шпренгелями. Труды Харьковского авиационного ин-та, вып. 16, 1955.