

КИЕВСКИЙ ЭЛЕКТРОСВАРОЧНЫЙ КОМИТЕТ

Е. О. ПАТОН и М. В. ПЕТРОВ

*Илья Михаилович*

**ИЗЫСКАНИЕ  
РАЦИОНАЛЬНОГО ТИПА  
ЭЛЕКТРОСВАРЕННЫХ СКВОЗНЫХ ФЕРМ**

**ОПЫТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ**

ЭТА РАБОТА ПРОИЗВЕДЕНА НА СРЕДСТВА, ОТПУЩЕННЫЕ  
АВТОГЕННЫМ КОМИТЕТОМ В. С. Н. Х.

ИЗДАНИЕ КИЕВСКОГО ЭЛЕКТРОСВАРОЧНОГО КОМИТЕТА  
КИЕВ — 1931

КИЕВСКИЙ ЭЛЕКТРОСВАРОЧНЫЙ КОМИТЕТ

Е. О. ПАТОН и М. В. ПЕТРОВ

Патон и Петров

ИЗЫСКАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ТИПА  
ЭЛЕКТРОСВАРЕННЫХ СКВОЗНЫХ ФЕРМ

ОПЫТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

ЭТА РАБОТА ПРОИЗВЕДЕНА НА СРЕДСТВА,  
ОТПУЩЕННЫЕ АВТОГЕННЫМ КОМИТЕТОМ В. С. И. Х.

Сканировал и обрабатывал  
Лукин А.О.

Библиографическое описание этого  
издания помещено в "Літопису  
Українського Друку", "Мартовому  
репертуарі" и других університетських  
Української Міністерства.

Киевский горлит № 35.  
1-я типогр філія УПО.  
Киев, Сенна площа № 14,  
Зак. № 72. Тир. 3 000 2 $\frac{1}{4}$  арк

## ОГЛАВЛЕНИЕ.

	Стр.
§ 1. Цель исследования . . . . .	1
§ 2. Принципы, положенные в основу проектирования опытных ферм. . . . .	1
§ 3. Описание опытных ферм . . . . .	8
§ 4. Программа и метод испытания . . . . .	15
§ 5. Результаты испытания . . . . .	16
§ 6. Сравнение веса ферм . . . . .	23
§ 7. Сравнение ферм по результатам испытания . . . . .	27
§ 8. Сравнение ферм в отношении удобства их изготовления . . . . .	31
§ 9. Выбор самого рационального типа ферм . . . . .	34

---



## **ИЗЫСКАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ТИПА ЭЛЕКТРОСВАРЕННЫХ СКВОЗНЫХ ФЕРМ.**

### **§ 1. Цель исследования.**

Электросварка позволяет осуществить новые типы конструкций, невозможные при клепке. Такие сваренные конструкции могут оказаться рациональнее, чем обычные клепанные конструкции. Мы задались целью найти наиболее экономную по материалу и рациональную для выполнения конструкцию электросваренных стропильных ферм.

Применяя электросварку, можно получить сбережение металла по двум причинам: 1) для прикрепления стержней к узлам можно обойтись без узловых фасонок и таким образом уменьшить вес фермы; 2) электросварка дает возможность широкого применения трубчатых сечений для стержней; это обстоятельство особенно важно для сжатых стержней, так как повышается их жесткость и увеличивается коэффициент  $\varphi$  уменьшения допускаемого напряжения на случай продольного изгиба, вследствие чего можно повысить прочность фермы без увеличения ее веса. Однако, малый вес и большая прочность фермы еще недостаточны для суждения о ее выгодности. Самая легкая и прочная ферма может оказаться неудобной для сборки и сварки. А неудобство сварки ведет к ухудшению ее качества, к увеличению процента непроваров, и, в результате, получаются ненадежные прикрепления. Поэтому следует обратить самое серьезное внимание на удобство изготовления ферм на заводе.

На прочность фермы оказывает также влияние правильность ее работы под нагрузкой. Равномерное распределение напряжений по сечениям, низкие дополнительные напряжения от жесткости узлов, хорошие условия работы швов ведут к повышению прочности и надежности фермы.

Руководствуясь вышесказанным, мы избрали такой путь исследования: 1) мы спроектировали несколько ферм разной конструкции; 2) мы сварили эти фермы на заводе, обратив внимание на удобство сборки и прикрепления, 3) мы испытали фермы для выяснения их работы под нагрузкой и 4) мы сравнили фермы между собою по весу, по прочности и по удобству изготовления.

### **§ 2. Принципы, положенные в основу проектирования опытных ферм.**

Спроектированные нами 4 фермы (фиг. 1, 6, 10 и 12) пролетом 5,4 м и высотой 1,0 м разделены на 4 панели по 1,35 м. Система решетки треугольная с дополнительными стойками.

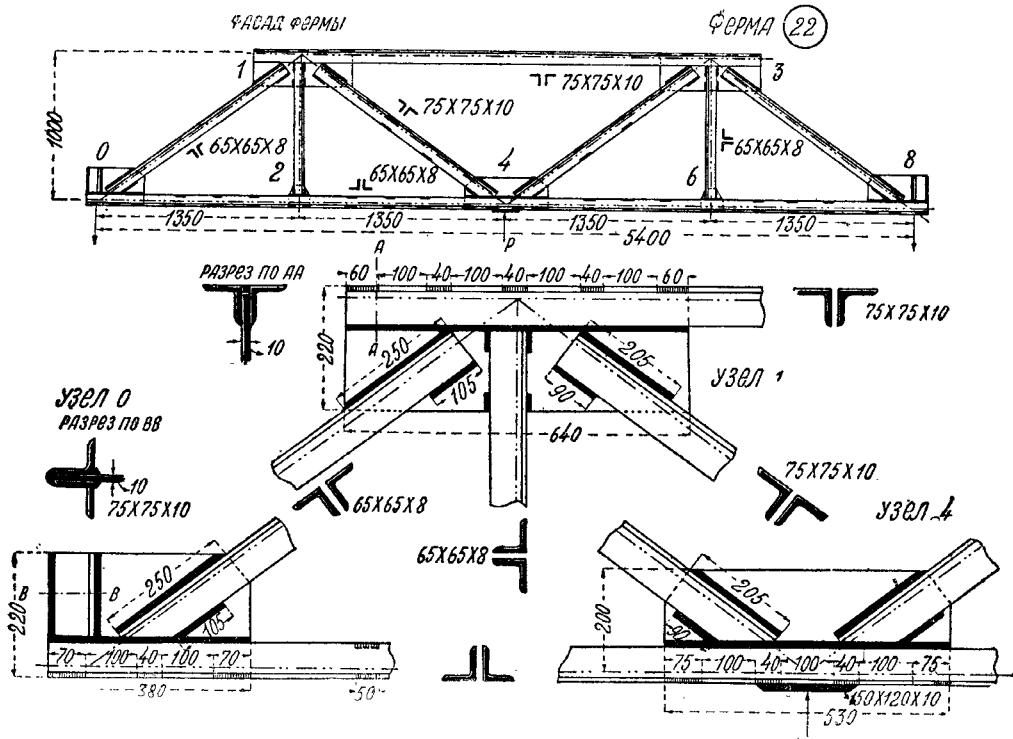
Все 4 фермы — сваренные, при чем одна ферма (марка 22) имеет обычные в клепанных стропилах тавровые сечения элементов из двух уголков, а три фермы (марки 23, 24 и 25) имеют такие сечения элементов и такие сопряжения в узлах, которые невыполнимы при заклепочных соединениях. В двух фермах (марки 23 и 25) узлы скон-

струированы без фасонок, а в двух других фермах — с фасонками. При проектировании мы стремились к уравнению основного веса стержней всех 4-х ферм; поэтому сечения одноименных стержней мы подобрали так, чтобы они были одинаковые по площади; но зато мы меняли форму этих сечений. Благодаря этому жесткость стержней получилась разная. Разная жесткость сжатых стержней повлияла на коэффициенты  $\varphi$  уменьшения допускаемого напряжения на случай продольного изгиба и отразилась на прочности ферм. Поэтому прочность 4-х опытных ферм получилась неодинаковая. Несмотря на одинаковый основной вес, в полном весе 4-ех ферм наблюдается некоторая разница, зависящая от неодинаковой длины одноименных элементов и, главным образом, от наличия или отсутствия узловых фасонок.

Все 4 фермы расчитаны на максимальную нагрузку 90 тонн, действующую по середине пролета снизу вверх. Временное сопротивление материала принято  $4500 \text{ кг}/\text{см}^2$ . Все стержни ферм подобраны с возможно малым запасом. Наличие некоторых запасов объясняется желанием ограничиться немногими сортами уголков. Основная цель испытания заключалась в сравнении прочности ферм в зависимости от их конструкции; поэтому преждевременное разрушение швов явилось нежелательным, и все прикрепления мы спроектировали прочнее, чем стержни ферм. При расчете швов мы руководствовались следующими напряжениями: на растяжение и сжатие шва  $3000 \text{ кг}/\text{см}^2$ , на срезывание шва  $2200 \text{ кг}/\text{см}^2$ .

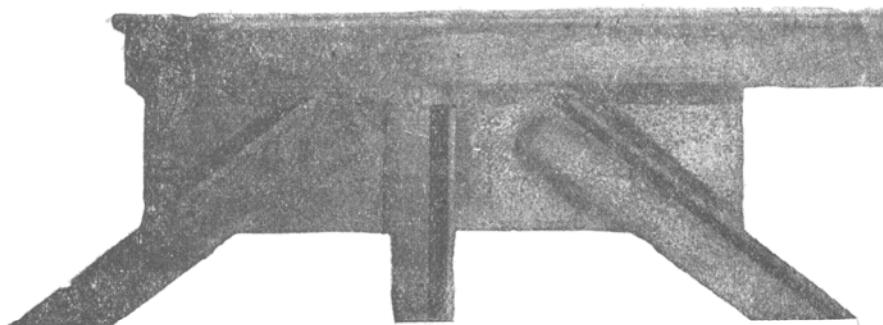
### § 3. Описание опытных ферм.

- а) Тавровая ферма с узловыми фасонками (марка 22) (фиг. 1).



Фиг. 1.

Стержни этой фермы имеют обычное в клепанных стрепилах сечение, т. е. два уголка, расположенные тавром. Для растянутого пояса



Фиг. 2.

и сжатых раскосов приняты уголки  $75 \times 75 \times 10$ , а для сжатого пояса и растянутых раскосов уголки  $65 \times 65 \times 8$ . Прикрепление в узлах осуществлено при помощи узловых фасонок, толщиною 10 м.м., пропущенных в зазор между уголками. Фотография одного из узлов фермы дана на фиг. 2.

Уголки сжатых элементов соединены между собою отдельными сваренными липонками длиною по 50 м.м. В нижнем поясе установлено 3 шпонки на панель, а в раскосах — по 2 шпонки. Вес фермы 350 кг, из которых на пояса, раскосы и стойки приходится 296 кг, а на узловые фасонки, окаймляющие уголки и т. п. 54 кг.

**Сечения стержней тавровой фермы с узловыми фасонками (марка 22).**

Усилия и напряжения даны для нагрузки  $P = 90$  тон.

**Тип А**  
 $J_{min}$  — —  $75 \times 75 \times 10$

**Тип В**  
 $J_{min}$  — —  $65 \times 65 \times 8$

Таблица № 1.

Стержень фермы	Усилия тон.	Тип сече- ния	Для всего сечения или для одной ветви	$\varphi$	$J_{min}$ см <sup>4</sup>	$r_{min}$ см	$I$ см	$l/r$		$\psi$	Напряжение	
								частное	общее		В стерж. кг/см <sup>2</sup>	В шпак кг/см <sup>2</sup>
Нижний пояс . .	— 60,8	B	все сечение	19,66	75,32	1,95	135	69	72	0,71	4390	970
Верхний пояс . .	+ 121,6	A	одна ветвь	9,83	15,63	1,26	26	21	—	—	+ 4300	780
Всходящий раскос,	+ 75,6	B	—	28,22	—	—	—	—	—	—	+ 4180	1880
Нисходящий раскос . .	— 75,6	A	все сечение	28,22	142,4	2,25	168	71	79	0,68	-3940	1860
Стойка . .	0	B	—	19,66	—	—	—	—	—	0	0	0

Длина швов расчигивалась по сечению стержней по следующим формулам:

$$\text{для растянутых стержней} \quad l = \frac{\omega \sigma}{\delta_0 \sigma_m};$$

$$\text{для сжатых стержней} \quad l = \frac{\omega \varphi \sigma}{\delta_0 \sigma_m},$$

$l$  — общая длина швов для прикрепления стержня;  
 $\omega$  — площадь сечения стержня;  
 $\varphi$  — коэффициент уменьшения напряжения на продольный изгиб;  
 $\sigma$  — временное сопротивление материала стержня;  
 $\sigma_m$  — временное сопротивление материала шва;  
 $\delta_0$  — наименьшая толщина шва.

Швы для приварки уголков к узловым фасонкам расположены с обеих сторон полки, прилегающей к фасонке (фиг. 3) и работают на срез.

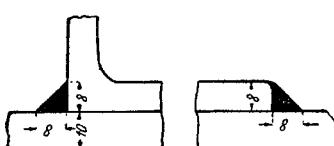
Для центральности прикрепления, длины  $l_1$  и  $l_2$  этих швов мы приняли обратно пропорциональными расстояниям швов до центра тяжести уголка, т. е.:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

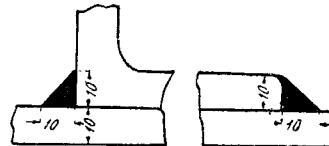
Эта закономерность вполне выдержанна для раскосов фермы. В приварке же поясов к узловым фасонкам допущена ошибка; как видно на фиг. 1, сплошными сделаны швы, отстоящие дальше от центра тяжести уголка, а прерывистыми те, которые находятся ближе. Вполне понятно, что следовало сдвинуть как раз наоборот. Поперечное сечение швов мы приняли в виде равнобедренного прямоугольного треугольника (фиг. 4 и 5). Наименьшая толщина  $\delta_0$  шва равна нерпендикуляру, опущенному из вершины прямого угла на гипотенузу.

Размеры поперечного сечения швов для прикрепления уголков  $75 \times 75 \times 10$  даны на фиг. 5, а для прикрепления уголков  $65 \times 65 \times 8$  на фиг. 4. Приведем расчет швов для прикрепления сжатого раскоса 1—4 из двух уголков  $75 \times 75 \times 10$ . Общая длина швов в прикреплении

$$l = \frac{\omega \cdot \sigma}{\delta_0 \cdot \sigma_m} = \frac{28,22 \cdot 0,71 \cdot 4500}{0,707 \cdot 2200} \approx 59 \text{ см}$$



Фиг. 4.



Фиг. 5.

на один уголок  $1/59 = 29,5 \text{ см}$ :

$$l_2 = \frac{l \cdot \delta_0}{b} = \frac{29,5 \cdot 2,21}{7,5} \approx 9 \text{ см}$$

$$l_1 = l - l_2 = 29,5 - 9 = 20,5 \text{ см.}$$

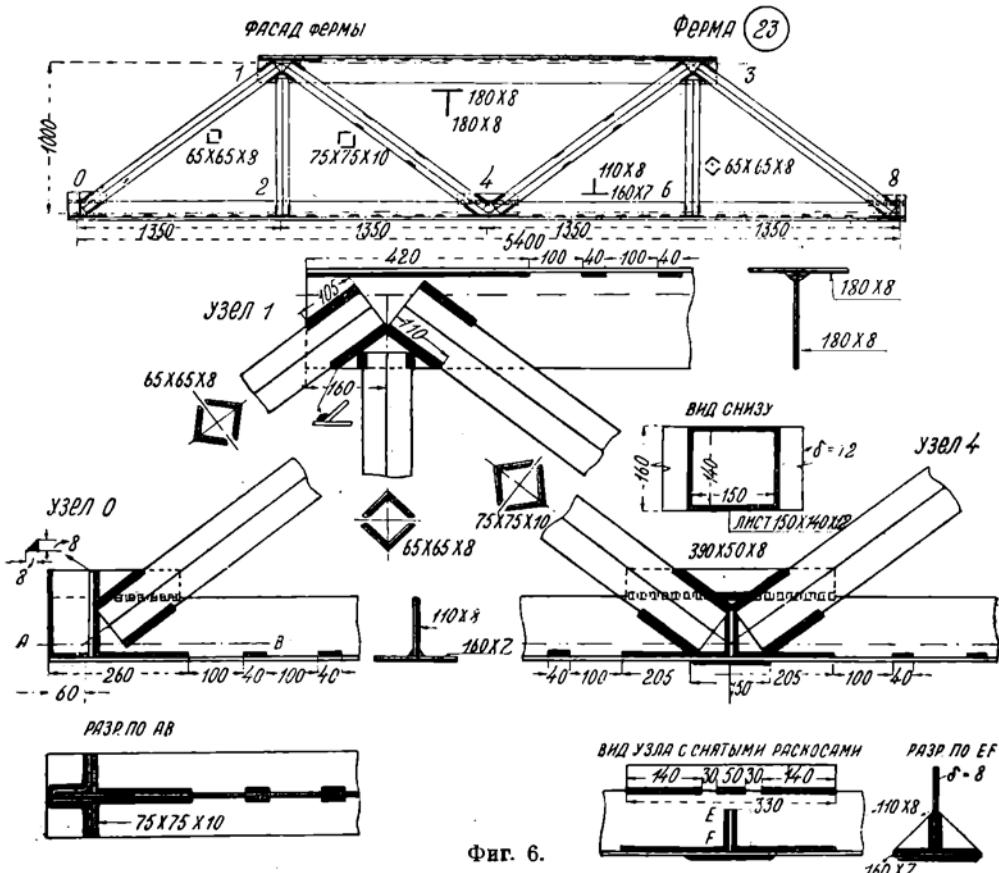
Напряжение в шве на срез:

$$n = \frac{S}{\delta_0 \cdot l} = \frac{75,6}{0,707 \cdot 59} = 18,0 \text{ кг/см}^2 < 2200$$

Швы подобраны прочнее стержней, при чем запас прочности для стержней от 1,02 до 1,14 и для швов от 1,17 до 2,27.

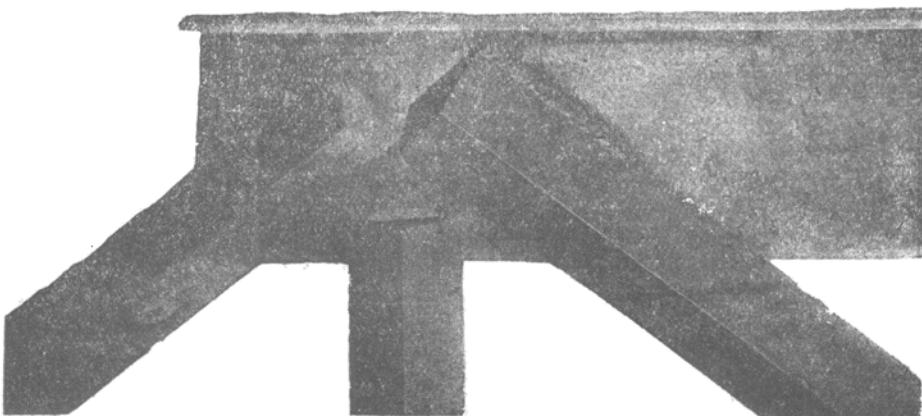
В) Ферма (фиг. 6) с тавровыми поясами из двух листов (марка 23). Особенностью этой фермы являются тавровые пояса, составленные из двух листов, сваренных между собой прерывистым швом в виде шпонок длиною 40 мм, с расстоянием между ними 100 мм.

Около узлов применен сплошной шов для лучшей передачи усилия горизонтальному листу. Раскосы и стойки подобраны трубчатого сечения из двух уголков, обжимающих стенку поясов и приваренных к ней. Фотография одного из узлов фермы дана на фиг. 7.



Фиг. 6.

В тех узлах, где стенка пояса недостаточна для приварки раскосов и стоек, дана узкая вертикальная прокладка, шириной 50 мм, приваренная в притык в стенке пояса. Уголки сжатых раскосов сварены по своей длине в двух местах шпонками, длиною по 50 мм. Данные о стержнях фермы помещены в таблице 2. Тавровые пояса,

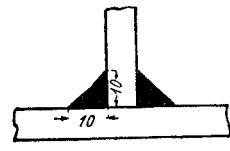


Фиг. 7.

сваренные из 2 листов имеют следующие преимущества: 1) они имеют очень высокий коэффициент  $\varphi$ , так что материал использован наилучшим образом и 2) можно обойтись без узловых фасонок и уменьшить вес фермы. Во избежание выпучивания листов сжатого пояса, их толщина и ширина проверялась на устойчивость.

Кроме того, размеры листов пояса подобраны так, чтобы моменты инерции сечения пояса относительно вертикальной и горизонтальной осей мало отличались:

$$J_{min} = 238,9 \text{ см}^4, \quad \text{а } J_{max} = 259,9 \text{ см}^4.$$



Фиг. 8.

Вес фермы получился 316 кг. Из них на пояса, раскосы и стойки приходится 303 кг, а на прокладки, окаймляющие уголки и т. д. — 13 кг. Поперечное сечение шпонок, связывающих между собой листы поясов, приведено на фиг. 8.

#### Сечения стержней фермы с тавровыми поясами из двух листов (марка 23).

Усилия и напряжения даны для нагрузка  $P = 90$  тонн.

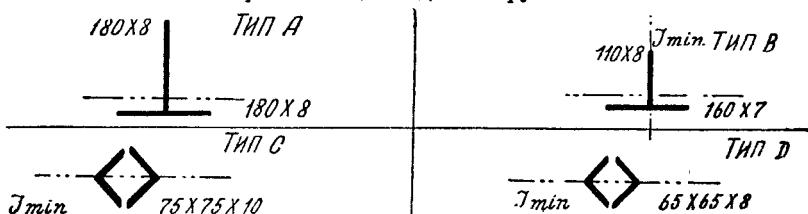


Таблица № 2.

Стержень фермы	Усилие тн.	Тип сече- ния	Для всего сечения или для одной ветви	$\omega$ см <sup>2</sup>	$J_{min}$ см <sup>4</sup>	$I_{min}$ см	$l$ см	$I/r$ Частноз Общее	$\varphi$	Напряжения в стер- жне кн/см <sup>2</sup>	Напряжения в плах- тах кн/см <sup>2</sup>
Нижний пояс . . .	— 60,8	<i>L</i>	—	20,0	238,9	3,45	185	—	39	0,82 — 3710	—
Верхний пояс . . .	+ 121,6	<i>A</i>	—	28,8	—	—	—	—	—	+ 4220	—
Входящий раскос . . .	+ 75,6	<i>D</i>	—	19,66	—	—	—	—	—	+ 4180	1:00
Исходящий раскос . . .	— 75,6	<i>C</i>	Все сечение Одна ветвь	28,22 14,11	225,4 29,7	2,83 1,45	168 44	59 30	67	0,73 — 3670	1720
Стойка . . .	0	<i>D</i>	—	19,66	—	—	—	—	—	0	0

Сечение шва (фиг. 9), служащее для прикрепления раскосов и стоек к поясам, получено так:

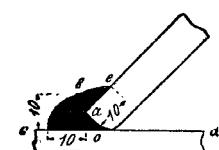
Из точки *a* опускаем перпендикуляр на плоскость *cd*. Из точки *b*, радиусом 10 м.м описываем дугу окружности до точки *c*. Точку *b* соединяем с точкой *c*, взятой на расстоянии 10 м.м от края уголка. Наименьшая толщина этого шва  $t_o = 10$  м.м.

Приведем расчет прикрепления таким швом сжатого раскоса 1—4 из двух уголков 75×75×10. Общая длина швов в прикреплении

$$l = \frac{\omega \varphi \sigma}{\delta_o s_m} = \frac{28,22 \cdot 0,73 \cdot 4500}{1 \cdot 2200} = 4,1 \text{ см.}$$

Таких швов в прикреплении 4. Длина одного шва

$$l_1 = \frac{1}{4} \cdot 4,1 \approx 1,1 \text{ см}$$



Фиг. 9.

Напряжение в шве

$$n = \frac{75,6}{44,1} = 1720 \text{ кг/см}^2 < 2200$$

Швы спроектированы прочнее стержней, при чем запас прочности  
для стержней . . . . . 1,05 до 1,24,  
для швов . . . . . 1,22 до 1,28.

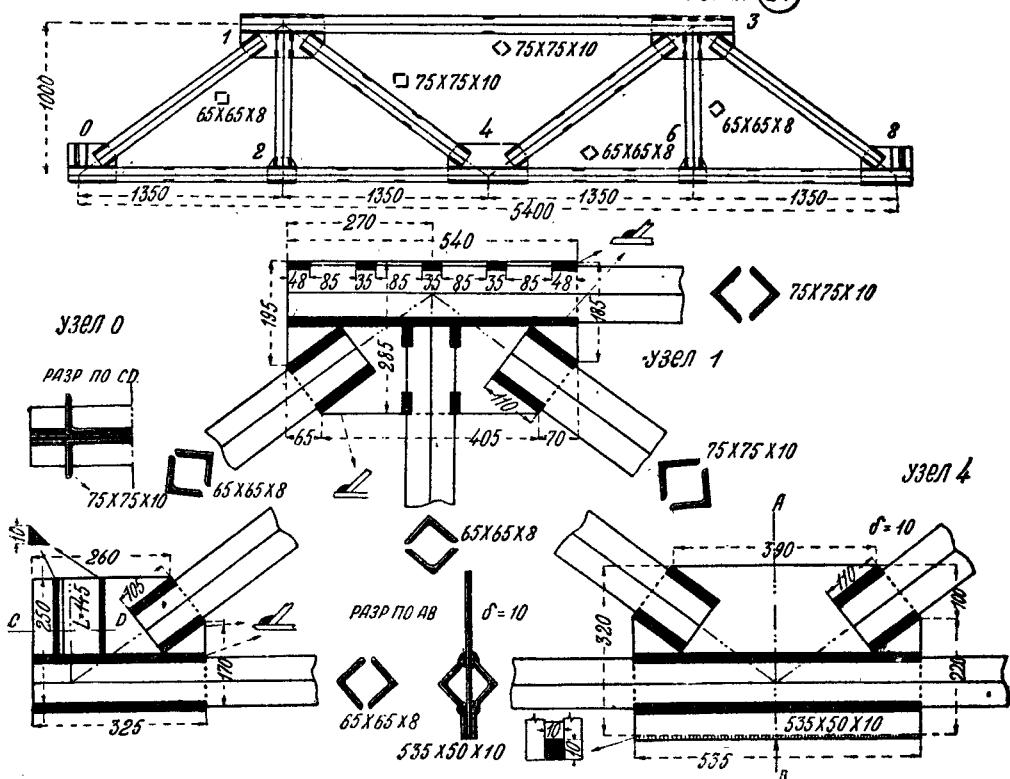
Сечения стержней трубчатой фермы с узловыми фасонками. (марка 24).



Таблица № 3.

Стержень фермы	Усилие тн.	Тип сече- ния	Все сечение или одна ветвь	$\phi \text{ см}^2$	$J_{\text{шип}} \text{ см}^4$	$\vartheta_{\text{мин}} \text{ см}$	$l \text{ см}$	$l_{tr}$ Частное	Общее	Напряжение В стерж. $\text{кг/см}^2$	Напряжение В швах $\text{кг/см}^2$
Нижний пояс . . .	— 60,8	B	Все сечение	19,66	119,4	2,46	135	55	62	0,74	— 4180 476
Верхний пояс . . .	+ 121,6	A	Одна ветвь	9,83	15,63	1,26	35	28	—	—	+ 4300 834
Восходящий раскос . . .	+ 75,6	B	—	28,22	—	—	—	—	—	—	+ 4180 1800
Нисходящий раскос . . .	— 75,6	A	Все сечение	19,66	—	—	—	—	—	—	—
Стойка . . .	—	B	Одна ветвь	28,22 225,4	225,4	2,83	168	59	64	0,74	— 3830 1720
				14,11	29,7	1,45	36	25	—	—	—

ФЕРМА 24

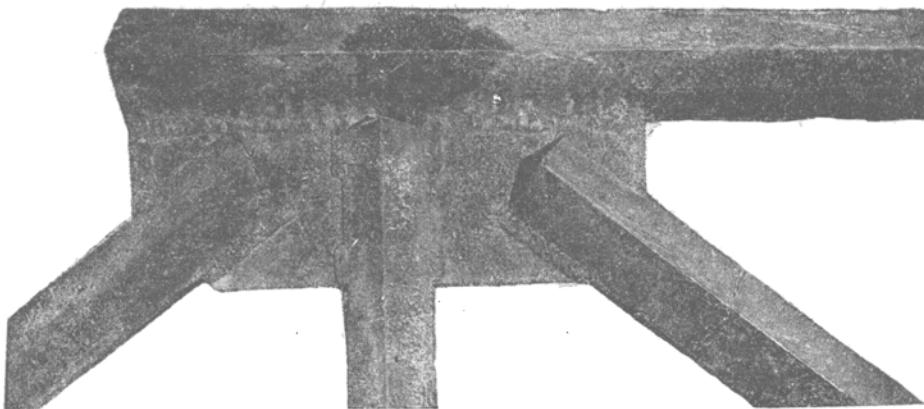


Фиг. 10.

с) Ферма трубчатая с узловыми фасонками (марка 24)  
(фиг. 10).

Все стержни этой фермы подобраны трубчатого сечения из 2-х уголков. Прикрепление в узлах осуществляется при помощи узловых фасонок, толщиною 10 мм, пропущенных в зазор между уголками. Данные о стержнях фермы помещены в таблице 3. Фотография одного из узлов дана на фиг. 11.

Уголки сжатых стержней соединены по своей длине в двух местах швом длиною 50 мм. Вес фермы получился 348 кг, из которых на пояса, раскосы и стойки приходится 285 кг, а на фасонки, окаймляющие уголки и т. п.— 63 кг. Для приварки стержней к узловым фасонкам, пользуясь швом, изображенным на фиг. 9. Расчет его ничем



Фиг. 11.

не отличается от примера, приведенного при описании фермы 23 с тавровыми поясами из двух листов. Напряжения в швах приведены в таблице 3. Швы спроектированы прочнее стержней, при чем запас прочности для стержней от 1,03 до 1,18: для швов от 1,22 до 4,62.

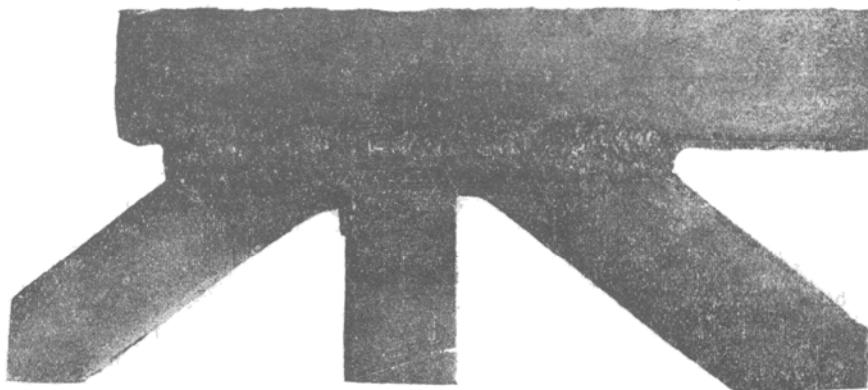
Следует еще добавить, что в узле 1 (фиг. 10) следовало швы, приваривающие пояса к фасонке, делать либо оба сплошными, либо оба прерывистыми, чтобы не нарушать центральности прикрепления. Приварка, принятая в узле 1, неправильна.

д) Ферма трубчатая без узловых фасонок (марка 25)  
(фиг. 12).

Все стержни этой фермы подобраны трубчатого сечения из двух уголков. Между уголками нет зазора и они связаны между собой шпонками, длиною 35 мм с расстоянием между ними 100 мм. В узлах раскосы косо срезаны и по своему контуру приварены к поясам продольными и поперечными швами. Между поясом и концом раскоса и стойки положена прокладка, так как ширина уголков раскоса и стойки равна ширине поясных уголков, и поэтому нельзя было бы дать продольные швы. Фотография одного из узлов дана на фиг. 13.

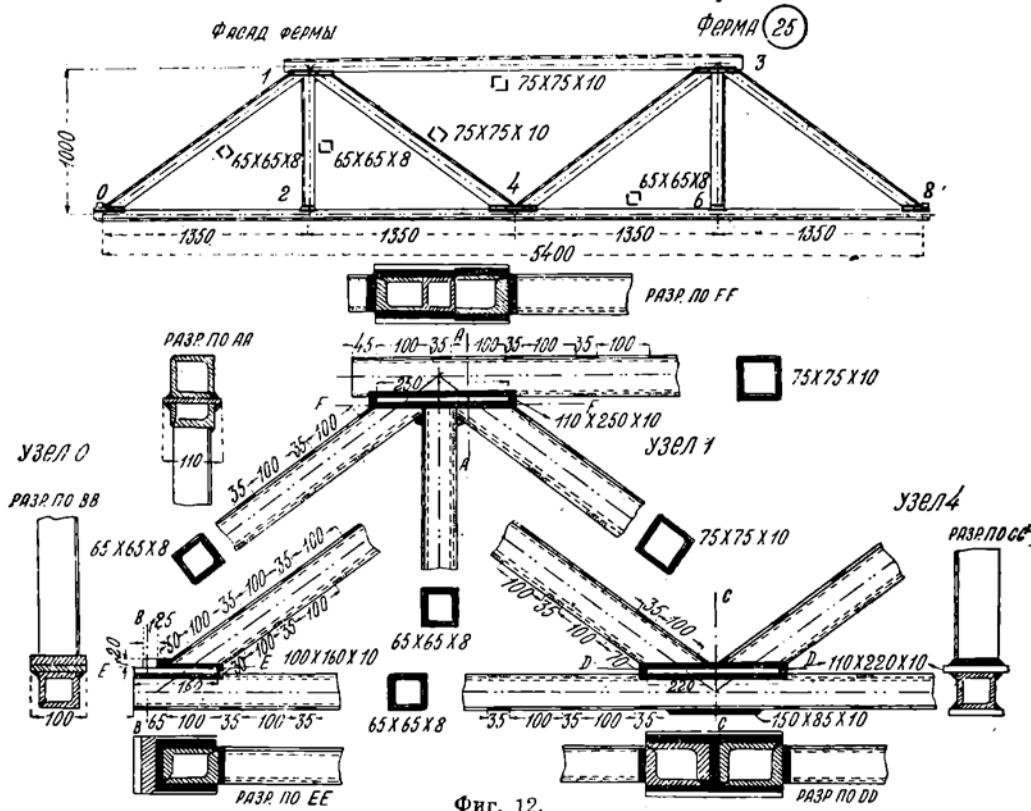
Благодаря отсутствию узловых фасонок вес фермы получился только 317 кг, из которых на пояса, стойки и раскосы приходится 305 кг, а на прокладки и прочие вспомогательные части— 12 кг. Данные о сечениях стержней помещены в таблице 4.

Расчет швов трубчатой фермы (25) без узловых фасонок ШВЫ, прикрепляющие раскосы к узлу, работают частью на разрыв, частью на срезывание и частью на разрыв силой, косо приложенной к шву. Благодаря столь неопределенной работе швов, мы приняли такой



Фиг. 13.

метод расчета: умножая рабочее сечение каждого шва на напряжение мы определяли усилие, которое может выдержать каждый шов в отдельности. Складывая эти усилия, мы получили общее усилие, которое выдерживают все швы данного прикрепления. Это усилие должно быть не меньше усилия в стержне. Для швов, к которым



Сечения стержней трубчатой формы без узловых фасонок (марка 25).

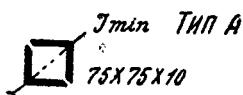
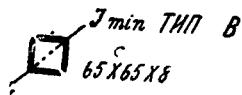


Таблица № 4.

Стержень фермы	Усилие тн.	Тип сече- ния	Все сечения и ни одна ветвь	$\omega \text{ см}^2$	$J_{\min} \text{ см}^4$	$r_{\min} \text{ см}$	$l \text{ см}$	$t/r$	Частное Общее	$\sigma$	Напряж- ение в стержнях $\text{кг/см}^2$	Какое при- крепление	Усилие вы- держив. щим тн.
Нижний пояс . .	— 60,8	<i>B</i>	—	19,66	119,4	2,46	135	—	55	0,77	4020	—	69,1
Верхний пояс . .	+ 121,6	<i>A</i>	—	28,22	—	—	—	—	—	—	+ 4300	—	123,6
Восходящий раскос . .	+ 75,6	<i>B</i>	—	19,66	—	—	—	—	—	—	+ 4180	верх	78,9
Нисходящий раскос . .	— 75,6	<i>A</i>	—	28,22	225,4	2,83	168	—	59	0,75	— 3570	низ	98,4
Стойка . .	0	<i>B</i>	—	19,66	—	—	—	—	—	—	0	—	78,9
												низ	90,2

сила приложена под углом, мы расчитывали допускаемое напряжение по формуле:

$$n_k = n_{\text{спр}} + (n_{\text{раст}} - n_{\text{спр}}) \cos \alpha,$$

где  $n_{\text{спр}}$  — напряжение на срез

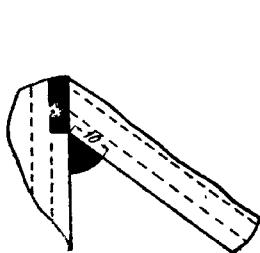
$n_{\text{раст}}$  — на растяжение

$\alpha$  — угол между направлением силы и направлением чистого растяжения.

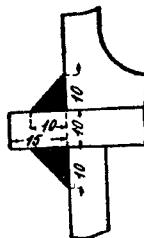
Для нашего случая

$$n_k = 2200 + (3000 - 2200) \frac{100}{168} = 2675 \text{ кг/см}^2.$$

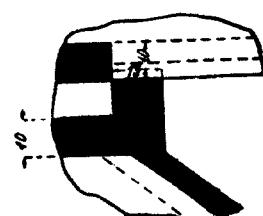
Приведем расчет верхнего прикрепления сжатого раскоса 1 — 4. Детали швов, приваривающих этот раскос к стойке и поясу, даны на фиг. 14 — 15.



Фиг. 14.



Фиг. 15.



Усилие в поперечном шве, приваривающем раскос к поясу,

$$1,3 \cdot 6,5 \cdot 300 = 25350 \text{ кг.}$$

Усилие в продольном шве, приваривающем раскос к поясу,

$$2 \cdot 0,707 \cdot 9 \cdot 2675 = 34040 \text{ кг.}$$

Усилие в шве, приваривающем раскос к стойке,

$$1,65 \cdot 3000 = 19500 \text{ кг.}$$

Полное усилие, приходящееся на верхнее прикрепление раскоса,

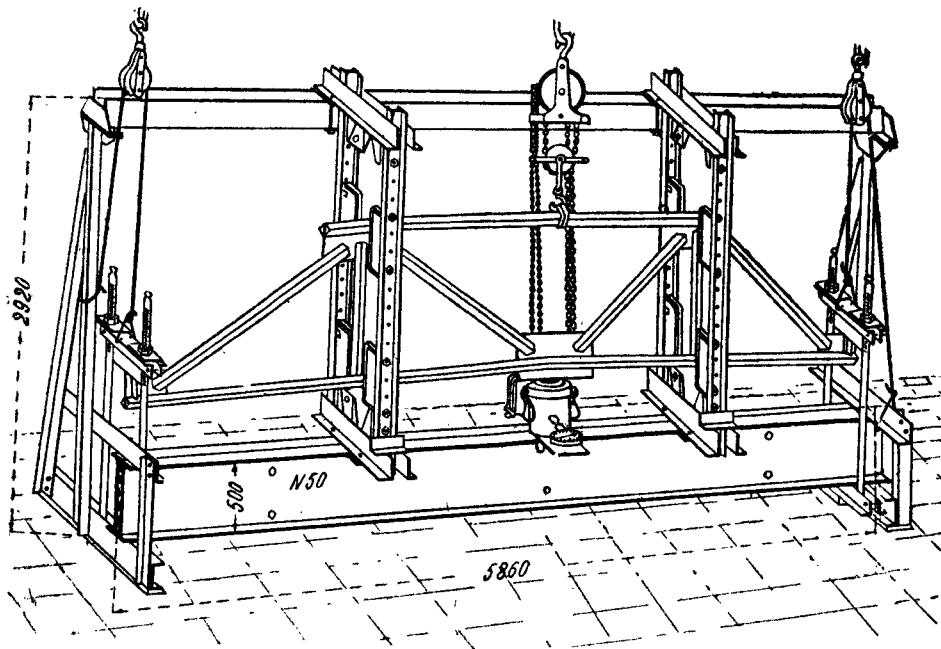
$$25350 + 34040 + 19500 = 78890 \text{ кг.} > 75600$$

Усилия, соответствующие всем прикреплениям раскосов, даны в таблице 4.

Швы спроектированы прочнее стержней, при чем запас прочности для стержней от 1,03 до 1,26 и для швов от 1,02 до 1,31.

#### § 4. Программа и метод испытания.

При испытании ферм мы измеряли нагрузки, прогибы и напряжения. Нагрузки измерялись по манометру, связанному с домкратом, производившим нагрузку. Прогибы среднего узла 4 фермы мы измеряли по отношению к прямой, соединяющей опорные узлы фермы, чтобы исключить влияние, оказываемое смятием опорных частей



Фиг. 16.

и растяжением опорных тяжей. Для измерения прогиба ферм, мы пользовались тремя трубами от прибора Мартенса, из которых одна устанавливалась против среднего узла 4 и две трубы — против опорных узлов. В этих трех узлах были установлены металлические рейки с полумиллиметровыми делениями. Прогиб среднего узла определялся как разность между показаниями средней трубы и полу-суммой показаний крайних труб.

Напряжения мы измеряли с помощью приборов Хуггенбергера, установленных на крайних фибрах целого ряда сечений. Расположение сечений и приборов указаны дальше при описании результатов испытания. Там же описано определение осевых напряжений по измеренным фибральным. Отсчеты по трубам Мартенса и по приборам Хуггенбергера брались по мере возрастания нагрузки приблизи-

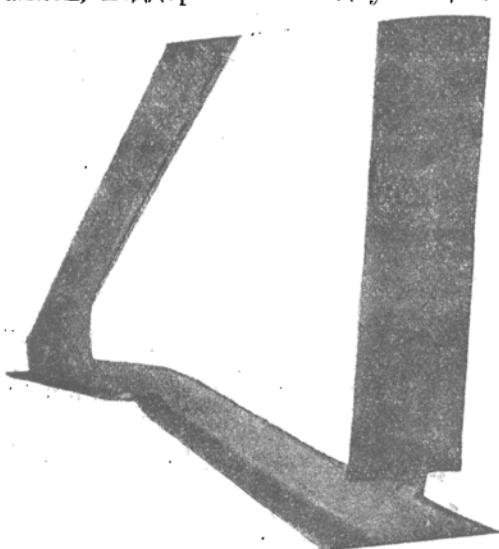
тельно через каждые 9 тонн. Измерение напряжений производилось до нагрузки в 46,9 тонн. После этого приборы Хуггенбергера снимались, чтобы не повредить их при разрушении фермы. Прогибы измерялись вплоть до разрушения.

Домкратный станок для испытания ферм. Основным затруднением при испытании одиночных ферм является то, что при действии нагрузки они стремятся выйти из вертикальной плоскости, после чего дальнейшее испытание делается невозможным. Поэтому для испытания ферм мы спроектировали специальный домкратный станок (фиг. 16).



Фиг. 17.

Основной частью этого станка является контр-балка, состоящая из двух двутавровых балок № 50, на которые посередине установлен домкрат, выгибающий фермы вверх. Концы фермы обжимаются парными тяжами, пропущенными вниз через поперечину, расположенную под контр-балкой. Для удержания фермы в вертикальном положении имеется две вертикальные рамы, которые можно передвигать вдоль фермы. Каждая рама состоит из двух стоек с приболченными к ним щеками и двух горизонтальных распорок: верхней и нижней. При нажатии пояса фермы на обжимающие его щеки, горизонтальное давление пояса стойкой рамы передается от части вниз на контр-балку и от части наверх, где оно воспринимается особой двутавровой балкой, поддерживающей двумя треугольными опорами. При прогибе фермы под действием домкрата ее пояса скользят по щекам. Чтобы уменьшить трение, между поясами и щеками мы прокладывали паклю, пропитанную маслом.



Фиг. 18.

## § 5. Результаты испытания.

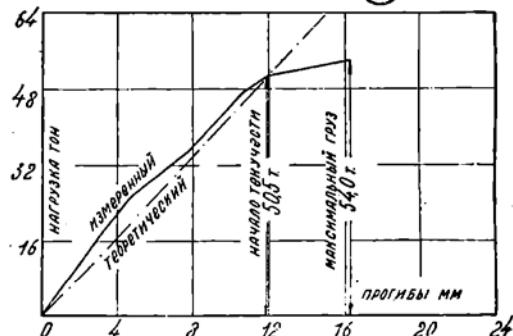
а) Тавровая ферма с узловыми фасонками (марка 22). Сечения стержней в точности соответствуют проектным. Разрушение (фиг. 17 и 18) наступило от того, что пояс 6—8 выпучился как в плоскости, так и из плоскости фермы, при чем стрела его горизонтального прогиба = 46 м.м., а стрела вертикального прогиба = 24 м.м.

Вследствие изгиба пояса изогнулся также раскос 3—8. Стрела его прогиба в плоскости фермы = 13 м.м., а из плоскости фермы — 7 м.м. В швах фермы никаких повреждений не обнаружено.

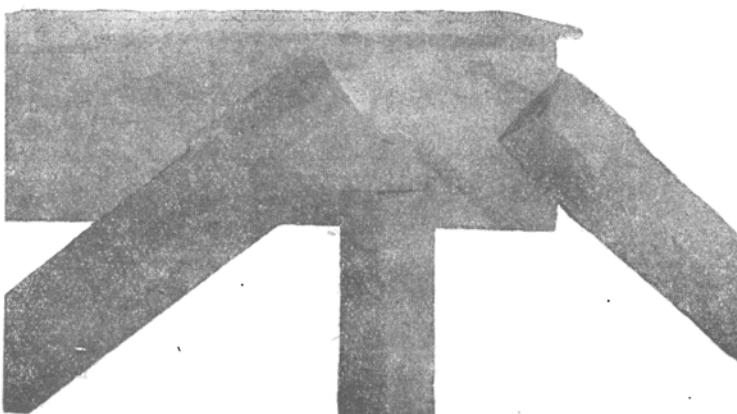
Диаграмма прогибов среднего узла фермы помещена на фиг. 19. Измеренный груз в начале текучести = 50,5 тонн. После максимального груза в 54 тонн, нагрузка начала резко падать.

Сечения, в которых были установлены приборы Хуггенбергера, и расположение приборов в этих сечениях показаны в заголовке таблицы 5. В этой же таблице помещены фибровые напряжения, измеренные во всех сечениях, а также выведенные из них основные напряжения при нагрузке  $t = 35,1$  тонн. Это была самая высокая нагрузка, при которой почти ни в одной фибре напряжения не превосходили предела текучести. Для тавровых сечений из двух уголков основное напряжение определялось так: из двух напряжений в крайних фибрах горизонтальных полок выводилось среднее, соот-

ПРОГИБЫ ФОРМЫ (22)



Фиг. 19.



Фиг. 20.

ветствующее вертикальной оси сечения. Из этого напряжения и напряжения в крайней фибре вертикальной полки уголков выводилось напряжение в центре тяжести сечения, которое являлось основным.

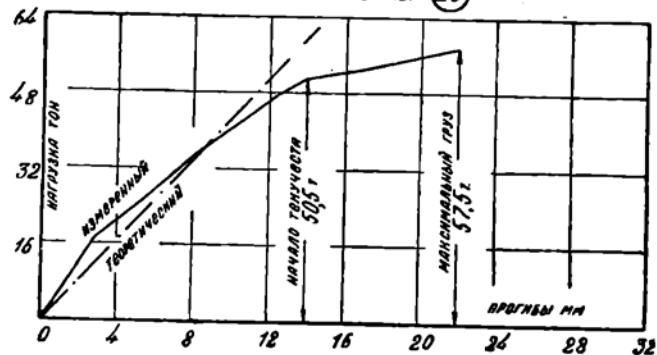
Сечение VI опорного раскоса пришлось исключить из рассмотрения, так как напряжение в этом сечении, измеренное прибором 3,



Фиг. 21.

Шатон и Петров - 2.

ПРОГИБЫ ФОРМЫ (23)



Фиг. 22.

Измеренные напряжения в сечениях тавровой фермы 22 с узловыми фасонками при нагрузке  $P = 35,1$  тон.

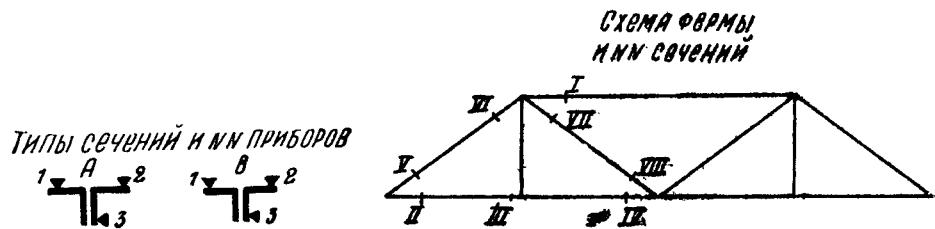


Таблица № 5.

Стержни-фермы	Сечение		Расстояние сечения от узла см	№№ приборов	Расстояние фибры мм	Фибровые напряжения кг/см <sup>2</sup>	Основные напряжения кг/см <sup>2</sup>
	Тип	№№					
Верхний пояс . . . . .	A	I	35	1 2 3	6 5 6	+ 1347 + 1806 + 1142	+ 1487
	B	II	35	1 2 3	5 4 6	- 1313 - 679 - 786	- 924
	B	III	8	1 2 3	4 7 7	- 978 - 1199 - 607	- 934
Нижний пояс . . . . .	B	IV	34	1 2 3	5 5 8	- 1210 - 668 - 548	- 807
	B	V	37	1 2 3	6 6 9	+ 2107 + 1328 + 668	+ 1361
	B	VI	36	1 2 3	7 6 8	+ 637 + 1076 -	-
Восходящий раскос . . .	A	VII	35	1 2 3	5 7 8	- 355 - 519 - 1544	- 804
	A	VIII	36	1 2 3	8 6 9	- 1194 - 505 - 764	- 825

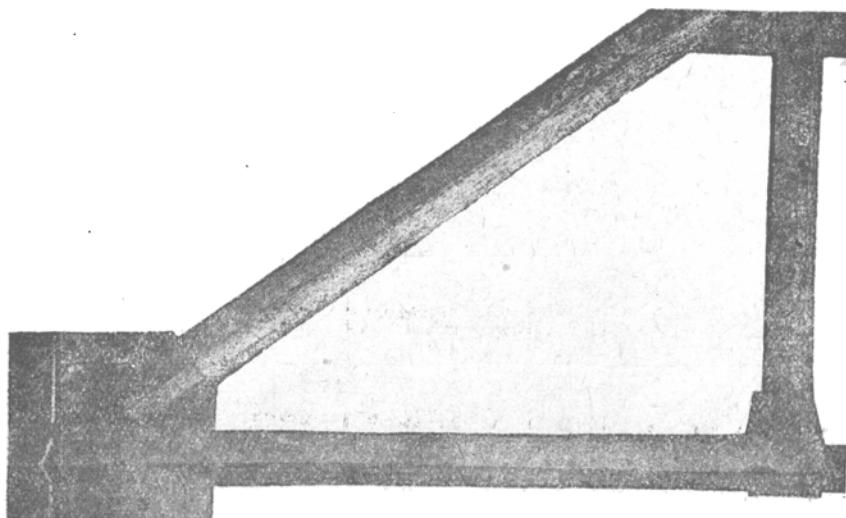
значительно превзошло предел текучести, что об'ясняется выгибом этого раскоса.

в) Ферма с тавровыми поясами из двух листов и трубчатыми раскосами и стойками (марка 23). Обмер показал, что все сечения проектные, кроме нижнего сжатого пояса, в котором вместо листов  $160 \times 7$  и  $110 \times 8$  применены листы  $160 \times 6$  и  $110 \times 10$ . Этот пояс имеет  $\omega = 20,6$ .

$J_{min} = 205 \text{ см}^4$  и  $\varphi = 0,91$ . Разрушение фермы произошло вследствие обрыва швов, прикрепляющих раскос 0—1 к верхнему растя-

нутому поясу. Картина разрушения видна из фиг. 20. Эти швы разрушились, вследствие недостаточности их сечения, сравнительно с проектным сечением. Эти швы сделаны почти плоскими, как показано на фиг. 21 и не имели выпуклости, показанной в проекте. Кроме того, верхний тавровый пояс фермы сделан на два сантиметра короче, чем по проекту, отчего швы разрушившегося прикрепления оказались короче, чем нужно. Правда, нижние швы этого прикрепления сварены длиннее проектных, но это не покрыло общего дефицита в площади сечения шва, а только нарушило центральность прикрепления. Вместо проектной площади сечения швов  $42 \text{ см}^2$ , фактическая площадь разрыва по наплавленному металлу оказалась  $23 \text{ см}^2$ . Ослабление шва по сравнению с проектом =  $45\%$ . В момент разрушения усилие в раскосе = 48,4 т., так что напряжение пострадавших швов на срез было  $\frac{48400}{23} = 2104 \text{ кг}/\text{см}^2$ , что указывает на удовлетворительное качество швов. Действительно в этих швах не обнаружено непроваров. После отрыва раскоса 1-0 нижний пояс 0-2 изогнулся в узле 2. Выпучивания сжатых стержней не произошло.

Диаграмма прогибов среднего узла 4 фермы приведена на фиг. 22. Измеренный груз в начале текучести = 50,5 тонн., а максимальный груз = 57,5 тонн.



Фиг. 23.

Сечения, в которых стояли приборы Хуггенбергера, расположение приборов в этих сечениях, измеренные фибровые напряжения и выведенные из них основные напряжения даны в таблице 6. Основные напряжения в тавровых поясах выводились из трех приборов по тому же методу, что и в сечениях тавровой фермы 22 с узловыми фасонками. В трубчатых сечениях раскосов и стоек из двух напряжений, измеренных на краях одной из полок уголка, выводилось напряжение по середине этой полки. Среднее арифметическое из напряжений по середине полок обоих уголков принималось за основное напряжение. Сечение II нижнего пояса пришлось исключить из рассмотрения, так как напряжение, измеренное прибором 1, сильно преувеличило предел текучести; в то время как напряжения, измеренные приборами 2 и 3, оказались очень низкими. Это явление объясняется тем, что ферму повело в сторону. По той же причине напряжения нижнего пояса оказались вообще несколько искаженными, и в сечении V приборы 1 и 3 показали сильное перенапряжение.

Измеренные напряжения в сечениях фермы 23 с тавровыми поясами из двух листов при нагрузке  $P = 35,1$  тонн.

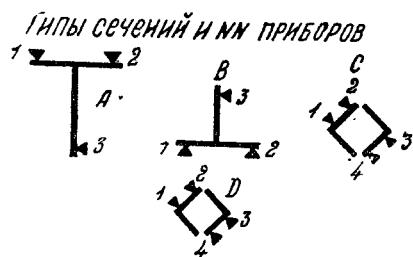
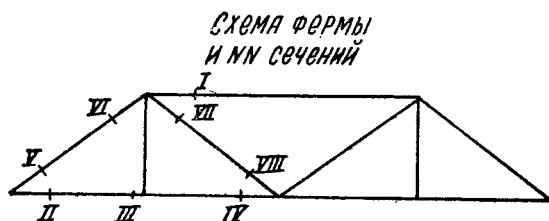


Таблица № 6.

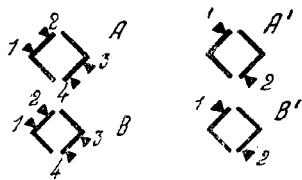
Стержни фермы	Сечение		Расстояние сечений от узла	№№ прибо- ров	Расстояние фибры ж.	Фибровые напряже- ния кг/см <sup>2</sup>	Основные напряже- ния кг/см <sup>2</sup>
	Тип	№№					
Верхний пояс . . . . .	A	I	40	1	9	+ 1412	
				2	10	+ 1689	
				3	6	+ 1104	+ 1420
	B	II	40	1	10	—	
				2	6	— 132	
				3	6	— 82	
Нижний пояс . . . . .	B	III	8	1	6	— 1084	
				2	9	— 488	— 818
				3	5	— 896	
	B	IV	40	1	5	— 848	
				2	5	— 982	— 814
				3	4	— 599	
Восходящий раскос . . .	D	V	40	1	5	— 2511	
				2	5	— 792	
				3	6	— 1554	+ 1439
				4	4	— 825	
	D	VI	40	1	5	+ 962	
				2	4	+ 1426	
				3	5	+ 1933	+ 1361
				4	5	+ 1122	
Нисходящий раскос . . .	C	VII	40	1	6	— 535	
				2	5	— 869	
				3	7	— 935	— 786
				4	6	— 801	
	C	VIII	40	1	4	— 757	
				2	6	— 752	
				3	6	— 1171	
				4	6	— 860	— 886

с) Трубчатая ферма с узловыми фасонками (марка 24). Сечения стержней, выполнены по проекту. Эта ферма не доведена до полного разрушения, и ее испытание прервано после того, как в элементе 4—6 сжатого пояса около узла 4 обнаружено небольшое

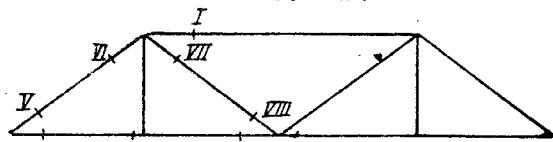
выпучивание, заметное на фиг. 23 (отмечено меловым крестом). Диаграмма прогибов среднего узла 4 приведена на фиг. 24. Измеренный груз в начале текучести = 50,5 тонн. После прогиба стал рости очень быстро вследствие текучести верхнего растянутого пояса. Нагрузка была доведена до 53,8 тонн. Сечения, в которых измерялись напряжения, расположение приборов Хуггенбергера в этих сечениях и величина фибрьных и осевых напряжений даны в таблице 7. В труб-

**Измеренные напряжения в сечениях трубчатой фермы 24 с узловыми фасонками при нагрузке  $P = 35,1$  тонн.**

**Типы сечений и нн приборов**



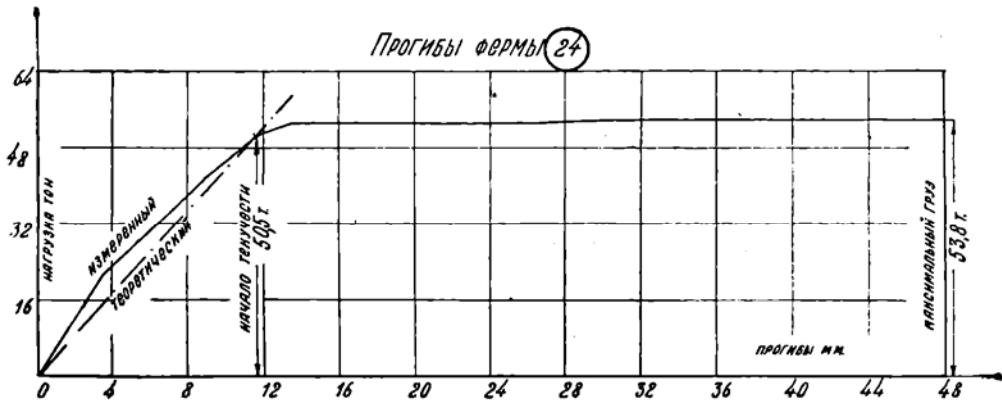
**Схема фермы  
и нн сечений**



**Таблица № 7.**

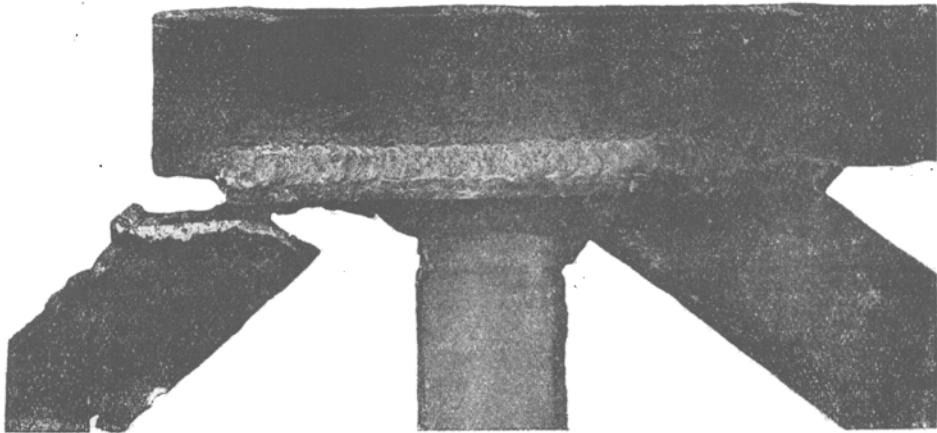
Стержни фермы	Сечение		Расстояние сечений от узлов см	№№ приборов	Расстояние фибрь №№	Фибрьные напряжения $\kappa_t/\text{см}^2$	Основные напряжения $\kappa_t/\text{см}^2$
	Тип	№№					
Верхний пояс . . . . .	A	I	40	1	3	+ 1321	
				2	4	+ 1453	+ 1315
				3	10	+ 1454	
				4	8	+ 1128	
	B	II	35	1	4	- 789	
				2	4	- 785	- 969
				3	5	- 1484	
				4	15	- 938	
Нижний пояс . . . . .	B	III	12	1	6	- 898	
				2	5	- 1393	- 1057
				1	4	363	
				2	4	- 691	
	B	IV	40	3	4	- 1312	
				4	16	- 1545	- 993
				1	9	+ 985	
				2	4	+ 1.65	+ 1268
Восходящий раскос . . .	B	V	35	3	4	+ 1258	
				4	13	+ 1001	
				1	6	+ 865	
				2	5	+ 1699	+ 1443
	B	VI	40	3	3	+ 1726	
				4	14	+ 1541	
				1	6	- 1218	
				2	10	- 856	- 838
Нисходящий раскос . . .	A	VII	40	1	4	- 553	
				2	6	- 678	
				3	5	- 1276	- 810
				4	17	- 831	

чатых сечениях, где было установлено по 4 прибора, основные напряжения выводились так же, как для трубчатых элементов фермы 23 с тавровыми поясами. Ферма работала хорошо и равномерно без резких фибровых перенапряжений. Некоторые швы были сварены плоскими, неполными, но все же никаких повреждений в них не обнаружено. Это указывает на хорошее качество сварки.



Фиг. 24.

d) Трубчатая ферма без узловых фасонок (марка 25). Сечения всех стержней выполнены по проекту. Разрушение произошло при грузе 50,5 тонн. до начала текучести, вследствие отрыва растянутого раскоса 0—1 от пояса в узле 1 (фиг. 25 и 26). Отрыв



Фиг. 25.

произошел вследствие значительного непровара одного из продольных швов в конце раскоса. На фиг. 26 видно, что в этом шве (левом) наплавленный металл почти не проник в основной. Проектная площадь этого шва  $6,4 \text{ см}^2$ . Действительная его площадь оказалась  $2 \text{ см}^2$ , т. е. величина непровара составляет  $67,4\%$  от проектной площади шва. Второй продольный шов оказался проваренным полностью; зато непровары, хотя и менее значительные, обнаружены в поперечных швах, прикреплявших конец оторвавшегося раскоса. Общее ослабление всех 4 швов в оторвавшемся конце раскоса составляет  $20,6\%$ , так, что рабочее сечение этих швов  $= 22,0 \text{ см}^2$ . В момент разрушения усилие в раскосе составляло 42,4 тонн, так что швы работали на разрыв с напряжением в  $\frac{42400}{22} = 1926 \text{ кг/см}^2$ .

Измеренные напряжения в сечениях трубчатой фермы 25 без узловых фасонок при нагрузке 35,1 тонн.

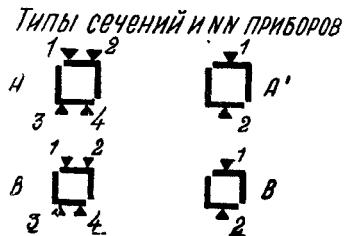
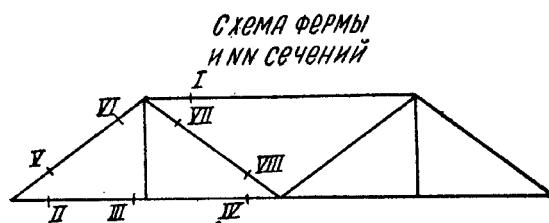
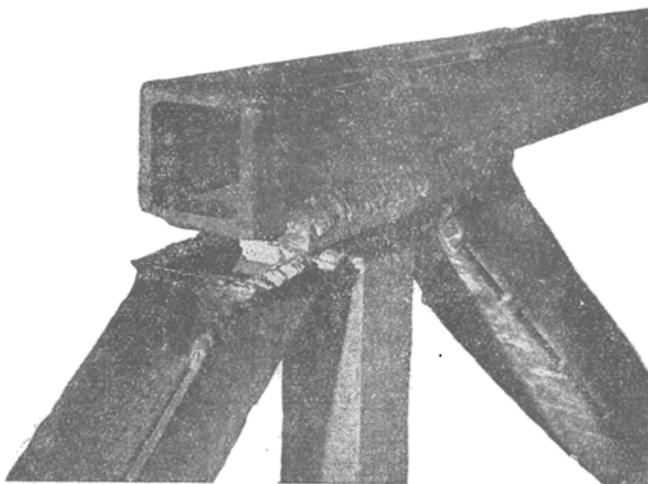


Таблица № 8.

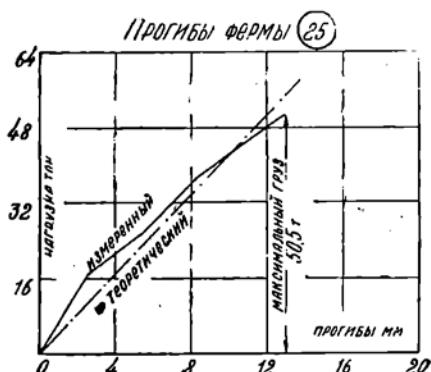
Стержни фермы	Сечения		Расстояния сечений от узлов см	№№ прибо-ров	Расстояние фибрь мм	Фибровые напряже-ния кг/см <sup>2</sup>	Основные напряже-ния кг/см <sup>2</sup>
	Т и п	№№					
Верхний пояс . . .	A	I	40	1	6	+ 1188	
				2	9	+ 1488	
				3	9	+ 1408	
				4	11	+ 1212	+ 1307
	B	II	38	1	4	- 1130	
				2	6	- 880	
				3	5	- 1312	- 1082
				4	7	- 1026	
Нижний пояс . . . .	B	III	11	1	серед.	- 851	
				2	серед.	- 1416	- 1130
	B	IV	35	1	5	- 948	
				2	7	- 847	
				3	7	- 1689	- 1240
				4	6	- 1455	
	B	V	50	1	5	+ 1679	
				2	10	+ 1729	
				3	12	+ 1365	+ 1567
				4	3	+ 1516	
Восходящий раскос .	B	VI	35	1	10	+ 844	
				2	9	+ 1666	
				3	10	+ 1300	+ 1338
				4	9	+ 1610	
Нисходящий раскос . .	A	VII	40	1	серед.	-- 753	
				2	серед.	- 1102	- 927
	A	VIII	40	1	6	- 710	
				2	3	- 925	
				3	8	- 935	
				4	11	- 1045	- 903

Кроме плохого качества сварки, столь низкое временное сопротивление шва объясняется внецентренной передачей усилия раскоса



Фиг. 26.

на пояс, вследствие большого непровара в одном из продольных швов, прикреплявших конец раскоса. Благодаря этому, кроме растяжения, соединение подвергалось действию изгибающего момента из плоскости фермы, что способствовало разрушению швов. После отрыва раскоса 0—1 нижний пояс 0—2 изогнулся в вертикальной плоскости. В сжатых элементах выпучивания не обнаружено. Диаграмма прогибов фермы дана на фиг. 27. Результаты измерения напряжений собраны в таблице . В тех сечениях, в которых было установлено по 4 прибора, основные напряжения выводились как в трубчатых сечениях предыдущих ферм. В тех сечениях, где было установлено по 2 прибора, основное напряжение получилось, как полусумма из показаний этих приборов.



Фиг. 27.

## § 6. Сравнение веса ферм.

Сравнение наших ферм мы проведем по весу, по результатам испытания и в отношении удобства их изготовления.

Сравнение по весу. В испытанных нами фермах одноименные элементы имеют одинаковые площади сечения, поэтому одноименные вытянутые элементы всех четырех ферм напряжены одинаково, и эти фермы равнопрочны с точки зрения вытянутых элементов. Что же касается сжатых элементов, то при одинаковой площади сечения они имеют разные коэффициенты  $\varphi$  уменьшения допускаемого напряжения на случай продольного изгиба.

Чтобы показать какое влияние на величину коэффициента  $\varphi$  оказывает разная форма сечений при одинаковой их площади, мы приводим таблицу 9 с данными о сжатых стержнях наших ферм.

## Сравнение сечений сжатых элементов ферм

Таблица № 9.

Стрежень	Марка	Тип сечения	$\omega$ $\text{cm}^2$	$I_{\text{мн}}$ $\text{cm}^4$	$r_{\min}$ $\text{см}$	$\varphi$
Нижний пояс . . . .	22	Л 65 × 65 × 8	19,7	75	1,95	0,71
	23	Л 110 × 8 + 160 × 7	20,0	239	3,45	0,82
	24	В 65 × 65 × 8	19,7	119	2,46	0,74
	25	К 65 × 65 × 8	19,7	119	2,46	0,77
Несходящий раскос . . . .	22	Л 75 × 75 × 10	28,2	142	2,25	0,68
	23	В 75 × 75 × 10	28,2	225	2,83	0,73
	24	В 75 × 75 × 10	28,2	225	2,83	0,74
	25	К 75 × 75 × 10	28,2	225	2,83	0,75

Причина: Разница в  $\varphi$  при одинаковых  $\omega$  и  $I_{\text{мн}}$  объясняется разной свободной длиной одной ветви сечения (см. таблица 1, 2, 3 и 4).

Как видно из этой таблицы, величина коэффициента  $\varphi$  для поясов колеблется от 0,71 для таврового сечения из двух уголков до 0,82 для таврового сечения из двух листов. Для раскосов коэффициент  $\varphi$  изменяется от 0,68 для таврового сечения и до 0,75 для трубчатого сечения. Благодаря разной величине коэффициентов  $\varphi$  однотипные сжатые элементы напряжены неодинаково и наши фермы по прочности отличаются между собой.

Сперва мы сравним вес испытанных нами ферм, равнопрочных только в отношении растянутых элементов; затем выясним, насколько изменится вес этих ферм, если мы сделаем их равнопрочными также в отношении сжатых элементов, т. е. подберем эти последние так, чтобы они были напряжены одинаково.

## Вес опытных ферм в кг в случае неодинаковой прочности сжатых элементов

Таблица № 10.

Марки Сечение поясов	22	24	23	25
	тавровое	трубчатое	тавровое	трубчатое
Узловые фасонки	с фасонками		без фасонок	
Пояса . . . . .	157	157	155	152
Раскосы и стойки . . . . .	140	128	148	153
Узловые фасонки и прокладки .	45	52	3	10
Опорные листы, опорные уголки и ребра жесткости . . . . .	8	11	10	2
Полный вес фермы . . . . .	350	348	216	317

Вес поясов почти одинаков во всех фермах, вес раскосов и стоек несколько отличается, в зависимости от разницы в их длине, вызван-

ной способом прикрепления. Разницу в весе 4-х ферм дают главным образом узловые фасонки. В общем фермы без узловых фасонок дают экономию металла около 9,5%.

Теперь подсчитаем вес ферм, если они равнопрочны не только в отношении вытянутых, но и сжатых элементов.

Для этой цели подберем сжатые элементы ферм без запаса, рассчитывая их на ту же максимальную нагрузку в 90 тонн. и по напряжению материала  $4500 \text{ кг}/\text{см}^2$ . Результаты подбора приведены в таблице 11.

**Сечения сжатых стержней при условии их равнопрочности.**

*Таблица № 11.*

Стержень фермы	Усилие тонн	Марка	Тип сечения	Все сече- ние или одна ветвь	$\varphi \text{ см}^2$	$I_{min} \text{ см}^4$	$\eta_{min} \text{ см}$	$l \text{ см}$	$l/r$		$\varphi$	Напряже- ние $\text{кг}/\text{см}^2$
									Частное	Общее		
Нижний пояс	60,8	22	65 × 65 × 8	все сечение	19,7	75	1,95	135	69	72	0,71	-4390
				одна ветвь	9,8	16	1,26	26	21			
		23	— 100 × 8 + + 150 × 6	—	17,0	169	3,15	135	—	43	0,81	-4410
		24	< 60 × 60 × 8	все сечение	18,0	92	2,26	135	60	64	0,74	-4540
				одна ветвь	9,0	12	1,16	26	22			
		25	□ 60 × 60 × 8	—	18,0	92	2,26	135	—	60	0,75	-4490
		22	70 × 70 × 10	все сечение	26,2	115	2,09	168	80	84	0,67	-4310
				одна ветвь	13,1	24	1,35	35	26			
		23	< 75 × 75 × 8	все сечение	22,9	187	2,85	168	59	61	0,75	-4400
				одна ветвь	11,5	24	1,46	25	17			
Преходящий раскос	75,6	24	< 75 × 75 × 8	все сечение	22,9	187	2,85	168	59	61	0,75	-4400
				одна ветвь	11,5	24	1,46	25	17			
		25	□ 75 × 75 × 8	—	22,9	187	2,85	168	—	59	0,75	-4400

Приняв для сжатых элементов эти измененные сечения, мы определили вес всех основных элементов каждой из 4 ферм, которые можно считать равнопрочными. Для сравнения этих весов с весами основных элементов испытанных нами ферм, которые не являются равнопрочными, мы составили таблицу 12. Из этой таблицы видно, какую экономию в весе можно получить в случае подбора сжатых элементов равнопрочными.

Из таблицы 12 видно, что в случае равнопрочности ферм относительно сжатых стержней наибольшую экономию дает ферма 23 с тавровыми поясами из двух листов, так как ее сжатые стержни имеют самые высокие коэффициенты  $\varphi$  уменьшения допускаемого напряжения на случай продольного изгиба. Далее следуют трубчатые фермы

**Сравнение веса основных элементов ферм в случае их равнопрочности и неравнопрочности.****Таблица № 12.**

М а р к а Сечение поясов		22 тавровое	24 трубчатое	23 тавровое	25 трубчатое
Узловые фасонки		с фасонками		без фасонок	
Равнопрочные фермы . . .	Пояса . . . . .	157	153	142	148
	Раскосы и стойки	137	122	141	146
	Все элементы .	294	275	283	294
Неравнопрочные фермы . . .	Пояса . . . . .	157	157	155	152
	Раскосы и стойки	140	128	148	153
	Все элементы .	297	285	303	305
Экономия в весе кг . . . . .		3	10	20	11

24 и 25, дающие почти одинаковую экономию. Наименьшую экономию дает ферма 22 с обычными тавровыми сечениями из двух уголков, так как ее сжатые стержни являются наименее жесткими.

**§ 7. Сравнение ферм по результатам их испытания.**

a) *Сравнение прочности.* В таблице 13 мы выписали грузы, измеренные в начале текучести, максимальные измеренные грузы, теоретические грузы, соответствующие началу текучести растянутых элементов и началу выпучивания сжатых стержней. Теоретические грузы, соответствующие началу текучести растянутых элементов, мы определили по усилию в наиболее напряженном растянутом элементе данной фермы в момент начала его текучести, при чем

$$S_k = \omega \sigma$$

где  $\omega$  — площадь сечения этого элемента,  $\sigma = 2500 \text{ кг}/\text{см}^2$  напряжение в начале текучести. По усилию  $S_k$  легко вычислить соответствующую ему нагрузку  $P$ .

Таким же образом мы определили грузы, соответствующие началу выпучивания сжатых стержней. Усилие в наиболее напряженном сжатом стержне данной фермы, соответствующее началу его выпучивания

$$S_k = \omega \varphi \sigma$$

где  $\omega$  — площадь сечения этого стержня,  
 $\varphi$  — коэффициент уменьшения напряжения на случай продольного изгиба,

$$\sigma = 2500 \text{ кг}/\text{см}^2 \text{ — напряжение в начале текучести.}$$

По усилию  $S_k$  легко вычислить соответствующую ему нагрузку  $P$ . В качестве примера приведем расчет вышеуказанных критических

грузов для тавровой фермы 22. Наиболее напряженным растянутым элементом является верхний пояс; для него  $S_k = \omega \sigma = 28,22 \cdot 2500 = 70500 \text{ кг}$ .

По уравнению моментов находим:

$$P = S_k \frac{h}{d} = 70,5 \frac{1,00}{1,35} = 52,2 \text{ тонн},$$

где  $h$  — высота фермы,  
 $d$  — длина панели.

Наиболее напряженным сжатым элементом является нижний пояс; для него  $S_k = \omega \sigma = 19,66 \cdot 0,71 \cdot 2500 = 34900 \text{ кг}$ .

Из равновесия опорного узла:

$$P = S_k \frac{2h}{d} = 34,9 \frac{2,1,00}{1,35} = 51,6 \text{ тонн},$$

#### Измеренные и теоретические грузы в тоннах.

Таблица № 13.

Марка фермы Сечение поясов Узловые фасонки	Причина разрушения	22	24	25	23
		тавровое есть	трубчатое есть	трубчатое нет	тавровое нет
Измеренные грузы	в начале текучести .	50,5	50,5	—	50,5
	максимальный . . .	54,0	53,8	50,5	57,5
Теоретические грузы	в начале текучести растянутых стержней .	52,2	52,2	52,2	53,3
	в начале выпучивания сжатых стержней ..	51,6	53,8	56,0	61,2

Для всех ферм текучесть наступила при одной и той же нагрузке около 50 тонн. Это объясняется тем, что верхний растянутый пояс, имеющий во всех фермах одинаковую площадь сечения, начинал течь при нагрузке около 50 тонн. Сравним еще прочность ферм в зависимости от устойчивости их сжатых стержней. В фермах 22 и 24 сжатый пояс выпучился при максимальном грузе в 54,0 и 53,8 тонн. В фермах 23 и 25 мы не могли вызвать выпучивания сжатых стержней, так как раньше оборвались швы в конце вытянутого раскоса 0—1. Если бы выдержали эти швы, то, очевидно, нагрузка продолжала бы увеличиваться до момента выпучивания сжатых элементов, и мы получили бы более высокие максимальные грузы, чем наблюденные нами 57,5 тонн и 50,5 тонн. Во всяком случае ясно, что в отношении устойчивости сжатых стержней наиболее прочной является ферма 23 с тавровыми поясами, сваренными из двух листов, а обе фермы 22 и 24 почти равноценны. Что же касается трубчатой фермы 25 без узловых фасонок, то по результатам испытания нельзя определить ее положения. Если же судить по теоретическим грузам, которые являются критическими для устойчивости сжатых стержней, и которые, благодаря одинаковой площади поперечного сечения одноименных элементов, находятся в прямой зависимости от коэффициентов уменьшения допускаемого напряжения для сжатых стержней на случай продольного изгиба, то самой прочной является ферма 23, затем идут фермы 25, 24 и 22.

Итак, мы приходим к следующему выводу относительно прочности наших ферм: в случае одинаковой площади сечения одноименных

стержней и достаточной прочности швов, самой прочной является ферма 23 с тавровыми поясами из двух листов, затем трубчатая ферма 25 без узловых фасонок, трубчатая ферма 24 с фасонками и, наконец, тавровая ферма 22 с фасонками.

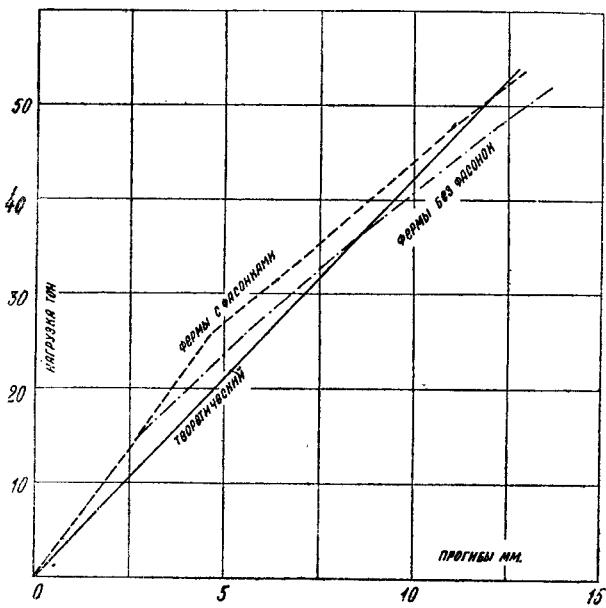
b) Сравнение прогибов. Диаграммы измеренных прогибов мы видели на фиг. 19, 22, 24 и 27. На тех же фигурах построены и теоретические прогибы ферм, вычисленные по Мору. Как видно из этих диаграмм, в начале испытания измеренные прогибы меньше теоретических, затем постепенно приближаются к ним и к началу текучести делаются даже немного больше. Прогибы, измеренные при нескольких нагрузках, мы сопоставили в таблице 14.

Измеренные прогибы в мм

Таблица № 14.

Марка фермы Сечение, поясов Узловые фасонки	22 тавровое есть	24 трубчатое есть	23 тавровое нет	25 трубчатое нет
Нагрузки	Измеренные прогибы в мм			
17,1	3,0	2,5	2,8	2,7
25,6	4,7	4,6	5,5	5,5
35,1	7,8	7,1	8,1	8,2
46,9	10,6	10,5	12,2	11,6
50,5	12,0	11,8	13,9	13,0

Как видно из этой таблицы, фермы 22 и 24 с узловыми фасонками вообще жестче ферм 23 и 25 без узловых фасонок. Самой жесткой оказывается трубчатая ферма 24 с узловыми фасонками. Очень близко к ней подходит тавровая ферма 22 с узловыми фасонками. Ферма 23 с тавровыми поясами и трубчатая ферма 25, обе без узловых фасонок, оказываются менее жесткими и дают почти одинаковые прогибы. Чтобы наглядно показать влияние фасонок на прогиб фермы, мы построили график на фиг. 28. Одна кривая соответствует фермам с фасонками, и получена как среднее из ферм 22 и 24, а вторая кривая, для ферм без фасонок, получена как среднее из ферм 23 и 25. Линии теоретических прогибов, вычисленных по Мору, одинаковы для всех четырех ферм, ввиду одинаковой площади поперечного сечения одноименных стержней. Из этого графика видно, что фермы с фасонками более жесткие, а фермы без фасонок ближе подходят к шарнирной схеме.



Фиг. 28.

Из рассмотрения прогибов следует, что самой жесткой является трубчатая ферма 24 с узловыми фасонками, затем идет тавровая ферма 22 с узловыми фасонками, а дальше следуют фермы без фасонок, т. е. ферма 23 с тавровыми поясами и трубчатая ферма 25.

Сравнение основных напряжений. В основные напряжения, выведенные нами по измеренным фибральным, могли вкрадаться неточности, происходящие от неточности в прикреплении элементов, от наличия предварительного изгиба стержней, неточной установки опорных ножей и домкрата. Однако, результаты их измерения все же можно считать удовлетворительными. В таблице 15 мы даем измеренные и теоретические основные напряжения при нагрузке в 35,1 тонн. В тех стержнях, где напряжения измерялись в нескольких сечениях, мы выводили средние основные напряжения из всех этих сечений.

#### Основные напряжения в стержнях ферм.

в кг/см<sup>2</sup>.

Таблица № 15.

Марки ферм Сечение поясов Узлов. фасонки	22	24	23	25	Теорети- ческие напряже- ния при шар- нирной схеме
	тавровое с фасонками	трубчатое без фасонок	тавровое	трубчатое	
Верхний пояс . . .	1437	1345	1420	1324	1708 (1674)*
Нижний пояс . . .	889	1006	816	1151	1226 (1170)*
Восходящий раскос . .	1361	1356	1400	1453	1506
Нисходящий раскос . .	815	824	836	915	1045

На основании таблицы 15 мы составили таблицу 16, конструктивных поправок для всех стержней каждой фермы, т. е. отношений измеренных основных напряжений к теоретическим.

#### Конструктивные поправки для стержней ферм.

Таблица № 16.

Марки ферм Сечение поясов Узлов. фасонки	22	24	23	25
	тавровое с фасонками	трубчатое без фасонок	тавровое	трубчатое
Верхний пояс . . .	0,84	0,79	0,85	0,78
Нижний пояс . . .	0,73	0,82	0,70	0,95
Восходящий раскос . . .	0,91	0,90	0,93	0,97
Нисходящий раскос . .	0,78	0,79	0,80	0,88

Из этой таблицы видно, что наивысшими конструктивными поправками почти во всех случаях (кроме верхнего пояса) обладает трубчатая ферма 25 без узловых фасонок. На втором месте, почти во всех случаях (кроме нижнего пояса), стоит ферма 23 с тавровыми поясами из двух листов. Фермы с фасонками (22 и 24) обладают почти одинаковыми конструктивными поправками, более низкими по сравнению с фермами без фасонок. Из теории ферм с жесткими узлами известно, что при жестких узлах усилия, а следовательно, и напряжения, и конструктивные поправки получаются ниже, чем при шарнирной схеме. Из сравнения измеренных прогибов мы выяснили, что более жесткими являются фермы 24 и 22 с фасонками, затем сле-

\*) Цифры в скобках относятся к ферме 23, пояса которой имеют немного большую площадь поперечного сечения.

дуют фермы 23 и 25 без фасонок. Рассмотрение основных напряжений подтверждает этот вывод.

а) Сравнение дополнительных напряжений. Чтобы дать ясную картину величины и распределения дополнительных напряжений, требуется самая точная постановка опытов. Наше оборудование этой возможности не дает; поэтому по измеренным нами напряжениям нам не удалось выяснить, насколько разная конструкция наших ферм отражается на дополнительных напряжениях. Не подлежит сомнению, что самые малые дополнительные напряжения имеет трубчатая ферма 25 без узловых фасонок. Что касается остальных трех ферм, то трудно указать, какое место они занимают в отношении величины дополнительных напряжений. Ферма 23 без узловых фасонок с тавровыми поясами из двух листов должна иметь довольно высокие дополнительные напряжения, благодаря жесткости поясов.

б) Влияние прикрепления на расположение напряжений. Наилучшими следует признать такие сечения раскосов, при которых швы для их прикрепления к узлам расположены симметрично к оси раскоса. В этом отношении лучше всех трубчатое сечение раскосов, примененное в ферме 23 с тавровыми поясами из двух листов и в трубчатой ферме 24 с узловыми фасонками. Хуже трубчатая ферма 25 без узловых фасонок и хуже всех тавровая ферма 22 с узловыми фасонками, даже в случае прикрепления тавровых раскосов двумя швами разной длины.

### § 8. Сравнение ферм в отношении удобства их изготовления.

Сборка и сварка ферм производилась в электросварочной лаборатории Комитета на заводе Болшевик; поэтому мы могли наблюдать все стадии этой работы, которая для всех 4 ферм велась в следующем порядке. Сперва собирался и сваривался каждый пояс в отдельности, при чем к поясу приваривались все узловые фасонки и прокладки. После этого приступали к сборке самих ферм; на стеллаже укладывались готовые пояса и к ним присоединялись раскосы и стойки. Эти две стадии работ мы рассмотрим отдельно.

#### А. Сборка и сварка поясов.

При сварке поясов нам пришлось столкнуться с их искривлением вследствие усадки наплавленного металла швов при его охлаждении.

В прилежащем основном металле эта усадка может вызвать весьма значительные сжимающие напряжения. Если швы расположены несимметрично к оси стержня (напр., тавр. из двух листов), то возникают моменты, изгибающие стержень в плоскости швов. Искривление будет тем заметнее, чем больше вызывающий его момент (т. е. чем большее количество неуравновешенных швов), чем большее длина свариваемого стержня и чем меньше его жесткость в плоскости изгиба.

В тавровых поясах из двух уголков фермы 22 и в трубчатых поясах из двух уголков фермы 24 число швов невелико (2–3 шпонки на панель), и, кроме того, эти швы почти уравновешены. Поэтому никакого искривления в этих поясах не наблюдалось. В трубчатых поясах фермы 25 без фасонок число швов значительно больше. Поэтому наблюдался изгиб поясов в плоскости швов, не совпадающей с плоскостью фермы. Так как швы в данном случае почти уравновешены, то это искривление было незначительно и легкоправлялось.

Самые большие искривления наблюдались в тавровых поясах, сваренных из двух листов (ферма 23), так как эти пояса имеют большое

количество швов, при том совершенно неуравновешенных. Верхний пояс, имея большую жесткость ( $I = 982 \text{ см}^4$ ) и малую длину (2,7 м), изогнулся в плоскости фермы только на 3 мм. Зато нижний пояс, значительно менее жесткий ( $I = 267 \text{ см}^4$ ) и более длинный (5,4 м), дал большое искривление со стрелой 30 мм. В первом образце мы выпрямили это искривление ударами молота по горизонтальному листу; при этом лист растянулся и пояс выпрямился; такой способ правки непригоден, особенно при длинных и довольно жестких поясах, так как вызывает наклеп металла горизонтального листа. Чтобы избежать искривления, мы пробовали варить швы в том или другом порядке; однако, мы получали одно и тоже искривление, так как от порядка варки швов общая величина усадки наплавленного металла не изменяется. Предложение—наваривать валик на ноже тавра, чтобы уравновесить швы—тоже отпадает, так как это ведет к большому увеличению количества варки, и, кроме того, трудно угадать, какое именно количество металла надо наварить, чтобы уравновесить швы. Чтобы избегнуть искривлений, мы произвели еще такую пробу: свариваемый пояс мы прикрепили к жесткой двутавровой балке. Действительно, во время варки пояс не искривился, т. к. часть напряжений передавалась балке. Но, как только мы освободили сваренный пояс, он прогнулся и при том на такую же точно величину, как если бы его варили неприкрепленным.

Теперь опишем примененный нами способ сварки поясов таврового сечения, при котором пояс после сварки получается прямым. Первый пояс мы собрали просто из прямолинейных листов и сварили их. Пояс получился кривым с вогнутостью со стороны горизонтального листа. Пользуясь этим кривым поясом в качестве шаблона, мы для всех последующих поясов того же размера выгибали вертикальный лист по этому шаблону. Мы выгибали эти листы в холодном состоянии ударами молотка по той их кромке, которая должна была получиться выпуклой (от ударов эта кромка удлинялась). Выгиб каждого листа занимал около получаса. Сваренные таким образом тавровые пояса длиной 6 м, оказались вполне прямыми. Этот способ особенно хорош в случае изготовления большого количества стержней по одному шаблону.

Вследствие усадки наплавленного металла варку поясов пришлось вести либо от середины к краям, либо от одного края к другому, но ни в коем случае не от краев к середине, так как это может повести к образованию большого зазора между стенкой и горизонтальным листом тавра.

В трубчатой ферме 25 без узловых фасонок прокладки между поясами и концом раскосов приваривались к поясу в таком порядке: сперва варились продольные швы, а затем короткие поперечные. В противном случае большие усадочные напряжения при варке длинных продольных швов могут повредить короткие поперечные швы.

По вопросам о сборке и сварке поясов мы приходим к таким выводам:

1) Наибольшее количество сварки требуют тавровые пояса из двух листов (ферма 23), меньше сварки требуют трубчатые пояса фермы 25 без узловых фасонок, меньше всего сварки требуют пояса ферм 22 и 24 с фасонками.

2) Больше всего затруднений вызывает сварка тавровых поясов из двух листов фермы 23, благодаря большому искривлению от усадки наплавленного металла швов. То же явление причиняет небольшие затруднения при варке поясов трубчатой фермы 25 без узловых фасонок. Правда искривление получается значительно меньше, чем в ферме 23 с тавровыми поясами из двух листов, так как швы почти

уравновешены. Варка поясов тавровой фермы 22 с узловыми фасонками и трубчатой фермы 24 с узловыми фасонками не представляет никаких затруднений и искривления в них не наблюдалось.

### В. Сборка и сварка раскосов и стоек.

Когда пояса были готовы, все фермы, кроме трубчатой фермы 25 без узловых фасонок, собирались так: готовые пояса с приваренными к ним узловыми фасонками и планками укладывались на стелаже; на пояса укладывались верхние уголки стоек и раскосов и прихватывались электродом; затем ферма переворачивалась, укладывались вторые уголки стоек и раскосов и так же прихватывались; после этого приступали к сварке. Никаких затруднений при этом не встречалось. Приварка тавровых раскосов и стоек из двух уголков к фасонкам (ферма 22) вполне удобна, т. к. углы между свариваемыми частями прямые и эти швы варятся в горизонтальном положении.

Трубчатые раскосы и стойки из двух уголков с зазором очень удобно приваривать к узловым фасонкам (ферма 24) или стенке поясов (ферма 23). Удобству сварки способствует тупой угол между стенкой пояса (или узловой фасонкой) и полками уголков раскоса. Такой тупоугольный шов можно варить любой толщины, между тем как обыкновенный шов для приварки листа к лежащей на нем полке уголка имеет ограниченную толщину, равную толщине полки уголка (фиг. 4 5 и 9). Тупоугольный шов всегда следует варить с выпуклой поверхностью (фиг. 9), так как плоский шов имеет недостаточную площадь сечения (фиг. 21). Все сказанное о тупоугольных швах больше всего относится к трубчатой ферме 24 с узловыми фасонками, так как все ее элементы, т. е. пояса, раскосы и стойки, образуют тупые углы с узловыми фасонками.

Сборка и сварка трубчатой фермы 25 без узловых фасонок представляла целый ряд неудобств в узлах, где торцы раскосов и стоек привариваются к поясам. Первое затруднение заключалось в косой резке уголков для раскосов, так чтобы они точно подходили к поясам. Дальнейшее неудобство в том, что каждый раскос и стойку пришлось собирать и сваривать отдельно, а затем концы их приваривать к поясам. Концы раскосов и стоек встречаются под острым углом, который нельзя хорошо проварить, так как при угле в  $60^{\circ}$  непровар доходит до 50%. Другим затруднением является поперечный шов между поясом и раскосом, который приходилось варить в вертикальном положении, что значительно труднее горизонтальной варки. Швы, приваривающие косо срезанные концы раскосов к поясам, работают неопределенно на косой разрыв и отчасти на срез и неизвестно, как их расчитывать.

Во всех стержнях из двух уголков с зазором, для связи уголков в зазорах приходилось вваривать шпонки. Чтобы наплавленный металл не протекал, на время сварки подкладывалась изогнутая медная пластинка, которая потом вынималась.

Из всего сказанного о сборке и сварке раскосов и стоек можно сделать следующие выводы:

1) Сборка раскосов и стоек ферм 22, 23 и 24 не представляет никаких затруднений. Сборка трубчатой фермы 25 без узловых фасонок представляла следующие неудобства: косая резка уголков с последующей пригонкой концов раскоса и необходимость сборки раскосов и стоек отдельно на стороне.

2) По удобству варки швов первое место занимает трубчатая ферма 24 с узловыми фасонками, так как все ее элементы образуют с узловыми фасонками тупые углы. Самой неудобной для варки

оказалась трубчатая ферма 25 без узловых фасонок, благодаря наличию острых углов между свариваемыми частями и необходимости часть варки вести в вертикальном направлении.

3) В отношении работы швов хуже всего трубчатая ферма 25 без узловых фасонок.

### § 9. Выбор самого рационального типа ферм.

Нам осталось решить вопрос, какая из ферм является наилучшей. Из обеих ферм с узловыми фасонками трубчатая ферма 24 имеет перед тавровой фермой 22 следующие преимущества: 1) она прочнее, так как при трубчатом сечении элементы жестче и устойчивее, чем при тавровом сечении; 2) полная центральность прикрепления раскосов и стоек швами одинаковой длины; 3) большее удобство сварки благодаря тупоугольным швам раскосов, стоек и поясов. В отношении дополнительных напряжений, веса, удобства обработки и сборки и количества варки обе фермы равнозначны. Следовательно, из двух ферм с узловыми фасонками предпочтение следует отдать трубчатой ферме 24. Сравним обе фермы без фасонок. Ферма 25 с тавровыми поясами из двух листов имеет следующие преимущества перед трубчатой фермой 25: 1) сжатые пояса прочнее и жестче; 2) прикрепление раскосов и стоек к поясам надежнее и удобнее; 3) она удобнее для сборки. В отношении веса и плохих условий для сварки обе фермы равнозначны. В общем ферма 23 с тавровыми поясами стоит выше трубчатой фермы 25.

Осталось произвести выбор между лучшей фермой 24 с узловыми фасонками и лучшей фермой 23 без фасонок. Главным преимуществом фермы 23 является меньший ее вес, вследствие отсутствия узловых фасонок и большей устойчивости сжатых поясов. Основной ее недостаток заключается в затруднениях при сварке тавровых поясов. Надо выяснить, сколько экономии на металле, которую дает ферма 23, ту лишнюю работу, которая затрачивается на устранение искривления тавровых поясов в процессе сварки. Экономия в весе металла на одну ферму при изготовлении 10-ти ферм 23 с тавровыми поясами из двух листов по сравнению с трубчатой фермой 24, составляется из веса узловых фасонок 32 кг и из облегчения сжатого пояса, благодаря большей его устойчивости 10 кг, а всего 42 кг. по 60 к. = 25 р. 20 к. Лишние затраты для фермы 23 с тавровыми поясами из двух листов составляются: 1) из стоимости лишней варки 3,6 пог. м по цене 2 р. за погонный метр, всего 7 р. 20 к.; 2) из стоимости предварительной правки поясов 2 рабочего часа по 1 р., всего 2 р.; 3) из стоимости материала шаблона для предварительной правки  $\frac{1}{10}$ . 158 кг по цене 60 к., всего 9 р. 60 к.; 4) из стоимости сварки этого шаблона  $\frac{1}{10}$ . 16 пог. м по цене 2 р. всего 3 р. 20 к. а всего на одну ферму 22 руб. Экономия на металле, которую дает ферма 23 с тавровыми поясами из двух листов, почти равна расходу на лишнюю сварку и устранение искривления ее поясов. Если к этому добавить то, что трубчатую ферму 24 с узловыми фасонками удобнее сваривать, благодаря наличию только тупых углов, что в ферме 24 можно избежать неприятной работы с правкой поясов, что, наконец, достать уголки для поясов фермы 24 легче, чем полосовое железо для тавровых поясов фермы 23, то мы придем к следующему выводу: из всех рассмотренных нами ферм следует предпочесть трубчатую ферму 24 с узловыми фасонками.

К тому же выводу мы приходим еще следующим путем. В отношении прогибов, напряжений и других результатов испытаний не наблюдается большой разницы между фермами, к тому же эти при-

знаки имеют скорее теоретическое значение; приходится решать вопрос по практически важным признакам как вес, количество сварки, удобство изготовления, сборки и сварки. По каждому из этих признаков мы оцениваем все 4 фермы по трехбалльной системе и затем суммируем все баллы, выставленные каждой фермой. Оценку ферм мы произвели в табл. 17.

### Сравнение ферм

Таблица № 17.

Марка фермы Сечения поясов	22	24	23	25
	тавровое	трубчатое	тавровое	трубчатое
Узловые фасонки	с фасонками		без фасонок	
1) Вес с учетом экономии на скжатых стержнях . . . . .	1	1½	3	2½
2) Удобство изготовления и сборки . . . . .	3	3	3	1
3) Удобство сварки . . . . .	2½	3	1	1
4) Количество сварки . . . . .	3	3	2½	2½
Сумма баллов . .	9½	10½	9½	7

Как видно, наилучшей фермой опять оказывается трубчатая ферма 24 с узловыми фасонками.

Опытные фермы изготовлены в производственной Лаборатории УкрАкадемии Наук на заводе Большевик. Испытание произведено в исследовательской Электросварочной Лаборатории той же Академии.

Январь 1931.

Цена 70 коп.

**Напечатанные исследовательские работы Киевского  
Электросварочного Комитета.**

ПАТОН и КОЗЛОВСКИЙ. Металлографическое исследование электросваренных конструкций. 1930 г.

ПАТОН и ДЯТЛОВ. Ударные испытания электросваренных конструкций 1930 г.

ПАТОН, КОЗЛОВСКИЙ и ГОРБУНОВ. Электросваренные двутавровые балки из 3-х листов 1931 г.

ПАТОН и КОЗЛОВСКИЙ. Стыки электросваренных двутавровых балок 1930 г.

ПАТОН и КОЗЛОВСКИЙ. Опытное сравнение электросваренных и клепанных прикреплений продольных балок к поперечным 1930 г.

ПАТОН и КОЗЛОВСКИЙ. Сравнение клепанных и сваренных сквозных ферм 1931 г.

ПАТОН и ПЕТРОВ. Изыскание рационального типа электросваренных сквозных ферм 1931 г.

---