

ЗАМѢТКА О БОЛТОВОМЪ НАПРЯЖЕННОМЪ СОЕДИНЕНІИ.

И. И. Бобарыкова.

(съ 2 табл.)

Если при сборкѣ соединенія болтъ устанавливается съ предварительною затяжкой, то оно называется напряженнымъ. Поперечный размѣръ болта обычно находится на основаніи слѣдующихъ соображеній. Пусть болтъ съ прямоугольной рѣзбой, имѣющей внѣшній и внутренній діаметръ соответственно d и d_1 подвергается дѣйствию продольной растягивающей силы P . Послѣдняя распредѣляется равномерно на поверхности соприкасанія рѣзбъ гайки и болта. Для удобства можно представить себѣ, что эта сила равномерно распредѣлена по средней винтовой линіи, діаметръ которой $d_0 = \frac{d_1 + d}{2}$, а уголъ подъема $\angle \alpha$ *). Въ періодъ затягиванія внѣшній моментъ преодолеваетъ сопротивленія: перемѣщенія точки приложенія силы P , тренія на рѣзбѣ и тренія на нижней торцевой поверхности гайки. Называя діаметръ круга, вписаннаго въ шестиугольникъ, черезъ D , коэффициенты тренія на рѣзбѣ и на торцевой поверхности гайки черезъ f и f_1 находимъ для момента наибольшее значеніе:

$$M = \frac{Pd_0}{2}(\operatorname{tg} \alpha + f) + \frac{Pd_0 D^3 - d_0^3}{3 D^2 - d_0^2} f_1 \quad (1)$$

Если взять международную шкалу нарѣзки (Табл. А)**), то замѣчаемъ, что въ предѣлахъ наиболѣе ходовыхъ размѣровъ болтовъ отъ $\frac{3}{4}$ " до 2" (приблизительно $d = 20-52$ *m/m*) можно принять въ среднемъ: $d : d_1 = 1.2$, $d : d_0 = 1.1$. Кромѣ того, принимая: $D = d \sqrt{3}$ и $f = f_1$, найдемъ:

$$M = (0.5 \operatorname{tg} \alpha + 1.19 f) Pd_0 \quad (2)$$

*) Сдѣланное допущеніе не даетъ замѣтной погрѣшности; при равномерно—распредѣленномъ давленіи на поверхности соприкасанія нарѣзокъ равнодѣйствующая по линіи фактически будетъ дальше отъ оси, а именно на цилиндрѣ, радіусъ котораго

$$x = \frac{d_0}{2} + \frac{d^2 - d_0 d_1}{6 d_0}$$

Полагая въ среднемъ $d = 1.1 d_0$ и $d_0 = 1.1 d_1$ имѣемъ

$$x = 0.505 d_0.$$

**) см. въ концѣ.

Изъ двухъ членовъ правой части второй имѣетъ гораздо большее вліяніе на величину M , какъ видно изъ Таблицы I.

Т а б л и ц а I.

Значеніе M .

$d \backslash f$	0.1	0.4
6 m/m	$0,1505 Pd_0$	$0,5075 Pd_0$
80 m/m	$0,1350 Pd_0$	$0,4930 Pd_0$

Примемъ какъ среднее значеніе $f = 0.2$, тогда изъ (2) имѣемъ:

$$M_{d=20 \text{ } m/m} = 0,253 Pd_0, \quad M_{d=52 \text{ } m/m} = 0,260 Pd_0 \text{ и въ среднемъ} \\ M = 0,256 Pd_0 \dots \dots \dots (3)$$

Переходя къ болту съ треугольной рѣзью принимаютъ въ выраженіи (2) вмѣсто f величину $f' = f : \cos \beta$, гдѣ β половина угла при вершинѣ производящаго тре-ука.

Слѣдовательно въ международной системѣ будемъ имѣть въ среднемъ для тѣхъ же предѣловъ:

$$M = 0,30 Pd_0 \dots \dots \dots (4)$$

Часть этой величины, а именно, $M_1 = 0.5 (\operatorname{tg} \alpha + f')$ скручиваетъ болтъ, вызывая въ немъ касательныя напряженія. Среднее значеніе M_1 для болтовъ въ предѣлахъ $d = 20 - 52 \text{ } m/m$ будетъ:

$$M_1 = 0,135 Pd_0 \dots \dots \dots (5)$$

Такимъ образомъ тѣло болта подвергается сложному сопротивленію; растягивающая результирующая сила R будетъ

$$R = 1.35 P \dots \dots \dots (6)$$

т. е. благодаря затяжкѣ напряженіе матерьяла повышается на 35%, что и принимается во вниманіе при нахожденіи прочныхъ размѣровъ болта по заданной силѣ P .

Условія, въ которыхъ болтъ находится при напряженныхъ соединеніяхъ, не совсѣмъ таковы, какъ это предположено въ приведенномъ способѣ разчета.

Обычно болтовое соединеніе, предназначенное для сопротивленія заданной силѣ Q , собирается въ то время, когда сила Q еще не дѣй-

ствуесть. При завинчиваніи гайки моментомъ M производится предварительная вытяжка силою P , которая является какъ результатъ сжатія болтомъ соединяемыхъ между собою частей. Эта сила P , носящая названіе начальной затяжки совмѣстно съ крутящимъ моментомъ M_1 вызываетъ въ матеріалѣ болта нормальныя и касательныя напряжения. Если теперь къ болту приложить силу Q , то, вслѣдствіе дополнительной вытяжки его, уменьшается напряженіе въ стягиваемыхъ болтомъ частяхъ; первоначальная затяжка падаетъ и болтъ начинаетъ растягиваться нѣкоторой силою P_1 средней между Q и $P + Q$. Легко видѣть, что значеніе этой силы зависитъ, какъ отъ начальной затяжки P , такъ и отъ упругихъ свойствъ матеріаловъ болта и соединяемыхъ имъ частей.

Пусть болтъ съ наружнымъ діаметромъ d (фиг. 1) затягиваетъ силою P (начальная затяжка) полую призму A , находящуюся между головкою C и гайкою B ; высота призмы h . Назовемъ поперечное сѣченіе болта и призмы черезъ ω и Ω , модули упругости ихъ черезъ E и E_1 . Призма сжата, очевидно, силою P ; если теперь къ болту на оси его приложимъ двѣ силы Q и Q_1 , то сила растягивающая болтъ будетъ $P_1 > P$, а сила сжимающая призму $T < P_1$, причемъ всегда будетъ существовать зависимость:

$$Q + T = P_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

Абсолютное удлиненіе стержня болта на длинѣ h назовемъ черезъ λ . Дополнительная вытяжка его λ' пропорціональна приращенію растягивающей силы т. е. разности $P_1 - P$. Уменьшеніе деформации призмы λ'' , очевидно, равно:

$$\lambda'' = \lambda - \lambda' \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

На основаніи принятыхъ обозначеній можно написать вмѣсто (8)

$$\frac{T}{E_1 \Omega} = \frac{P}{E_1 \Omega} - \frac{P_1 - P}{\omega E} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

Изъ (7) и (9) имѣемъ

$$P_1 = P + \frac{E \omega}{E \omega + E_1 \Omega} Q = P + b Q \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

$$T = P - \frac{E_1 \Omega}{E \omega + E_1 \Omega} Q = P - (1 - b) Q \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

Зависимость (10) имѣетъ мѣсто до тѣхъ поръ, пока значеніе Q не превосходитъ предѣла

$$Q < \frac{P}{1-b} \dots \dots \dots (12)$$

Такимъ образомъ нормальное напряженіе k_z въ затянутомъ болтѣ подѣйствию растягивающей силы Q получится меньшимъ, нежели отъ суммы силъ $P + Q$, но можетъ быть большимъ, чѣмъ отъ силы $1,35 Q$. Результирующее напряженіе k найдется сложениемъ напряженій k_z и касательного k_s опредѣляемаго по скручивающему моменту M_1 (ур—іе 5), т. е., относя искомое напряженіе къ наименьшему сѣченію $\omega_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$ будемъ имѣть:

$$k = 0,35 \frac{P_1}{\omega_1} + 0,65 \sqrt{\left(\frac{P_1}{\omega_1}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{0,135 \cdot P d_0}{\frac{\pi d_1^3}{16}}\right)^2}$$

Откуда результирующая растягивающая сила R :

$$R = \omega_1 k = 0,35 (P + Qb) + 0,65 \sqrt{(P + Qb)^2 + 1,4 P^2} \dots \dots (13)$$

Ур—іе (13) учитываетъ всѣ обстоятельства какъ то, затяжку P , размѣры соединенныхъ частей, упругія ихъ свойства, но оно, къ сожалѣнію, не можетъ имѣть непосредственнаго практическаго значенія, такъ какъ величина начальной затяжки неизвѣстна. Если положить, что длина гаечнаго ключа равна 15 діаметрамъ, то, называя черезъ S силу руки рабочаго, будемъ имѣть:

$$15 d \cdot S = 0,30 P d_0 \dots \dots \dots (14)$$

Принимая $S = 20 - 40 \text{ klg}$ найдемъ

$$P = 1100 - 2000 \text{ klg.}$$

Назовемъ отношеніе $E_1 : E$ и $\Omega : \omega$ черезъ

$$\xi = E_1 : E \text{ и } \eta = \Omega : \omega$$

тогда будемъ имѣть

$$b = \frac{1}{1 + \eta \xi} \dots \dots \dots (15)$$

Придавая η и ξ различныя значенія, напримѣръ:

$$\begin{aligned} \xi &= 2 - 1 - 0,5 - 0,1 - 0,05 \\ \eta &= 1 - 3 - 5 - 10 - 20 \end{aligned}$$

найдемъ для коэффициента b такія величины (Табл. II):

Т а б л и ц а II.

$\eta \backslash \xi$	2	1	0,5	0,1	0,005
1	0,330	0,500	0,667	0,910	0,953
3	0,143	0,250	0,400	0,770	0,870
5	0,091	0,167	0,280	0,667	0,800
10	0,048	0,091	0,167	0,500	0,667
20	0,024	0,048	0,091	0,330	0,500

Для наглядности на фиг. 2 таблица эта представлена кривыми построенными для b при изменении коэффициента $\xi = E_1 : E$. Такъ какъ выраженія (10) и (11) справедливы для такихъ значеній силы Q , которыя удовлетворяютъ условію (12), то интересно посмотрѣть, какъ изменяется предѣлъ для силы Q въ различныхъ комбинаціяхъ коэф. η и ξ . На фиг. 3 построены кривыя значенія Q при значеніяхъ b , взятыхъ изъ таблицы II. За единицу принята величина начальной затяжки. P .

Разсмотрѣніе кривыхъ на фиг. 2 приводитъ къ заключенію, что вліяніе дополнительной нагрузки тѣмъ слабѣе, чѣмъ больше величина ξ . Кроме того это вліяніе тѣмъ замѣтнѣе, чѣмъ меньше отношеніе $\eta = Q : \omega$. Слѣдовательно, напр., при одномъ и томъ же значеніи коэф. η желѣзный болтъ, стягивающій деревянныя части ($\xi \approx 0,05$), находится въ условіяхъ менѣе благоприятныхъ, нежели болтъ изъ желтой мѣди ($\xi \approx 0,1$).

На фигурѣ 3 представлены кривыя, указывающія зависимость между предѣльнымъ значеніемъ силы Q (по ур—нію 12) и коэф. η и ξ . Ординаты даютъ величины Q , абсциссы значенія η . Изъ фиг. 3 видно, что вліяніе отношенія между P и Q тѣмъ значительнѣе, чѣмъ меньше ξ и η . А потому значеніе это является болѣе существеннымъ при малыхъ модуляхъ упругости соединяемыхъ частей и при маломъ поперечномъ сѣченіи ихъ.

Напр. пусть дано: желѣзный болтъ имѣетъ внутренній диаметръ $d_1 = 16 \text{ m/m}$, $F = 1000 \text{ klg}$, $Q = 1000 \text{ klg}$.

Возьмемъ четыре случая:

$$1) \xi = 0,05 \quad \eta = 3 \quad b = 0,87.$$

$$2) \xi = 0,05 \quad \eta = 20 \quad b = 0,50$$

$$3) \xi = 1 \quad \eta = 3 \quad b = 0,25.$$

$$4) \xi = 1 \quad \eta = 20 \quad b = 0,0475.$$

По ур—ю (13) найдемъ:

$$1) R = 2100 \text{ klg.}, k = 10,4 \text{ klg/mm}^2$$

$$2) R = 1770 \text{ klg.}, k = 8,8 \text{ klg/mm}^2$$

$$3) R = 1560 \text{ klg.}, k = 7,75 \text{ klg/mm}^2$$

$$4) R = 1400 \text{ klg.}, k = 6,95 \text{ klg/mm}^2$$

Чтобы проверить насколько выражение (10), полученное на основании теоретическихъ соображеній, даетъ результаты, совпадающіе съ дѣйствительностью мною были слѣланы въ Механической Лабораторіи И-та опыты съ растяженіемъ напряженнаго затяжного болта, примѣнительно къ схемѣ по фиг. 1.

Измѣдованію подвергались шесть цилиндрическихъ стержней съ нарѣзанными треугольною рѣзью концами.

Размѣры стержней слѣдующіе, Таблица III.

Т а б л и ц а III.

№№	Матеріаль.	Диаметръ.		Д л и н а	
		Внѣшн. d	Внутрен. d_1	Полная	Свободн.
1	жельзо .	24 m/m	20,0 m/m	410 m/m	156 m/m
2	сталь . .	24	20,0	410	156
3 *)	» . .	24	19,8	305	165,5
4	жел мѣдь	23,9	19,0	472	172
5	жельзо .	19,9	16,0	407	180

Призмы, которыя сжимались между гайками стержня были изготовлены въ видѣ трубокъ числомъ шесть слѣдующихъ размѣровъ:

*) Стержень № 3 служилъ только для опредѣленія зависимости между крутящимъ моментомъ и силою затяжки.

Т а б л и ц а IV.

№№	Матерьяль.	Диаметръ.		Высота <i>h</i>
		Наружн. <i>D</i>	Внутр. <i>D₁</i>	
1	Желѣзо	33,50 <i>м/м</i>	25,5 <i>м/м</i>	167,3 <i>м/м</i>
2	»	33,60	26,0	168,2
3	жел. мѣдь	33,55	25,5	168,0
4	чугунъ	33,56	26,6	167,0
5	дерево	47,10	26,0	168,4
6	чугунъ	43,85	26,6	166,5

Трубка № 5 сдѣлана изъ сухой березы; въ поперечномъ сѣченіи имѣла наружное очертаніе въ формѣ квадрата со скошенными углами; послѣднее понадобилось сдѣлать для того, чтобы умѣстился измѣрительный приборъ.

Прежде всего были опредѣлены модули упругости E и E_1 для матерьяловъ стержней и трубокъ, первыхъ при растяженіи, вторыхъ при сжатіи. При этомъ оказались такія данныя:

Т а б л и ц а V.

Стержень № 1— $E=21345$ <i>klg/mm²</i> .	Трубка № 1— $E_1=20200$ <i>klg/mm²</i>
„ № 2— $E=21727$ „	„ № 2— $E_1=22191$ „
„ № 4— $E=10030$ „	„ № 3— $E_1=9428$ „
„ № 5— $E=20671$ „	„ № 4— $E_1=7001$ „
	„ № 5— $E_1=1376$ „
	„ № 6— $E_1=7550$ „

Въ виду того, что при первыхъ опытахъ, при затягиваніи трубокъ гайками на стержнѣ, замѣчалось скручиваніе трубокъ. т. е. обстоятельство не предусматриваемое зависимостью (10), пришлось позаботиться, чтобы крутящій моментъ не передавался на трубку. Съ этою цѣлью было сдѣлано такое приспособленіе (фиг. 4): чугунная поперечина AB имѣетъ на срединѣ отверстіе для пропуска стержня E . На концахъ ея укрѣплены (ввинчены) двѣ стойки a , a служащія направляющими для такой же поперечины CD , которая можетъ двигаться вдоль стержня и устанавливается въ зависимости отъ длины зажимае-

мой трубки F . При такихъ условіяхъ скручиваніе трубки становится возможнымъ лишь постолько, поскольку это допускаетъ прогибъ направляющихъ $a-a$, который является совершенно малымъ.

При измѣреніяхъ деформаций растяженія и сжатія примѣнялся приборъ Martens-Kennedy съ расчетной длиною въ 150 m/m и снабженный нониусомъ. Аппаратъ позволяетъ дѣлать измѣренія съ точностью до 1:300 m/m , если ограничиться отсчетомъ въ десятыхъ доляхъ миллиметра.

Опытъ производился слѣдующимъ образомъ. Трубка зажималась между поперечинами AB и CD прибора (фиг. 4) и стягивалась гайками, помсщью гаечнаго ключа. Отсчетомъ по измѣрительному прибору опредѣлялась сжимающая сила P , т. е. начальная затяжка. Затѣмъ стержень EE подвергался продольному растяженію *): послѣ каждой нагрузки производился отсчетъ деформации трубки, которая, очевидно, разгружалась. По достиженіи наибольшей нагрузки послѣдняя постепенно уменьшалась до нуля; деформация трубки шла обратно, т. е. нарастала. Совпаденіе показаній прибора въ началѣ и концѣ опыта являлось доказательствомъ, что напряженіе матерьяла не переходило за предѣлъ упругости. По полученнымъ отсчетамъ прибора для деформации трубки можно было установить для каждой нагрузки машины величину соотвѣтственной силы T , сжимающей трубку.

Слѣдовательно мѣрою нагрузки для трубки служила ея деформация; поэтому при нахожденіи величинъ модулей упругости E_1 попутно были опредѣлены показанія прибора, соотвѣтствующія грузу въ 500 или 1000 klg . (въ зависимости отъ матеріала). Сжатіе производилось на прессѣ Amsler'a и перемѣщенія прибора отсчитывались черезъ каждые 1000 (или 500) klg . Повторивъ нагрузку нѣсколько разъ, трубку поворачивали на 90° и вновь нагружали въ томъ же порядкѣ.

Средній отсчетъ изъ полученныхъ такимъ образомъ цифръ мало отличался отъ крайнихъ значеній, не болѣе чѣмъ на 5% . Результаты указаны въ таблицѣ VI, содержащей показанія m .

*) Растяженіе производилось на вертикальной машинѣ Amsler'a мощностью въ 50%. На фиг. 5 показана установка для опыта съ трубкою № 5. На фиг. 5а представленъ приборъ (фиг. 4) на стержнѣ № 2 съ трубкою № 6.

Т а б л и ц а VI.

№№ трубки	Матерьяль.	Нагрузка.	Соотвѣст. показаніе прибора.
1	желѣзо.	1000 <i>klg.</i>	0,60 <i>m/m</i>
2	желѣзо.	1000 <i>klg.</i>	0,57 <i>m/m</i>
3	же л. мѣдь.	1000 <i>klg.</i>	1,28 <i>m/m</i>
4	чугунъ.	500 <i>klg.</i>	0,87 <i>m/m</i>
5	дерево.	500 <i>klg.</i>	1,00 <i>m/m</i>
6	чугунъ.	1000 <i>klg.</i>	0,59 <i>m/m</i>

Т а б л и ц а VII.

Стержень № 1. Трубка № 2.

Нагрузка <i>Q</i> <i>klg.</i>	Отсчетъ.		Послѣдоват. разность отсчетовъ. <i>mm</i>	Сила <i>T</i> <i>klg.</i>	С и л а <i>P_t</i>		Разности.	
	лѣв. <i>m/m</i>	прав. <i>m/m</i>			наблюд. <i>klg.</i>	вычисл. <i>klg.</i>	Абсол.	въ ⁰ / ₀ %
1			2	3	4	5	6	7
0	3,30	3,20	—	—	—	—	—	—
Затяжка	5,50	5,30	2,150	3770	3770	—	—	—
1000	5,25	5,00	1,875	3290	4290	4322	- 32	-0,74
2000	5,00	4,75	1,625	2850	480	4864	- 14	-0,29
3000	4,80	4,45	1,375	2410	5410	5426	- 16	-0,30
4000	4,60	4,15	1,125	1975	5975	5978	- 3	-0,05
5000	4,25	3,95	0,850	1409	6499	6530	- 61	0,94
6000	4,00	3,70	0,600	1050	7050	7082	- 32	-0,45
7000	3,75	3,50	0,375	660	7660	7634	+26	+0,30
8000	4,00	3,70	—	—	—	—	—	—
5000	4,30	3,95	—	—	—	—	—	—
4000	4,55	4,20	—	—	—	—	—	—
3000	4,80	4,45	—	—	—	—	—	—
2000	5,00	4,75	—	—	—	—	—	—
1000	5,25	5,00	—	—	—	—	—	—
0	5,50	5,30	—	—	—	—	—	—
Гайка отвернута	3,30	3,20	—	—	—	—	—	—

Отношенія: $\eta=0,79$, $\xi=1,04$, $b=0,52$.

Показаніе $m=0,57$ на 1000 *klg.*

Предѣльное значеніе $Q=8400$ *klg.*

Т а б л и ц а VIII.
Стержень № 1. Трубка № 3.

Нагрузка Q <i>klg</i>	Послѣдоваг. разность от четовъ m/m	Сила T <i>klg</i>	С и л а P_1		Р а з н о с т и.	
			наб.юд. <i>klg</i>	вычисл. <i>klg</i>	аб.ол.	въ $\frac{0}{0}\%$
1	2	3	4	5	6	7
0	—	—	—	—	—	—
Затяжка	3,325	2600	2600	—	—	—
1000	3,107	2420	3420	3330	+ 90	+2,55
2000	2,675	2080	4080	4060	+ 20	+0,49
3000	2,275	1770	4770	4790	20	-0,42
4000	1,875	1460	5460	5520	- 60	-1,10
5000	1,475	1150	6150	6250	- 100	-1,62
6000	1,075	840	6840	6980	-140	-2,04
7000	0,800	625	7625	7710	- 85	-1,11
0	—	—	—	—	—	—
Гайка отвернута.	—	—	—	—	—	—

Отношенія: $\eta=0,825$. $\xi=0,440$ $b=0,73$.

Показаніе $m=1,28 m/m$ на 1000 *klg*.

Предѣльное значеніе $Q=9650 klg$

Т а б л и ц а IX.
Стержень № 1. Трубка № 6

Нагрузка Q <i>klg</i>	Послѣдоваг. разность от- счетовъ. m/m	Сила T <i>klg</i>	С и л а P_1		Р а з н о с т и.	
			наб.юд. <i>klg</i>	вычисл. <i>klg</i>	абсол.	въ $\frac{0}{0}\%$
1	2	3	4	5	6	7
0	—	—	—	—	—	—
Затяжка.	2,325	3720	3720	—	—	—
1000	2,125	3400	4400	4295	+105	+2,39
2000	1,900	3040	5040	4870	+170	+3,37
3000	1,650	2640	5640	5445	+195	+3,45
4000	1,375	2200	6200	6020	+180	+2,90
5000	1,125	1800	6800	6595	+205	+3,02
6000	0,850	1360	7360	7170	+190	+2,58
7000	0,600	960	7960	7745	+215	+2,70

Отношенія: $\eta=2,10$; $\xi=0,353$; $b=0,575$.

Показаніе $m=0,625 m/m$ на 1000 *klg*.

Предѣльное значеніе $Q=8750 klg$.

Т а б л и ц а X.

Стержень № 2, трубка № 1.

Нагрузка Q <i>kg.</i>	Послѣдов. разность отсчетовъ. <i>мм.</i>	Сила T <i>kg.</i>	С и л а P_1		Р а з н о с т и .	
			наблюд. <i>kg.</i>	вычисл. <i>kg.</i>	абсол.	въ $\frac{0}{0}\%$
1	2	3	4	5	6	7
0	—	—	—	—	—	—
Затяжка	2,425	4040	4040	—	—	—
1000	2,175	3623	4623	4610	+13	+0,28
2000	1,850	3083	5083	5178	-95	1,84
3000	1,600	2667	5667	5746	-79	-1,37
4000	1,300	2167	6167	6314	-147	-2,30
5000	1,075	1792	6792	6882	-90	-1,30
6000	0,800	1333	7333	7450	-117	-1,57

Отношенія: $\eta=0,82$; $\xi=0,932$; $b=0,568$.Показанія: $m=0,60$ m/m на 1000 *kg.*Предѣльное значеніе $Q=9360$ *kg.*

Т а б л и ц а XI.

Стержень № 2, Трубка № 2.

Нагрузка Q <i>kg.</i>	Послѣдов. разность отсчетовъ. <i>мм.</i>	Сила T <i>kg.</i>	С и л а P_1		Р а з н о с т и .	
			наблюд. <i>kg.</i>	вычисл. <i>kg.</i>	абсолют.	въ $\frac{0}{0}\%$
1	2	3	4	5	6	7
0	—	—	—	—	—	—
Затяжка	2,400	4220	4220	—	—	—
1000	2,150	3770	4770	4770	0	0
2000	1,900	3335	5335	5320	+15	+0,28
3000	1,625	2850	5850	5870	-20	-0,34
4000	1,328	2330	6330	6420	-90	-1,40
5000	1,100	1900	6900	6970	-70	-1,00
6000	0,952	1625	7625	7520	+105	+1,40

Отношенія: $\eta=0,79$; $\xi=1,02$; $b=0,553$.Показаніе $m=0,57$ m/m на 1000 *kg.*Предѣльное значеніе $Q=9450$ *kg.*

Т а б л и ц а XII.
Стержень № 2, Трубка № 3.

Нагрузка Q <i>кг.</i>	Послѣдов. разность отсчетовъ <i>мм.</i>	Сила T <i>кг.</i>	С и л а P_1 .		Р а з н о с т и.	
			наблюд. <i>кг.</i>	вычисл. <i>кг.</i>	абсолют.	въ ‰
1	2	3	4	5	6	7
0	0	—	—	—	—	—
Затяжка.	4,800	3750	3750	—	—	—
1000	4,500	3510	4510	4486	+24	+0,54
2000	4,050	3160	5160	52202	-62	-1,18
3000	3,650	2850	5850	5958	-108	-1,83
4000	3,350	2620	6620	6694	-74	-1,10
5000	2,875	2240	7240	7430	-190	-2,62

Отношенія: $\eta=0,825$; $\xi=0,435$; $b=0.735$.

Показанія $m=1,28$ *m/m* на 10^{10} *кг.*

Предѣльное значеніе $Q=14000$ *кг.*

Т а б л и ц а XIII.
Стержень № 2, Трубка № 4.

Нагрузка Q <i>кг.</i>	Послѣдов. разность отсчетовъ <i>мм.</i>	Сила T <i>кг.</i>	С и л а P_1 .		Р а з н о с т и.	
			наблюд. <i>кг.</i>	вычисл. <i>кг.</i>	абсолют.	въ ‰
1	2	3	4	5	6	7
0	—	—	—	—	—	—
Затяжка	6,260	3560	3560	—	—	—
1000	5,875	3375	4375	4350	+25	+0,57
2000	5,450	3130	5130	5140	-10	-0,20
3000	5,025	2890	5890	5930	-40	-0,68
4000	4,600	2640	6640	6720	-80	-1,26
5000	4,175	2400	7400	7510	-110	-1,50
6000	3,775	2160	8160	8300	-140	-1,72

Отношенія: $\eta=0,82$; $\xi=0,323$; $b=0.79$.

Показаніе $m=0,87$ *m/m* на 500 *кг.*

Предѣльное значеніе $Q=17000$ *кг.*

Т а б л и ц а XIV.

Стержень № 2, Трубка № 5.

Нагрузка Q <i>kg.</i>	Послѣдов. разность отсчетовъ <i>mm</i>	Сила T <i>kg.</i>	С и л а P_1		Р а з н о с т и.	
			наблюд. <i>kg.</i>	вычисл. <i>kg.</i>	абсолют.	въ $\frac{0}{0}\%$
1	2	3	4	5	6	7
0	—	—	—	—	—	—
Затяжка	6,800	3400	3400	—	—	—
1000	6,350	3175	4175	4207	- 32	-0,75
2000	5,875	2938	4938	5014	- 76	-1,53
3000	5,375	2688	5688	5821	- 133	-2,40
4000	4,850	2425	6425	6628	-203	-3,07
5000	4,400	2200	7200	7435	- 235	-3,16
6000	3,925	1963	7963	8242	-279	-3,40

Отношенія: $\eta=3,62$; $\xi=0,0635$; $b=0,807$.Показаніе $m=1$ *m/m*, на 500 *kg.*Предѣльное значеніе $Q=17600$ *kg.*

Т а б л и ц а XV.

Стержень № 2, Трубка № 6.

Нагрузка Q <i>kg.</i>	Послѣдов. разность отсчетовъ <i>mm</i>	Сила T <i>kg.</i>	С и л а P_1		Р а з н о с т и.	
			наблюд. <i>kg.</i>	вычисл. <i>kg.</i>	абсолют.	въ $\frac{0}{0}\%$
1	2	3	4	5	6	7
0	—	—	—	—	—	—
Затяжка.	1,500	2400	2400	—	—	—
1000	1,275	2040	3040	2980	+60	+2,00
2000	1,075	1640	3640	3560	+80	+2,20
3000	0,800	1280	4280	4140	+140	+3,26
4000	0,550	880	4880	4720	+160	+3,26
5000	0,325	520	5520	5300	+220	+4,00
6000	0,150	240	6240	5880	+360	+5,75
7000	0,025	40	7040	6480	+580	+8,20

Отношенія: $\eta=2,10$; $\xi=0,348$; $b=0,58$.Показаніе $m=0,625$ *m/m* на 1000 *kg.*Предѣльное значеніе $Q=5700$ *kg.*

Т а б л и ц а XVI

Стержень № 4, трубка № 1.

Нагрузка Q <i>kg</i>	Послѣдов. разность отсчетовъ <i>mm.</i>	Сила T <i>kg.</i>	С и л а P_1		Р а з н о с т и.	
			наблюд. <i>kg.</i>	вычисл. <i>kg.</i>	абсолют.	въ % ⁰ / ₀
1	2	3	4	5	6	7
0	—	—	—	—	—	—
Затяж. а.	2,125	3542	3542	—	—	—
1000	1,725	2875	3875	3918	-43	-1,10
2000	1,375	2292	4292	4291	-2	-0,05
3000	1,050	1750	4750	4670	+80	+1,68
4000	0,725	1208	5208	5045	+163	+3,10
5000	0,350	586	5586	5420	+166	+2,95

Отношенія: $\eta=0,83$; $\xi=2,00$; $b=0,76$.Показаніе $m=0,6$ *m/m* на 1000 *kg*.Предѣльное значеніе $Q=4100$ *kg*.

Т а б л и ц а XVII.

Стержень № 4, трубка № 3.

Нагрузка Q <i>kg</i>	Послѣдов. разность отсчетовъ <i>mm.</i>	Сила T <i>kg.</i>	С и л а P_1		Р а з н о с т и.	
			наблюд. <i>kg.</i>	вычисл. <i>kg.</i>	абсолют.	въ % ⁰ / ₀
1	2	3	4	5	6	7
0	—	—	—	—	—	—
Затяжка.	3,050	2383	2383	—	—	—
1000	2,550	1990	2990	2943	+47	+1,57
2000	1,875	1465	3465	3503	-38	-1,10
3000	1,350	1055	4055	4063	-8	-0,20
4000	0,850	665	4665	4623	+42	+0,90
4500	0,570	445	4945	4903	+42	+0,85

Отношенія: $\eta=0,83$; $\xi=0,942$; $b=0,56$.Показаніе $m=1,28$ *m/m* на 1000 *kg*Предѣльное значеніе $Q=5400$ *kg*.

Т а б л и ц а XVIII.

Стержень № 5, трубка № 1.

Нагрузка Q <i>kg.</i>	Послѣдов. разность отчетовъ <i>mm</i>	Сила T <i>kg.</i>	С и л а P_1		Р а з н о с т ь.	
			наблюд. <i>kg.</i>	вычисл. <i>kg.</i>	абсолют.	въ % $\frac{0}{0}$
1	2	3	4	5	6	7
0	—	—	—	—	—	—
Затяжка.	1,825	3012	3042	—	—	—
1000	1,575	2625	3625	3504	+121	+3,33
2000	1,450	2125	4125	3966	+159	+3,86
3000	1,000	1667	4667	4428	+239	+5,00
4000	0,700	1167	5167	4890	+277	+5,35

Отношенія: $\eta=1,16$; $\xi=0,975$; $b=0,462$.Показаніе $m=0,6$ *m/m* на 1000 *kg.*Предѣльное значеніе $Q=5650$ *kg.*

Т а б л и ц а XIX.

Стержень № 5, Трубка № 3.

Нагрузка Q <i>kg.</i>	Послѣдов. разность отчетовъ <i>mm</i>	Сила T <i>kg.</i>	С и л а P_1		Р а з н о с т и	
			наблюд. <i>kg.</i>	вычисл. <i>kg.</i>	абсолют.	въ % $\frac{0}{0}$
1	2	3	4	5	6	7
0	—	—	—	—	—	—
Затяжка.	3,150	2460	2460	—	—	—
1000	2,750	2130	3130	3090	+40	+1,27
2000	2,275	1777	3777	3720	+57	+1,50
3000	1,775	1387	4387	4350	+37	+0,84
4000	1,300	1015	5015	4980	+35	+0,70

Отношенія: $\eta=1,2$; $\xi=0,455$; $b=0,63$.Показаніе $m=1,28$ *m/m* на 1000 *kg.*Предѣльное значеніе $Q=6650$ *kg.*

Т а б л и ц а XX.

Стержень № 5, трубка № 4.

Нагрузка Q <i>кг.</i>	Послѣдов. разность отсчетовъ <i>мм.</i>	Сила T <i>кг.</i>	С и л а P_1		Р а з н о с т ь.	
			наблюд. <i>кг.</i>	вычисл. <i>кг.</i>	абсолют.	въ %/0/0
1	2	3	4	5	6	7
0	—	—	—	—	—	—
Затяжка	4,825	2770	2770	—	—	—
1000	4,450	2550	3550	3485	+65	+1,86
2000	3,925	2250	4250	4200	+50	+1,19
3000	3,300	1895	4895	4915	-20	-0,41
4000	2,650	1522	5522	5630	-108	-1,93

Отношенія: $\eta=1,19$; $\xi=0,338$; $b=0,715$.Показаніе $m=0,87$ *m/m* на 500 *кг.*Предѣльное значеніе $Q=9750$ *кг.*

Т а б л и ц а XXI.

Стержень № 5; трубка № 5.

Нагрузка Q <i>кг.</i>	Послѣдов. разность отсчетовъ. <i>мм.</i>	Сила T <i>кг.</i>	С и л а P_1		Р а з н о с т и.	
			наблюд. <i>кг.</i>	вычисл. <i>кг.</i>	абсолют.	въ %/0/0
1	2	3	4	5	6	7
0	—	—	—	—	—	—
Затяжка.	4,300	2150	2150	—	—	—
1000	3,800	1900	2900	2890	+10	+0,35
2000	3,150	1575	3575	3630	-55	-1,55
3000	2,575	1288	4288	4370	-82	-1,90
4000	2,000	1000	5000	5110	-110	-2,20

Отношенія: $\eta=5,25$; $\xi=0,065$; $b=0,74$.Показаніе $m=1,00$ *m/m* на 500 *кг.*Предѣльное значеніе $Q=8300$ *кг.*

Т а б л и ц а XXII.

Стержень № 5; трубка № 6.

Нагрузка Q <i>kg.</i>	Послѣдов. разность отчетовъ. <i>mm</i>	Сила T <i>kg</i>	С и л а P_1		Р а з н о с т и.	
			наблю. <i>kg.</i>	в. числ. <i>kg.</i>	абсолют.	въ 0/0
1	2	3	4	5	6	7
0	—	—	—	—	—	—
Затяжка.	1,550	2480	2480	—	—	—
1000	1,275	2040	3040	2955	+85	+2,80
2000	1,025	1640	3640	3430	+210	+5,75
3000	0,725	1160	4160	3905	+255	+6,15
4000	0,475	760	4760	4380	+380	+8,00
5000	0,175	280	5280	4755	+525	+9,90

Отношенія: $\eta = 3,03$; $\xi = 0,365$, $b = 0,475$.Показанія $m = 0,625$ *m/m* на 1000 *kg.*Предѣльное значеніе $Q = 4700$ *kg.*

Въ таблицахъ VII—XXII приведены результаты наблюденій *) для полученія величинъ силы P_1 , при различныхъ комбинаціяхъ стержней и трубокъ. Въ четвертой графѣ значенія P_1 найдены по уравненію (7), въ пятой по уравненію (10). Какъ видно изъ таблицъ полного совпаденія между наблюденными и вычисленными значеніями для P_1 не наблюдается. Но въ большинствѣ случаевъ разность между этими величинами не велика и колеблется въ предѣлахъ $\pm 3\%$. Въ отдѣльныхъ опытахъ, впрочемъ разность эта больше и достигаетъ даже 10% (табл. XXII). Причина такого отклоненія можетъ лежать въ запаздываніи показаній прибора Kennedy при разгрузкѣ трубки, что наблюдалось напр. въ трубкахъ №№ 4 и 6, при опредѣленіи модуля упругости. Кромѣ того для чугунныхъ трубокъ модуль E_1 былъ вычисленъ по среднимъ отсчетамъ, что, конечно, уже вноситъ съ собою известную погрѣшность.

Тѣмъ не менѣе полученные результаты позволяютъ предполагать правильность соотношенія (10); для окончательнаго заключенія желательнo производство наблюденій въ болѣе обширномъ масштабѣ, что имѣется въ виду сдѣлать въ дальнѣйшемъ при опытахъ относительно распределенія напряженій во фланцевомъ соединеніи, которые уже начаты въ лабораторіи.

*) Таблица VII—приведена полностью т. е. съ показаніями прибора Kennedy (лѣв. и прав. отсчеты) отъ начала опыта до наибольшей нагрузки Q и затѣмъ постепенная разгрузка до 0 и до отвинчиванія гайки. Такъ какъ эти цифры нужны были лишь для доказательства, что въ теченіи опыта явленіе оставалось въ предѣлахъ пропорціональности, то въ остальныхъ таблицахъ указанная цифра опущена.



Изъ таблицъ X—XI можно усмотрѣть, что начальная затяжка достигаетъ значенія $P=4000 \text{ klg}$ и выше. Было бы весьма интересно установить хотя приближенную зависимость между діаметромъ d болта и величиною P_1 , хотя теоретически (ур—іе 14) сила P отъ d не зависитъ. Къ сожалѣнію найти такую зависимость вообще нельзя, такъ какъ на нее вліяютъ величина коэф. f тренія, качество работы и т. д.

Пользуясь приборомъ, показаннымъ на фиг. 4, я опредѣлилъ для стержней № 3, 4 и 5 закручивающій моментъ для различныхъ силъ затяжки. Приборъ со стержнемъ и трубкою помѣщался на горизонтальную машину для крученія (фиг. 6); одна гайка закрѣплялась въ зажимѣ A , соединенномъ съ противовѣсомъ. На другую надѣвался двойной ключъ B , поворачиваемый поводкомъ C , установленнымъ на секторѣ D передняго зажима E . Затягивая гайку известнымъ, напередъ заданнымъ, моментомъ помощью аппарата Martens-Kenedy отсчитывали деформацию трубки, а слѣдовательно, и соответствующую силу P —затяжки.

Въ таблицахъ XXIII—XXV даны результаты затягиванія трубокъ №№ 2 и 3 на стержняхъ 3, 4 и 5. Цифры эти показываютъ, что въ предѣлахъ сдѣланныхъ наблюденій величина затяжки не зависитъ отъ діаметра стержня и его матерьяла. Въ среднемъ можно принять, что 1 klg . крутящаго момента вызываетъ $p = 180 \text{ klg}$ продольнаго растягивающаго усилія. *)

Т а б л и ц а XXIII.

Т а б л и ц а XXIV.

Стержень № 3. Трубка № 2.

Крутящій моментъ klgm.	Послѣдов. разность отсчетовъ mm.	Затяжка klg.
3,0	0,350	615
6,0	0,600	1050
9,0	0,900	1575
12,0	1,250	2200
15,0	1,525	2695
0	—	—
3,0	0,325	570
6,0	0,575	1000
9,0	0,900	1575
12,0	1,200	2110
15,0	1,475	2590
0	—	—

Стержень № 3. Трубка № 3.

Крутящій моментъ klm.	Послѣдов. разность отсчетовъ mm.	Затяжка klg.
3,0	0,550	430
6,0	1,200	1015
9,0	1,975	1540
12,0	2,825	2200
15,0	3,500	2730
0	—	—
3,0	0,600	468
6,0	1,275	1000
9,0	2,100	1640
12,0	2,775	2170
15,0	3,425	2714
0	—	—
3,0	0,625	458
6,0	1,325	1035
9,0	2,000	1565
12,0	2,550	1995
15,0	3,400	2660

*) Выше указывалось, что величина P зависитъ отъ коэф. тренія. Насколько это зависимость велика видно изъ опыта, сдѣланнаго параллельно только что

Т а б л и ц а XXV.

№№ стержня и трубки.	Крутящій моментъ <i>kgm.</i>	Послѣдова- тельная разность отсчетовъ <i>mm.</i>	Затяжка <i>kg.</i>
Стержень № 4	3,0	0,325	570
Трубка № 2	6,0	0,700	1227
	9,0	1,000	1755
	12,0	1,250	2190
Стержень № 4	3,0	0,800	624
	6,0	1,500	1170
Трубка № 3	9,0	2,200	1716
	12,0	3,000	2340
Стержень № 5	3,0	0,600	470
Трубка № 3	6,0	1,300	1015
	9,0	2,000	1562
	12,0	2,750	2150
Стержень № 5	3,0	0,305	542
Трубка № 2	6,0	0,725	1210
	9,0	1,100	1833
	12,0	1,250	2167

Если принять, что сила S рукъ на ключъ будетъ $S=40-30-20$ *kg.* то получимъ такія значенія затяжки, полагая крутящій моментъ $M=15 d.S$,

Т а б л и ц а XXVI.

<i>d</i> <i>mm.</i>	$S=40$ <i>kg.</i>		$S=30$ <i>kg.</i>		$S=20$ <i>kg.</i>	
	M <i>kgm.</i>	P <i>kg.</i>	M <i>kgm.</i>	P <i>kg.</i>	M <i>kgm.</i>	P <i>kg.</i>
20	12,0	2160	9,0	1620	6,0	1180
24	14,4	2600	10,0	1300	7,2	1300

т. е. затяжка при одинаковыхъ условіяхъ растетъ съ увеличеніемъ діаметра. Для діаметровъ въ 20 *mm* и 24 *mm* можно взять какъ среднія значенія $P=1500$ *kg.*

Чтобы показать насколько рѣзко вліяетъ затяжка на результирующее усиліе R возьмемъ числовой примѣръ. Пусть дано: $\xi=0,05$, $\eta=0,5$ и $P=1500$ *kg.*; имѣемъ $b=0,8$.

описанному, на томъ же стержнѣ № 3 съ трубкою № 2, но шайба была замѣнена двумя кольцами съ желобками, въ которыхъ были уложены шарики въ 5 *mm.* діаметромъ. При тѣхъ же закручивающихъ моментахъ, что въ Табл. XXIII сила затяжки увеличивалась вдвое.

Если $Q=1000 \text{ klg}$ то по (13) $R=2720 \text{ klg}$.

Если $Q=3000 \text{ klg}$ то по (13) $R=3170 \text{ klg}$.

т. е. въ первомъ случаѣ R превышаетъ Q болѣе нежели въ 2,5 разъ, во второмъ R почти не отличается отъ Q

По окончаніи наблюденій для стержней и трубокъ были вновь опредѣлены модули упругости E и E_1 причемъ найдено.

Т а б л и ц а XXVII.

Стержень № 1, $E = 21407 \text{ klg/mm}^2$; Трубка № 1, $E_1 = 20200 \text{ klg/mm}^2$.

„	№ 2, $E = 21700$	„	„	№ 2, $E_1 = 22200$	„
„	№ 4, $E = 10130$	„	„	№ 3, $E_1 = 9283$	„
„	№ 5, $E = 20476$	„	„	№ 5, $E_1 = 7071$	„
		„	„	№ 5, $E_1 = 1308$	„
		„	„	№ 6, $E_1 = 7550$	„

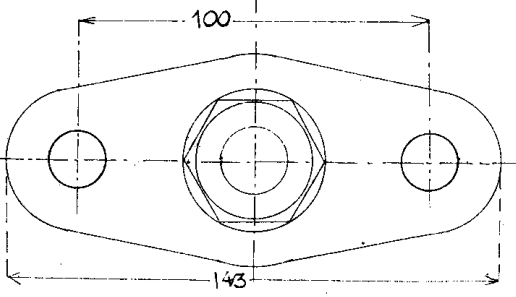
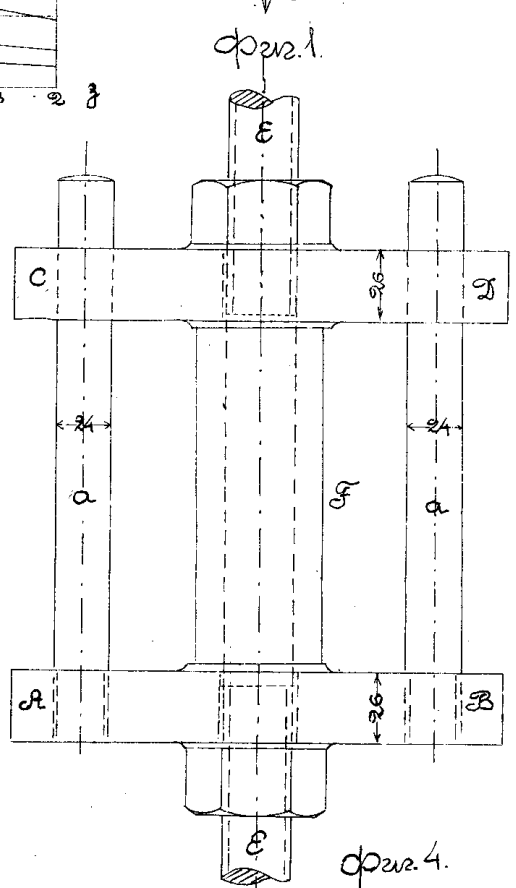
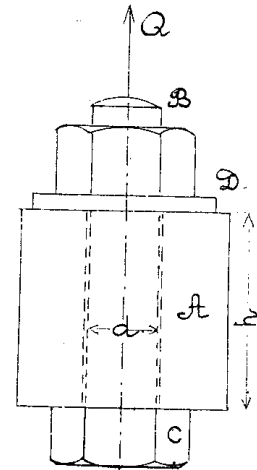
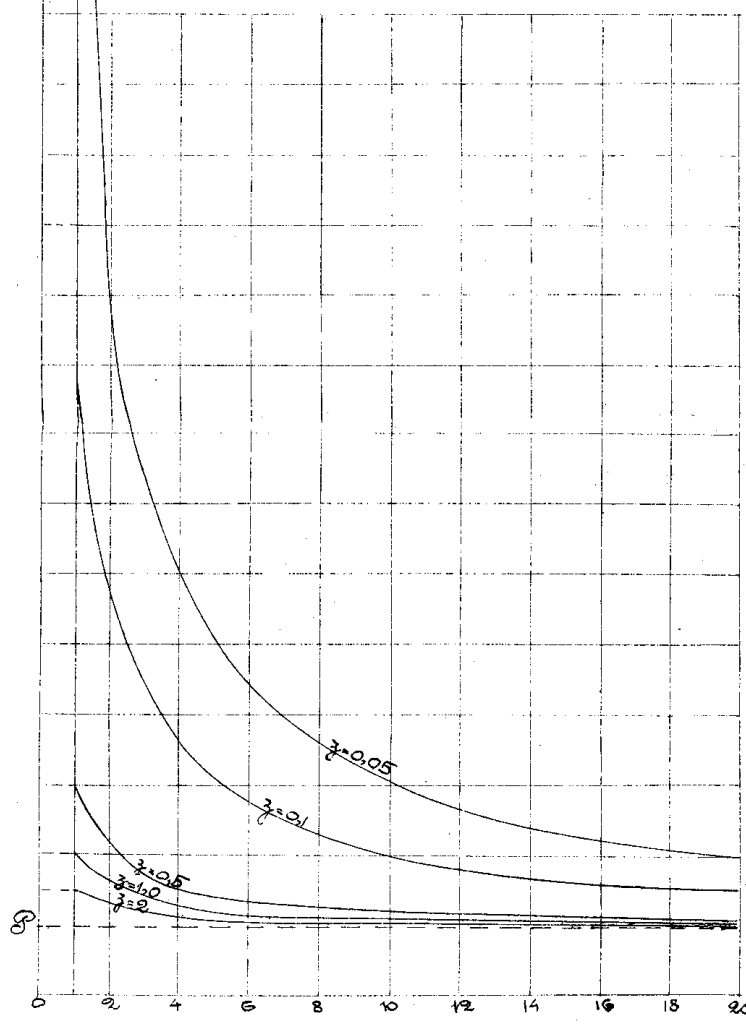
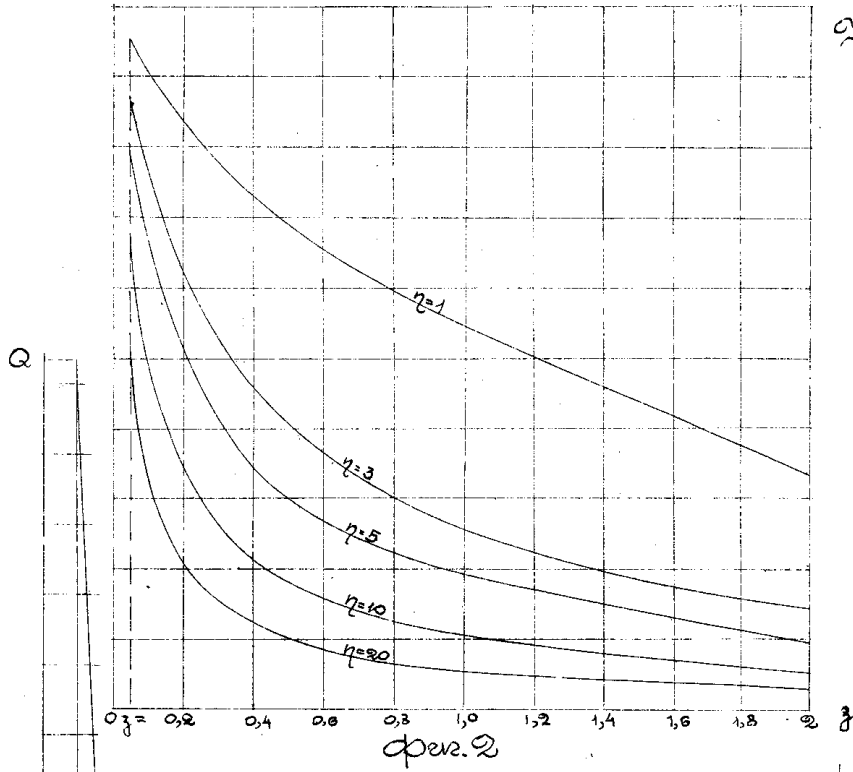
т. е. отклоненія, по сравненію съ таблицей V, ничтожныя.

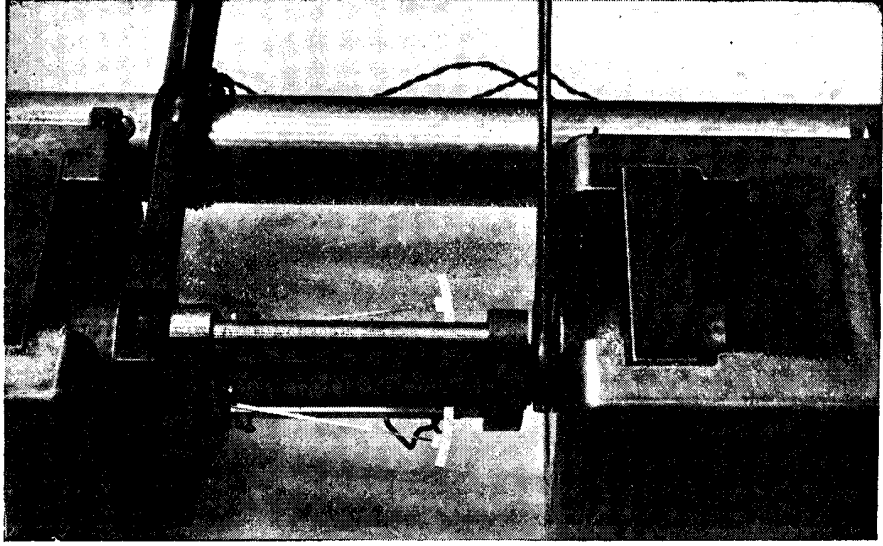
Т а б л и ц а А.

Международная система наръзки.

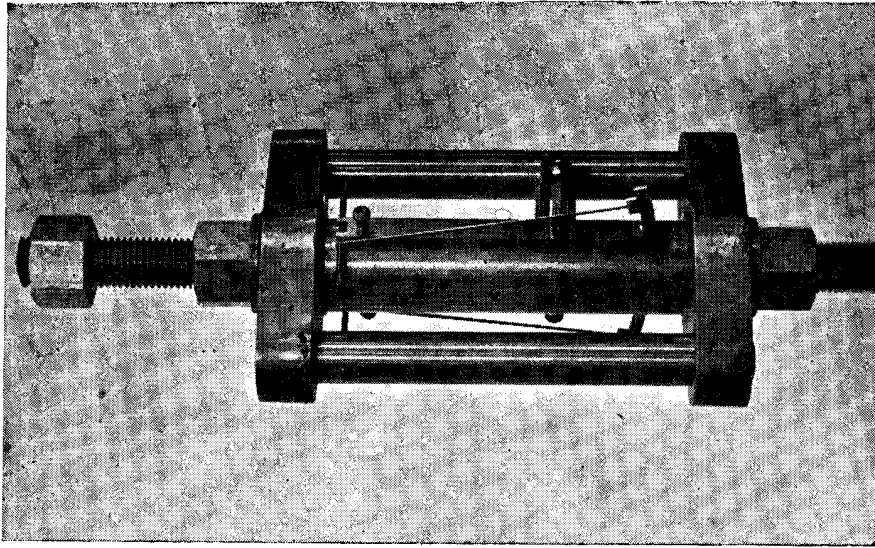
Внѣшн. діам. d	Высота хода h	Внутрен. діаметръ d_1	Разность $d-d_1$	Средній діам. d_0	Уголъ α подъема нитки.	$\text{tg} \alpha$	Отношенія		
							$d:d_1$	$d_0:d_1$	$d:d_0$
6	1,0	4,59	1,46	5,3	3°36'17"	0,0630	1,105		
7	1,0	5,59	1,46	6,3		0,0606	1,250		
8	1,25	6,24	1,76	7,12		0,0560	1,280		
9	1,25	7,24	1,76	8,12		0,0460	1,240		
10	1,5	7,89	2,11	8,95		0,0533	1,265		
11	1,5	8,89	2,11	9,95		0,0480	1,240		
12	1,75	9,54	2,46	10,77	3°11'33"	0,0557	1,260		
14	2,0	11,19	2,81	12,6		0,0505	1,250		
16	2,0	13,19	2,81	14,6		0,0436	1,210		
18	2,5	14,48	3,52	16,24		0,0490	1,240		
20	2,5	16,48	3,52	18,24	2°29'13"	0,0436	1,214	1,105	1,095
22	2,5	18,48	3,52	20,24		0,0365	1,190	1,095	1,085
24	3,0	19,75	4,22	21,9		0,0435	1,210	1,10	1,095
27	3,0	22,78	4,22	24,9		0,0384	1,175	1,09	1,085
30	3,5	25,08	4,92	27,54		0,0405	1,192	1,10	1,090
33	3,5	28,08	4,92	30,54		0,0375	1,170	1,09	1,075
36	4,0	30,37	5,63	33,19		0,0384	1,180	1,09	1,085
39	4,0	33,37	5,63	36,19		0,0360	1,170	1,08	1,075
42	4,5	35,67	6,33	38,84		0,0368	1,175	1,09	1,080
45	4,5	38,67	6,33	41,84		0,0342	1,170	1,08	1,075
48	5,0	40,96	7,04	44,48		0,0356	1,170	1,085	1,080
52	5,0	44,96	7,04	48,48	1°51'38"	0,0327	1,165	1,075	1,075
56	5,5	48,26	7,74	52,13		0,0335	1,160		
60	5,5	52,26	7,74	56,13		0,0310	1,150		
64	6,0	55,56	8,44	59,78		0,0319	1,150		
68	6,0	59,56	8,44	63,78		0,0299	1,140		
72	6,5	62,85	9,15	67,43		0,0309	1,145		
76	6,5	66,85	9,15	71,43		0,0290	1,137		
80	7	70,15	9,85	75,08		0,0286	1,140		

Гладильная
 для станков
 И.И. Бодаренкова

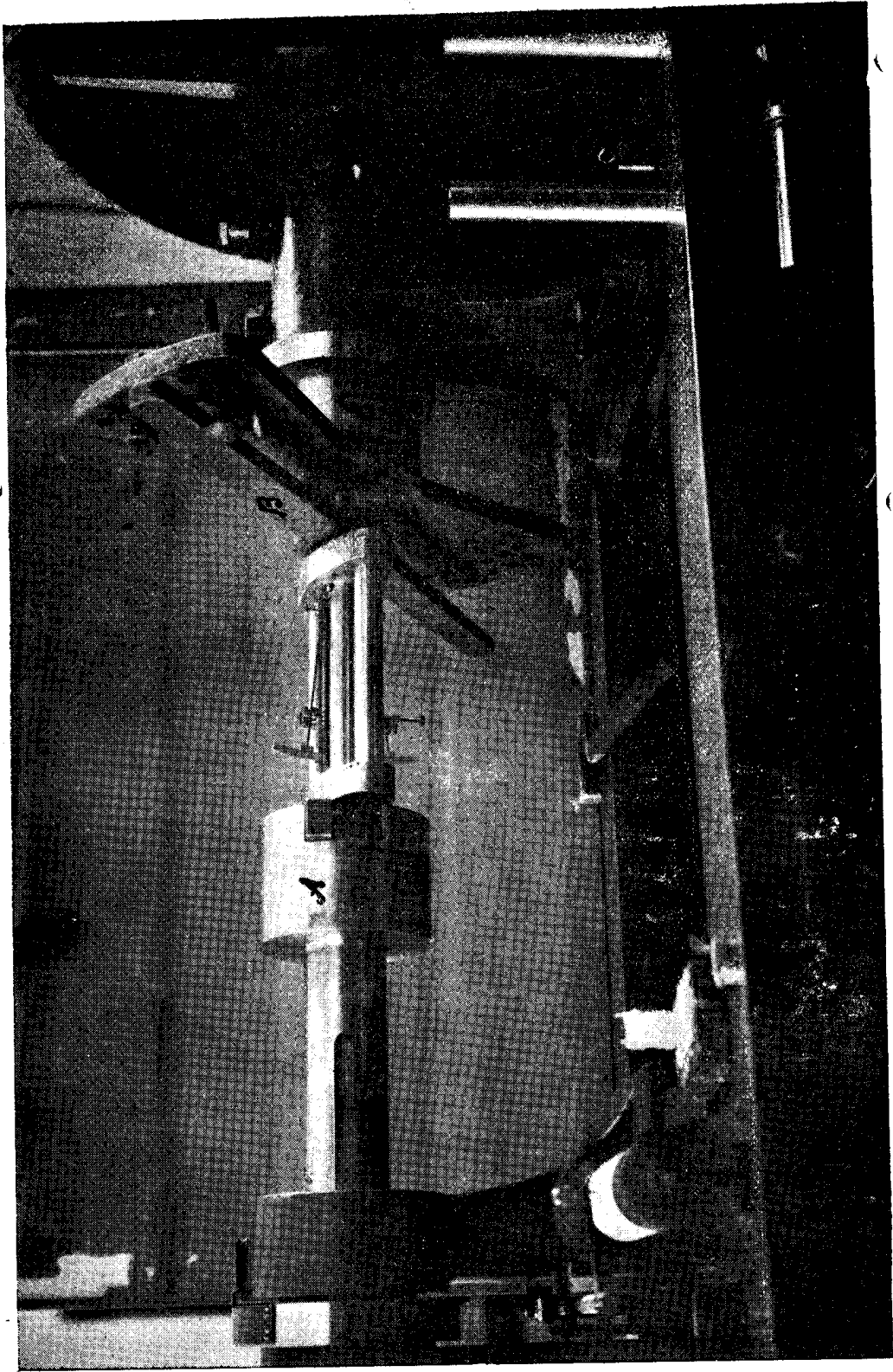




Фиг. 5А.



Фиг. 5.



Фиг. 6.