

Инженеръ М. А. Навроцкій.

624
H 15

Департаментъ наукъ и
техническаго искусства
Дата 2004

ИСПЫТАНІЯ

СОСТАВНЫХЪ ДЕРЕВЯННЫХЪ БАЛОКЪ

НА ПЕРЕЛОМЪ

и

ИХЪ РАЗСЧЕТЪ

НА ОСНОВАНІИ ОПЫТНЫХЪ ДАННЫХЪ.



С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

Типографія Министерства Путей Сообщенія

(Въ соединеніи утвержденаго Товарищества И. Н. Кушнеревъ и К^о), Фонтанка 117.

1894.

1874 62

1975

Испытанія составныхъ деревянныхъ мостовыхъ балокъ на переломъ и ихъ расчетъ на основаніи опытныхъ данныхъ.

Въ 1890 г. австрійскимъ военнымъ комитетомъ, при участіи генеральной дирекціи австрійскихъ государственныхъ желѣзныхъ дорогъ, былъ произведенъ цѣлый рядъ интереснѣйшихъ опытовъ надъ сопротивленіемъ деревянныхъ мостовыхъ балокъ излому. Опыты эти были предприняты по инициативѣ и велись подъ непосредственнымъ руководствомъ начальника инженернаго штаба Moritz'a Bock'a, которымъ и былъ сдѣланъ о нихъ, 27 ноября 1890 г., въ Обществѣ австрійскихъ инженеровъ и архитекторовъ докладъ, напечатанный затѣмъ въ №№ 3 и 4 журнала „Wochenschrift d. österr. Ing. u. Architekten Vereines“ за 1891 г. Описание этихъ опытовъ и предложенной профессоромъ Melan'омъ расчетъ деревянныхъ составныхъ балокъ, на основаніи результатовъ опытовъ Bock'a, мы тогда же помѣстили въ журналѣ „Желѣзнодорожное Дѣло“. По поводу выводовъ проф. Melan'a и предложеннаго имъ способа расчета деревянныхъ составныхъ балокъ вскорѣ возникла оживленная полемика между нимъ и профессоромъ Thullie въ Lemberg'ѣ, помѣщенная на страницахъ того же австрійскаго журнала въ 1891 г. Съ сущностью этой полемики, освѣщающей весьма важный вопросъ о способѣ расчета деревянныхъ составныхъ балокъ, котораго слѣдуетъ держаться при повѣркѣ ихъ прочности, мы также въ свое время ознакомили русскихъ инженеровъ черезъ посредство журнала „Желѣзнодорожное Дѣло“.

Результаты опытовъ Воск'а настолько поучительны и имѣютъ столь важное значеніе, что не могутъ не быть, какъ это теперь уже и дѣлается, принимаемы во вниманіе при проектированіи и при повѣркѣ прочности деревянныхъ балокъ и мостовыхъ фермъ; поэтому, для удобства справокъ, мы считали не безполезнымъ собрать въ настоящей брошюрѣ въ одно цѣлое весь матеріаль по разсматриваемому вопросу.

I. Описаніе опытовъ Воск'а.

При производствѣ опытовъ пользовались аппаратомъ фирмы J. Gridl'я *), въ Вѣнѣ, позволявшимъ испытывать балки пролетомъ въ 10 метр. при общей ширинѣ испытываемаго образца въ 1,40 метр. Соотвѣтственно этому всякій испытываемый образецъ состоялъ изъ двухъ одинаковыхъ фермъ, расположенныхъ параллельно другъ другу на разстояніи 1,5 метра ось отъ оси и взаимно связанныхъ нѣсколькими поперечными брусками, дабы избѣжать возможности какихъ либо боковыхъ движеній.

Образцы подвергнутыхъ испытанію составныхъ балокъ изображены на *фиг. 1—10* прилагаемой таблицы чертежей.

Балки были изготовлены изъ сосноваго лѣса во всѣхъ отношеніяхъ отличныхъ качествъ (изъ лѣсныхъ дачъ гор. Steyr'a), причемъ имѣли длину 10,5 метр., при поперечномъ сѣченіи составляющихъ брусевъ въ 25×25 сант.; только въ одномъ опытѣ, въ зависимости отъ размѣровъ аппарата, брусья имѣли сѣченіе 20×20 сант. Болты для составныхъ балокъ были доставлены частью фирмою Gridl'я, частью же взяты изъ запасовъ желѣзнодорожнаго и телеграфнаго парковъ; такъ какъ болты послѣдней категоріи были снабжены обыкновенными маленькими кольцевыми шайбами, которыя сильно вдавливались въ дерево, то пришлось заказать особыя квадратныя шайбы въ 10 мм. толщины при ширинѣ сторонъ равной 4 діаметрамъ болта.

Для начала опытовъ была взята простая ферма I (*фиг. 1*), состоящая изъ 3-хъ другъ на друга положенныхъ брусевъ, связанныхъ болтами діаметр. въ 26 мм., расположенными на взаимномъ разстояніи въ 0,50 метр. Ради сбереженія матеріала, эту

*) K. u. k. Hof. Eisenconstructions-Werkstätte, Schlosserei u. Brückenbau-Anstalt Ig. Gridl, Wien. V, Bacherplatz, 3.

ферму ломать не предполагалось, чтобы воспользоваться составляющими ее брусьями для образования фермы IV со шпонками из двутаврового желѣза (фиг. 7). Опытъ этотъ имѣлъ только цѣлю констатировать вызываемое болтами треніе, для чего гайки болтовъ непосредственно передъ нагруженіемъ были настолько завинчены, что шайбы вдавились въ дерево на 5 мм. По расчету къ ключу требовалось приложить усиліе въ 15 кгр., чтобы вызвать натяженіе болтовъ въ 800 кгр., усиліе же рабочихъ было значительно больше.

По программѣ опытовъ нагруженіе предполагалось прекратить тогда, когда послѣдуетъ взаимное сдвигеніе брусевъ по плоскостямъ ихъ соприкосновенія, что можетъ произойти не раньше преодоленія тренія.

Первоначальная нагрузка должна была быть такова, чтобы расчетное напряженіе въ крайнихъ волокнахъ было въ 39 кгр. на кв. сант. Этому соотвѣтствовала скалывающая сила на половину фермы въ 14.000 кгр., между тѣмъ какъ противодѣйствіе, соотвѣтствующее напряженію болтовъ на растяженіе въ 800 кгр. на кв. сант., принимая коэффиціентъ тренія $f = 0,5$, опредѣляется въ 21.250 кгр., такъ что для преодоленія указанной скалывающей силы, равно какъ для совершеннаго уничтоженія взаимнаго скольженія брусевъ растягивающее напряженіе болтовъ должно бы равняться только 527 кгр. на кв. сант.

Тѣмъ не менѣе тотчасъ же послѣдовало скольженіе брусевъ другъ по другу, такъ что дѣйствительный прогибъ (65 мм.) былъ въ 9 разъ больше расчетнаго = 7 мм., чѣмъ совершенно ясно доказывается, что составныя балки работали, какъ простые брусья, положенные другъ на друга, и что даже при умѣренной нагрузкѣ нельзя рассчитывать на треніе, вызываемое стягивающими брусья болтами. Повтореніе этого опыта послѣ разгруженія фермы и вторичнаго подвинчиванія гаекъ привели къ тому же результату. Отсюда возникаетъ вопросъ, чѣмъ же обусловливается такой неожиданный результатъ? Отчасти вопросъ этотъ разъясняется слѣдующими соображеніями.

Болты, передъ нагруженіемъ фермы, были, какъ извѣстно, натянуты; вслѣдствіе этого балки были сжаты и въ состояніи равновѣсія каждый болтъ, между головкою и гайкой, долженъ

быть вытянуть на такую величину, которая соответствует дѣйствительному растягивающему напряженію; эта величина найдется изъ уравненія $\frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E}$; для $\sigma = 800$ и $E = 2.000.000$ будетъ $\frac{\Delta l}{l} = \frac{4}{10000}$ и при длинѣ $l = 750$ мм. растяженіе $\Delta l = \frac{3}{10}$ мм. Лишь только ферма будетъ нагружена, брусъ сожмется еще болѣе и ясно, что въ этотъ самый моментъ послѣдуетъ разгруженіе болтовъ, такъ какъ общая высота балки уменьшится.

Изъ предыдущаго примѣра видно, что даже ничтожнаго сжатія брусевъ достаточно, чтобы сдѣлать болты совершенно ненапряженными.

Для дальнѣйшаго разъясненія этого вопроса, во вторую серію опытовъ была включена ферма XI длиною 5,20 метр. и пролетомъ 4,80 метр., составленная изъ двухъ брусевъ 20×20 сант., стянутыхъ черезъ 0,40 метр. болтами діам. 20 мм.

Чтобы имѣть возможность точно опредѣлить измѣненіе въ напряженіи болта въ моментъ нагруженія, два болта были снабжены приборами для измѣренія растяженія (Dehnungsmesser); однако послѣдніе частію ничего не показывали, частію же показывали совершенно противоположные результаты и не только при нагрузкѣ, но уже при подвинчиваніи гаекъ. Поэтому они были оставлены и ферма постепенной нагрузкой доведена до разрушенія.

Какъ видно изъ графическаго изображенія, представленнаго на *фиг. 11*, измѣренныя при этомъ упругіе прогибы все болѣе приближались къ величинамъ прогибовъ, вычисленнымъ для простыхъ балокъ; переломъ фермы послѣдовалъ при расчетномъ напряженіи въ 219 кгр. на кв. сант., причемъ сначала сломалась верхняя, а затѣмъ уже нижняя балка. Сравнительно съ среднимъ временнымъ сопротивленіемъ излому въ 400 кгр. на кв. сант., найденнымъ для простыхъ балокъ, полученное при опытѣ напряженіе составляетъ лишь половину, такъ что балки при разрушеніи работали совершенно такъ же, какъ будто бы онѣ были положены другъ на друга.

То обстоятельство, что передъ изломомъ прогибы были все-таки нѣсколько менѣе вычисленныхъ для простыхъ балокъ, можно приписать дѣйствию болтовъ, перекосившихся послѣ продольнаго сдвигенія балокъ. Но это взаимное сдвигеніе наступило уже

при первоначальной нагрузкѣ и затѣмъ постепенно увеличивалось, причѣмъ почти достигло той величины, которая была вычислена для отдѣльныхъ балокъ.

Изъ этого опыта слѣдуетъ заключить, что нельзя рассчитывать на треніе, вызываемое натяженіемъ болтовъ, и поэтому при расчетѣ скалывающихъ силъ это треніе вовсе не слѣдуетъ принимать во вниманіе; болтовъ нужно употреблять столько, сколько необходимо для соединенія брусевъ. Чтобы предупредить слишкомъ сильное нажатіе на дерево подгаечныхъ шайбъ и избѣжать перерѣзыванія наиболѣе напряженныхъ внѣшнихъ волоконъ, величина этихъ шайбъ должна быть въ такомъ отношеніи къ діаметру болта, чтобы сторона квадратной шайбы была равна 4 діаметрамъ болта.

Справедливость этихъ выводовъ относительно значенія болтовъ подтверждается и всѣми послѣдующими опытами, изъ коихъ обнаружено, что при болѣе значительной нагрузкѣ въ средней половинѣ фермъ болты были не только ненатянуты, но между шайбой и шляпкой или между шайбой и гайкой образовался даже зазоръ въ 5—10 мм.

III. Слѣдующій опытъ былъ произведенъ надъ фермой II изъ балокъ со шпонками (фиг. 2). Дубовыя шпонки имѣли зацѣпление въ 2,5 сант., причѣмъ сопротивленіе смятію въ плоскостяхъ зацѣпления было принято равнымъ расчетному напряженію во внѣшнихъ волокнахъ; безопасное растягивающее напряженіе болтовъ было допущено въ 800 кгр. на кв. сант., коэффициентъ тренія = 0,5. Шпонки были вырѣзаны изъ очень твердой, совершенно сухой дубовой доски толщиной 8 сант. и обдѣланы обыкновеннымъ способомъ въ видѣ двойныхъ клиньевъ.

При нагруженіи тотчасъ послѣдовало довольно значительное сдвиженіе брусевъ другъ по другу, причѣмъ, конечно, дѣйствительныя прогибы превышали расчетныя; отношеніе послѣднихъ въ среднемъ было 4,3. При расчетномъ напряженіи въ 141 кгр. на кв. сант. произошелъ изломъ; при этомъ всѣ шпонки во врубкахъ показывали сильное смятіе глубиною до 5 мм., изъ чего слѣдуетъ заключить, что временное сопротивленіе раздробленію было превзойдено. Не принимая во вниманіе тренія, вызываемаго болтами, на каждую врубку приходилось давленіе въ 216 кгр. на

въ сантиметры, которое такимъ образомъ должно было превзойти временное сопротивление раздробленно перпендикулярно къ волокну, въ разумеется, при этомъ неизвестно, какое давленіе было вызвано при загонокъ и поновъ раньше нагруженія.

Отсюда слѣдуетъ, что дубъ перпендикулярно къ волокну выдерживаетъ весьма незначительное давленіе, что доказывается и послѣдующими опытами. Итакъ какъ временное сопротивление дуба раздробленно перпендикулярно къ волокну было найдено въ 1202 кгр. на кв. сантим.

Во второй серіи опытовъ были иодвергнуты излому фермы V V (фиг. 13) изъ составныхъ балокъ, соединенныхъ шпонтами въ вѣсто 4 по 16 шпонтъ на половину балки; глубина врубки въ вѣсто 0,35 сантим. увеличена до 15 сантим. такъ что обѣа и дожда заанченія на половину балки составляли $6 \times 8 \times 2525 = 7500$ кв. сантим. противъ $4 \times 2,52 \times 2525 = 2505$ кв. сантим. для фермы II, по этому дѣе приниманію вниманіе прещія, вызываемая обобками на врубкѣ шпонтъ, приподдось давленіе параво отъ только по половинѣ разаететнаго на прирещія фермы.

При нагруженіи прогибы были почти таже и скосе, взаимное скосе скольженіе брусьевъ въ значительномъ меньше, чѣмъ въ фермѣ III (фиг. 12). Изломъ последовалъ при разаететнаго на шпонтъ въ 1911 кгр. на кв. сантим. при этомъ временное сопротивление раздробленно было въ 3—4 раза больше чѣмъ въ прещей фермѣ, такъ что членіе увеличенія числа шпонтъ и ихъ къ усиленія дѣлается совершенно яснымъ.

Шпонтъ при этомъ не обнаружилъ никакого замѣтнаго смятія, потому что напряженіе ихъ при разрушеніи брусьевъ въ 995 кгр. на кв. сантим. было меньше сопротивленія дуба раздробленно.

Затѣмъ слѣдовали опыты надъ фермами изъ балокъ, соединенныхъ брусками (Klotzträger); сначала была доведена до разрушенія ферма III (взда поверху); между составляющими балками оставленъ промежутокъ въ 10 сантим. Высота брусьевъ составляла 20 сантим. при длинѣ ихъ въ 75 сантим.; такое же было и взаимное разстояние между брусками. Для этой фермы безопасное сопротивление врубки смятію было допущено въ 900 кгр. на кв. сантим. При нагруженіи также наблюдалось взаимное скольженіе балокъ и упругіе прогибы были значительно меньше, чѣмъ въ

фермѣ II; при этомъ отношеніи дѣйствительнаго прогиба къ расчетному въ среднемъ было $= 3,15$; изломъ послѣдовалъ при расчетномъ направленіи въ 191 кгр. на кв. сант., причемъ стѣнки брусковъ не обнаружили никакого замѣтнаго смятія, такъ какъ, не принимая во вниманіе вызываемаго болтами тренія, соответствующее разрушающему грузу напряженіе врубки въ 185 кгр. на кв. сант. было далеко еще ниже предѣла временнаго сопротивленія раздробленію.

Въ фермѣ VI, съ ѣздою по низу (*фиг. 5*), стыкъ балокъ сдѣланъ такимъ образомъ, что между нижнею и среднею балкою врѣзаны 3 продольныхъ бруска длиною по 75 сант. и высотой по 20 сант., а между верхнею и среднею балками двойное число поперечныхъ брусковъ 20×25 сант.; глубина врубки въ обоихъ стыкахъ — 5 сант. Не принимая во вниманіе вызываемаго болтами тренія, сжимающее напряженіе продольныхъ брусковъ было почти такое же, какъ расчетное напряженіе фермы въ крайнихъ волокнахъ, тогда какъ напряженіе поперечныхъ брусковъ составляло только половину послѣдняго.

Изломъ послѣдовалъ при $\beta = 205$ кгр. на кв. сант., т. е. при нѣскольکو высшей предѣльной нагрузкѣ, чѣмъ въ фермѣ III, что, принимая во вниманіе прочія явленія при опытѣ, слѣдуетъ приписать только большей вязкости стыка; послѣднее обстоятельство было также причиною того, что разрушеніе послѣдовало собственно отъ преодоленія временнаго сопротивленія скальванію средней балки близъ опоры, въ то время, какъ верхнія балки въ обѣихъ фермахъ дали только трещины.

Прогибъ, однако, былъ гораздо больше, чѣмъ въ фермѣ III; отношеніе дѣйствительнаго прогиба къ расчетному составляло въ среднемъ 4—5; точно также и взаимное сдвигеніе балокъ достигло большей величины; особенно значительны были остающіеся прогибы, измѣренныя непосредственно за разгрузеніемъ фермы.

Продольные бруски не обнаруживали никакого замѣтнаго смятія, тогда какъ поперечные бруски были смяты во врубкахъ на 4—5 мм., что позволяетъ заключить, что напряженіе ихъ, равное 100 кгр. на кв. сант., было значительно выше временнаго сопротивленія дерева раздробленію перпендикулярно къ волокнамъ.

Чтобы съ такими фермами достигнуть желаемыхъ результа-

товъ, следовало бы или увеличить число поперечныхъ брусковъ, или глубину врубки; но то и другое нежелательно въ виду значительнаго ослабленія балокъ; поэтому ферма съ расположеніемъ полотна по низу, гдѣ возможно, слѣдуетъ избирать.

Ферма VII съ расположеніемъ полотна по серединѣ (Фиг. 6) составлена изъ 4 балокъ 20 X 20 сант.; въ среднемъ промежуткѣ между двумя средними прогонами помѣщены поперечные брусья 20 X 25 сант., между остальными балками — дубовыя шпонки, обдѣланныя въ видѣ клинцевъ. Сжимающее напряженіе во врубкахъ для поперечныхъ брусковъ составляло около $\frac{2}{3}$, — для дубовыхъ шпонокъ — около $\frac{1}{5}$ отъ расчетнаго напряженія въ крайнихъ роствулахъ фермы.

Эти предѣлы, основываясь на опытахъ съ фермами III и VII, собственно слѣдуетъ признать высокими; однако, достаточно взглянуть на чертежъ, чтобы убедиться, что при глубинѣ врубокъ, ни число шпонокъ и поперечныхъ брусковъ увеличивать не следъ, такъ какъ въ противномъ случаѣ балки были бы слишкомъ ослаблены.

Эти относительно значительныя давленія обуславливали то, что изломъ уже послѣдовалъ при расчетномъ напряженіи въ 1447 кгр. на кв. сант.; при этомъ давленіе на поперечные брусья въ среднемъ назу было 96 кгр. на кв. сант. и отъ дѣйствія стоекъ поперечные брусья, прямоугольная форма которыхъ уже раньше была потеряна, обнаруживали во врубкахъ сильное смѣщеніе отъ 5 до 10 мм., почему указанное напряженіе должно было быть гораздо выше временнаго сопротивленія раздробленію. Этому незначительному сопротивленію поперечныхъ брусковъ также слѣдуетъ приписать то обстоятельство, что при нагрузкѣ наблюдалось весьма значительное скользяніе брусковъ, послужившее причиною чрезвычайно большихъ прогибовъ. Отношеніе дѣйствительныхъ прогибовъ въ расчетнымъ въ среднемъ составляло 9,00; но и неисчисляющіе прогибы были въ этомъ случаѣ особенно велики, — они превзошли больше, чѣмъ вдвое, величину, вычисленную для данной нагрузки.

Такая ферма, составленная изъ четырехъ балокъ, гораздо менѣе рациональна, чѣмъ ферма изъ трехъ балокъ, главнымъ образомъ потому, что среднему назу соответствуетъ спалывающая сила гораздо болѣе дѣйствующей въ назахъ фермы изъ трехъ

брусевъ. Кромѣ того, подобныя фермы требуютъ значительно большей работы и особенной тщательности въ пригонкѣ частей.

Затѣмъ слѣдуетъ остановиться на испытаніи фермъ IV и X (фиг. 7 и 8), въ которыхъ были примѣнены желѣзныя шпонки, а именно: въ фермѣ IV—куски двутавровыхъ балокъ и въ фермѣ X—чугунныя шайбы. Оба рода составныхъ балокъ не дали особенно желательнаго результата, который оказался бы ниже, чѣмъ въ фермахъ III и V, если бы не было соотвѣтственно увеличено число шпонокъ. Шпонки изъ двутавровыхъ балокъ имѣли длину одинаковую съ шириною составляющихъ брусевъ, причемъ работа по изготовленію фермъ была значительно легче, чѣмъ при составныхъ балкахъ съ деревянными шпонками или брусками, такъ какъ для каждой такой желѣзной прокладки было достаточно сдѣлать четыре надрѣза поперечной пилой и никакого выдалбливанія врубокъ не требовалось.

Флянцы двутавровыхъ балокъ въ совершенствѣ сопротивлялись дѣйствию скальвающихъ силъ, тогда какъ стѣнки балокъ всѣ прогнулись, нѣкоторыя даже совершенно искривились въ видѣ буквы S. Такъ какъ и въ другихъ типахъ двутавровыхъ балокъ толщина стѣнки находится въ томъ же отношеніи къ высотѣ балки ($\delta = 0,4 h$), то при употребленіи болѣе высокихъ типовъ не было основаній ожидать лучшаго результата.

Изломъ послѣдовалъ при расчетномъ напряженіи въ 146 кгр. на кв. сант., прогибы и взаимное скольженіе балокъ были почти такія же, какъ въ фермѣ II.

Поэтому, чтобы получить способныя къ сопротивленію двутавровыя шпонки, послѣднія нужно брать съ сильною стѣнкою; но такъ какъ подобныя балки нельзя прокатывать, то онѣ могли бы быть отлиты изъ стали, причемъ стѣнки должны быть снабжены ребордами. Однако, опытовъ съ такими балками произведено не было.

Ферма X состояла изъ балокъ, соединенныхъ черезъ 1 метръ чугунными шайбами, діаметр. въ 150 мм., съ выступающими краями, утопленными на 15 мм. въ дерево. Поводомъ къ устройству этихъ балокъ послужила брошюра инженера E. Pontzen'a, содержащая описаніе американскихъ trestle-bridges, въ которыхъ примѣнены подобныя шайбы. Но послѣднія имѣли высоту только

въ 18 мм. и не были собственно врызаны въ дерево, а выступающіе края ихъ должны были вдавливаться въ балки посредствомъ натяженія болтовъ.

Подобныя шайбы вовсе не подвергаются расчету и при большихъ пролетахъ отъ нихъ нельзя ожидать особенно благоприятныхъ результатовъ. Поэтому были приложены всѣ старанія въ тому, чтобы найти инструментъ, посредствомъ котораго можно было бы возможно точно врызать въ балкахъ кольцеобразныя углубленія; такой инструментъ и былъ изготовленъ на инструментальной фабрикѣ Weiss & Sohn.

Временное сопротивленіе такихъ фермъ было, разумѣется, не особенно велико, — изломъ послѣдовалъ уже при расчетномъ напряженіи въ 154 кгр. на кв. сант.; наблюдаемыя прогибы были въ среднемъ въ 6,5 разъ больше расчетныхъ; взаимное скольженіе брусьевъ было также довольно значительное.

Пятую группу составили опыты надъ фермою VIII изъ балокъ, соединенныхъ брусьями, и фермою IX изъ балокъ, соединенныхъ восьмью шпонками (*фиг. 9 и 10*). Опыты эти были произведены по порученію и на средства генеральной дирекціи австрійскихъ государственныхъ дорогъ. III той, и другой испытуемой фермѣ былъ приданъ обычный строительный подъемъ около $\frac{1}{2000}$ пролета, а именно, фермѣ VIII — 6 сант. и фермѣ IX — 5 сант.; сборка обѣихъ фермъ была выполнена безупоризненно.

Хотя, при минимальномъ боковомъ скольженіи, упругіе прогибы были далеко меньше, чѣмъ во всѣхъ ранѣе испытанныхъ типахъ фермъ, тѣмъ не менѣе предѣлъ упругости при этомъ не особенно повысился, а именно, ферма VIII разрушилась при расчетномъ напряженіи въ 233 кгр. и ферма IX — 239 кгр. на кв. сант. Противодѣйствіе прокладокъ было достаточно велико и во всякомъ случаѣ не могло быть причиною такого незначительнаго предѣла сопротивленія, такъ какъ въ обѣихъ фермахъ давленіе на зубья и соотвѣтственно на дубовыя шпонки по направленію волоконъ передъ моментомъ разрушенія достигло только около 120 кгр. на кв. сант., почему послѣднія и не обнаруживали никакого смятія.

Этому противодѣйствію прокладокъ, также какъ и очень хорошей сборкѣ фермъ, слѣдуетъ приписать вышеупомянутое чрез-

вычайно незначительное боковое скольжение, которое ясно указывает на то, что незначительный предѣлъ сопротивленія этихъ обѣихъ фермъ обусловливается чѣмъ либо инымъ, нежели въ прочихъ испытанныхъ фермахъ, для которыхъ скольжение было гораздо больше и потому можно было допустить, что балки работали какъ просто другъ на другѣ положенныя; но во всѣхъ этихъ фермахъ въ каждой балкѣ можно было константировать сопротивленіе растяженію и сжатію.

Однако въ фермѣ изъ брусевъ, соединенныхъ зубьями, въ верхней балкѣ не было обнаружено сжимающаго напряженія, потому что ферма эта при разрушеніи сломалась сразу, между тѣмъ какъ въ другихъ фермахъ наблюдалось постепенное разслаиваніе и разрушеніе отдѣльныхъ волоконъ. Здѣсь необходимо ближе изслѣдовать значеніе придаваемого фермѣ строительнаго подъема; обыкновенно полагаютъ, что послѣдній увеличиваетъ прочное сопротивленіе, такъ что допускаемое напряженіе фермы съ подъемомъ можно принимать больше, чѣмъ прямой. Такъ, напримѣръ, въ одномъ сочиненіи о мостахъ читаемъ: „если балкѣ приданъ подъемъ, то верхнія волокна ея имѣютъ напряженіе $+K$, нижнія — напряженіе $-K$; но нагрузка можетъ быть настолько велика, что напряженію верхнихъ волоконъ будетъ $-K$, а нижнихъ $+K$; поэтому и прочное сопротивленіе увеличится до такой величины, какъ будто бы подъема придаваемо не было и безопасное напряженіе было $=2K$. Такимъ образомъ подъемъ увеличиваетъ прочное сопротивленіе вдвое“.

На основаніи результатовъ произведенныхъ опытовъ, съ такимъ понятіемъ никоимъ образомъ нельзя согласиться, такъ какъ иначе предѣлъ разрушенія былъ бы гораздо выше; вслѣдствіе подъема придаваемого фермѣ, составленной изъ брусевъ, соединенныхъ зубьями, въ крайнихъ волокнахъ каждой балки по расчету должно было проявиться сжимающее и соотвѣтственно растягивающее напряженіе, въ 108 кгр. на кв. сант., а такое напряженіе по сравненіи съ полученнымъ временнымъ сопротивленіемъ, позволяетъ считать вышеприведенное заключеніе неосновательнымъ.

Это противорѣчіе отчасти объясняется тѣмъ, что происходитъ при самомъ изготовленіи фермъ. При пригонкѣ зубевъ отдѣльных

Возможно, что передача усилия происходит такимъ образомъ, что перерѣзанный слой волоконъ дѣйствуетъ какъ совершенно нейтральный; но можетъ быть и такъ, что среднія балки на всю ихъ высоту слѣдуетъ разсматривать какъ нейтральный слой, т. е. такой, въ которомъ не происходитъ никакихъ иныхъ измѣненій напряженій, кромѣ уравниванія растягивающихъ и сжимающихъ напряженій, вызванныхъ строительнымъ подъемомъ.

На основаніи такихъ предположеній, напряженіе въ крайнихъ волокнахъ естественно будетъ превышать его расчетную величину и такимъ образомъ является возможность объяснить то незначительное временное сопротивление составныхъ балокъ, которое наблюдалось при опытахъ.

При этомъ можно замѣтить, что ферма изъ двухъ составныхъ балокъ, весьма вѣроятно, дала бы относительно болѣе благопріятный результатъ, потому что въ такомъ случаѣ слой волоконъ, соотвѣтствующій врубкѣ зубьевъ, совпадалъ бы съ теоретическою нейтральною осью, т. е. съ серединою фермы; но и для такой фермы временное сопротивление будетъ менѣе, чѣмъ вычисленное для простой балки.

Вообще же изъ приведенныхъ опытовъ слѣдуетъ, что фермы, составленныя изъ 2-хъ брусевъ и ферма изъ 4-хъ брусевъ, будутъ имѣть временное сопротивление соотвѣтственно равное $\frac{4}{3}$ и $\frac{3}{4}$ временнаго сопротивления фермъ, составленныхъ изъ 3-хъ брусевъ.

Для лучшаго изслѣдованія полученныхъ результатовъ, кромѣ того, были подвергнуты испытанію 5 простыхъ балокъ поперечнаго сѣченія 20×25 сант., пролетомъ въ 4 метр., доведенныя до излома дѣйствіемъ отдѣльнаго груза, приложеннаго по серединѣ пролета, и по полученнымъ упругимъ прогибамъ опредѣленъ коэффициентъ упругости. При этомъ опредѣлены слѣдующія среднія величины.

| | | | | | |
|--|---------|------|----|-----|-------|
| для временнаго сопротивления | 440 | кгр. | на | кв. | сант. |
| » коэфф. упругости | 117.000 | » | » | » | » |
| » предѣла пропорціональности | 200 | » | » | » | » |

Подъ именемъ послѣдняго слѣдуетъ понимать то напряженіе, до котораго упругіе прогибы остаются пропорціональными нагрузкѣ. *Предѣлъ упругости* (до наступленія котораго не полу-

чается неисчезающихъ прогибовъ) лежитъ значительно выше, но по недостатку времени не былъ точно опредѣленъ.

Всѣ эти числа были бы около 7% выше, если бы одна изъ балокъ не оказалась значительно меньшей прочности; изслѣдованіе выяснило, что эта балка, хотя и совершенно здоровая, была изготовлена изъ дерева, росшаго на опушкѣ лѣса, волокна котораго съ навѣтренной стороны были слишкомъ жестки, не обладая достаточной тягучестью, почему и оказали сравнительно меньшее сопротивленіе растяженію.

Чрезвычайно малое сопротивленіе шпонокъ смятію перпендикулярно къ волокнамъ побудило произвести опыты въ этомъ отношеніи надъ отдѣльными призмами, причемъ также было опредѣлено и временное сопротивленіе раздробленію по направленію волоконъ. Опыты эти дали слѣдующіе результаты:

а) Временное сопротивленіе раздробленію вдоль волоконъ. Испытуемые образцы состояли изъ призмъ въ 30 сант. длины поперечнаго сѣченія 10×10 сант.; для дуба (среднее изъ 3 опытовъ)—409 кгр. на квадр. сант.; удивительно, что при этомъ коэффициентъ упругости до предѣла упругости (до постоянныхъ продольныхъ измѣненій) постепенно возрасталъ, а именно:

при $S = 40$ кгр. на квадр. сант. $E = 31.000$

„ $S = 120$ „ „ „ „ $E = 35.000$

„ $S = 200$ „ „ „ „ $E = 49.000$

„ $S = 280$ „ „ „ „ $E = 53.000$.

Начиная отъ предѣла упругости до разрушающаго груза, модуль $E = \frac{S}{\Delta l/l}$ послѣдовательно уменьшался до $E = 14.000$, соотвѣтствующаго разрушающему грузу. Для сосны (среднее изъ 3 опытовъ)—312 кгр. на кв. сант.; въ данномъ случаѣ коэффициентъ упругости послѣдовательно уменьшался

отъ $E = 120.000$ для $S = 80$ кгр. на кв. сант.

до $E = 80.000$ „ $S = 220$ „ „ „ „

для большихъ нагрузокъ наступаетъ уже постоянное укороченіе и разрушающій грузъ соотвѣтствуетъ отношенію $\frac{S}{\Delta l/l} = 14.000$.

При коэффиц. прочности въ $1/4$ можно поэтому принимать безопасное давленіе вдоль волоконъ:

для дуба — 100 кгр. на квадр. сант. и
 для дуба сосны — 100 80 " " " "

b) *Временное сопротивление раздроблению поперек волокон.*
 Образцами для испытанія служили кубики въ 10 сант. въ сторонѣ;

Образцами для испытанія служили кубики въ 10 сант. въ сторонѣ;
 дубъ въ среднемъ далъ 120 кгр. на квадр. сантим. и
 дубсосна " " " 40 " " " "

При этомъ напряженіе, соответствующее предѣльной нагрузкѣ, было принято то, при которомъ постоянное относительное укороченіе составляло болѣе 10%. Собственно этотъ предѣлъ нельзя было точно установить, потому что сжатіе могло продолжаться еще довольно долго. Такъ, на примѣръ, для кубика изъ сосны: при напряженіи 42 кгр. на кв. сант. относ. укороч. 10,8 проц.

| | | | | | | | | | | |
|------------------|----|-----|---|---|---|---|---|---|------|-------|
| при " напряженіи | 42 | 50 | " | " | " | " | " | " | 10,8 | проц. |
| " " " | " | 50 | " | " | " | " | " | " | 18,7 | " |
| " " " | " | 60 | " | " | " | " | " | " | 28,7 | " |
| " " " | " | 80 | " | " | " | " | " | " | 40,7 | " |
| " " " | " | 200 | " | " | " | " | " | " | 60,0 | " |

При дальнѣйшей нагрузкѣ годовые круги древесины совершенно деформируются, дерево сжимается какъ туба и временно сопротивленіе раздробленію, собственно говоря, уже совершенно превзойдено, хотя и показываются маленькія трещинки. Если при этомъ годовые круги расположены нормально къ направлению дѣйствующаго усилія, то сопротивленіе нѣсколько больше, при направленіи касательномъ.

Коеффициентъ упругости обоихъ сортовъ дерева очень незначителенъ, для дуба онъ колебался между 2.000 и 3.500, для сосны, въ среднемъ составлялъ 1.850 кгр. на кв. сант. Поэтому временное сопротивленіе раздробленію перпендикулярно къ волоконамъ очевидно въ временному сопротивленію вдоль волоконъ составляетъ

| | |
|--------------------|-----|
| для дуба | 30% |
| для дуба | 30% |
| " сосны | 13% |
| сосны | 13% |

При коэфф. безопасности въ 1/4, допускаемое напряженіе для дуба составляетъ 30 кгр. на квадр. сант. и для сосны только 10 кгр. на квадр. сант.

Выводы. Разсматривая результаты всѣхъ произведенныхъ опытовъ, не трудно убѣдиться, что въ нѣкоторыхъ случаяхъ они

совершенно несогласны съ предположеніями, которыми до сихъ поръ руководствовались; тѣмъ не менѣе, по сравненіи между собою, отдѣльные результаты оказываются вполнѣ правдоподобными и не представляютъ противорѣчій.

Для сравненія выгодъ отдѣльныхъ типовъ фермъ обратимся къ графическимъ изображеніямъ, представленнымъ на фиг. 12 и 13 (См. табл. чертеж.). На фиг. 12 нанесены съ одной стороны дѣйствительное временное сопротивление каждой фермы, съ другой—временное сопротивление, соответствующее расчетному напряженію въ 440 кгр., т. е. среднему временному сопротивленію раздробленію для отдѣльныхъ балокъ; кромѣ того, на той же фигурѣ нанесена теоретическая предѣльная нагрузка для 3 простыхъ балокъ (полныхъ и ослабленныхъ дырами для болтовъ), имѣющихъ поперечное сѣченіе 25×25 сант., и пролетъ 10 метр. и, наконецъ, для 3 простыхъ свободно положенныхъ рядомъ балокъ поперечнаго сѣченія 20×29 сант. На фиг. 13 нанесены, какъ линейныя величины, опредѣленные соответственно нагрузкамъ отношенія дѣйствительныхъ прогибовъ къ расчетнымъ, причемъ теоретическій прогибъ принять = 1.

Оставляя въ сторонѣ обѣ фермы IV и X, которыя можно разсматривать только какъ вспомогательныя, и принимая при этомъ въ соображеніе, что мосты съ ѣздою по серединѣ и съ ѣздою по низу стоятъ несомнѣнно ниже мостовъ съ ѣздою по верху, остается сравнить только фермы V и III, какъ обыкновенные временные мосты, и затѣмъ уже фермы VIII и IX, какъ временные мосты болѣе тщательной работы. Обѣ послѣднія фермы сломались при напряженіи въ 236 кгр. на кв. сант., обѣ первыя—при 191 кгр. на кв. сант., т. е. при временномъ сопротивленіи, составляющемъ только 80% врем. сопротивления фермъ второй категоріи.

Сравнительно съ временнымъ сопротивленіемъ отдѣльныхъ балокъ, фермы III и V выдерживаютъ только 45%, фермы второй категоріи—55% предѣльной нагрузки послѣднихъ; такимъ образомъ сопротивление составныхъ фермъ изъ 3-хъ брусевъ въ среднемъ составляетъ только 50%, что, конечно, весьма печально. Въ практикѣ встрѣчаются, разумѣется, и болѣе благопріятныя условія: не всегда по мосту проходятъ только самые тяжелые грузы и

нельзя не принять въ соображеніе, что вслѣдствіе уширенія опоръ съ сильными подбалками надъ ними, пролетъ фермы, принятый въ основаніе разчета, въ дѣйствительности уменьшается на цѣлый метръ или около того. Но, съ другой стороны, нельзя не обратить вниманіе и на то, что деревянныя балки подвергаются вредному вліянію атмосферныхъ перемѣнъ и что въ этомъ отношеніи необходимо принимать всѣ мѣры предосторожности.

Сравнивая оба типа фермъ между собою, увидимъ, что фермы III и V имѣютъ преимущество передъ фермами VIII и IX по отношенію къ легкости сборки, но невыгодны вслѣдствіе меньшей прочности и значительныхъ упругихъ прогибовъ.

Сравненіе фермъ первой группы между собою показываетъ, что составныя балки со шпонками менѣе выгодны, чѣмъ фермы изъ балокъ, соединенныхъ вставными брусками, а именно:

- a) ферма со шпонками вслѣдствіе меньшей высоты при одинаковомъ напряженіи имѣетъ меньшее временное сопротивленіе;
- b) потребный для шпонокъ дубъ не всегда легко получить; мягкое же дерево для шпонокъ ни подъ какимъ видомъ допускать нельзя;
- c) дубовые клинья вслѣдствіе сотрясенія могутъ ослабѣвать и даже вываливаться, почему требуютъ очень строгаго наблюденія;
- d) изготовленіе этихъ клиньевъ представляетъ большія трудности, потому что дубъ вообще трудно поддается обдѣлкѣ и всѣ поверхности шпонокъ необходимо строгать.

Дерево для вставныхъ брусковъ (Klötze) всегда можно получить, пользуясь для нихъ просто обрѣзками отъ длинныхъ балокъ. Работы надъ ними значительно меньше — достаточно двухъ разрѣзовъ ручной пилой: поперечной пилы при этомъ употреблять не слѣдуетъ какъ не дающей точной работы, потому что одинъ прорѣзъ, сдѣланный такой пилой, уже самъ по себѣ имѣетъ ширину въ 5 мм. Такія фермы изъ балокъ, соединенныхъ вставными брусками, не требуютъ никакой особенной тщательности, кромѣ возможно точной разбивки и выполненія врубокъ.

Если сравнивать между собою фермы типовъ VIII и IX, то первая требуетъ значительно меньшей работы и можетъ быть

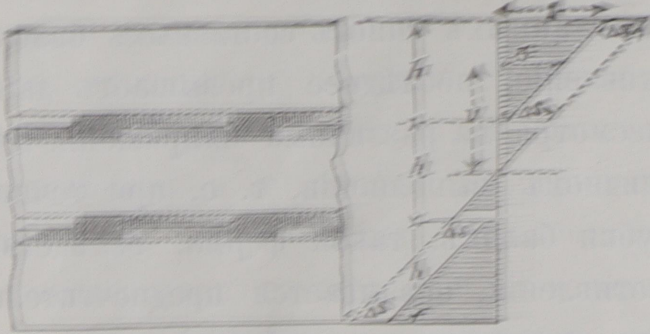
готова скорѣе, чѣмъ послѣдняя, при которой требуется болѣе внимательный надзоръ за работой. При этомъ ферма IX даетъ замѣтно большее сопротивленіе вслѣдствіе большей ея высоты; въ постройкахъ, для возведенія которыхъ имѣется достаточно времени и располагаютъ хорошими плотниками, несомнѣнно предпочтительнѣе пользоваться фермою IX.

Ферма III изъ всѣхъ испытанныхъ типовъ составныхъ балокъ имѣетъ наибольшее сопротивленіе; послѣднее превышаетъ даже сопротивленіе фермы IX, несмотря на различныя напряженія при изломѣ. При возможно солидномъ выполненіи, т. е. при точной пригонкѣ брусковъ во врубки балокъ, такая ферма, вслѣдствіе значительно большаго сопротивленія, оказывается предпочтительнѣе фермы VIII (изъ балокъ, соединенныхъ зубьями) во многихъ случаяхъ, особенно при быстрой постройкѣ временныхъ мостовъ; нужно только при этомъ наблюдать, чтобы во врубкахъ, въ плоскости зацѣпленія брусковъ, прокладывались тонкіе желѣзные листики, чтобы со временемъ волокна постепенно не смяли другъ друга.

II. Расчетъ составныхъ деревянныхъ балокъ по способу проф. Melan'a.

Описанные опыты возбудили громадный интересъ среди инженеровъ и техниковъ. Дѣйствительно, если до сихъ поръ составнымъ балкамъ и не оказывали слишкомъ большаго довѣрія, то во всякомъ случаѣ нельзя было ожидать такихъ неудовлетворительныхъ результатовъ, которые дали эти опыты. Во всѣхъ учебникахъ строительной механики и курсахъ мостовъ находимъ расчетъ этихъ фермъ, основанный на предположеніи, что соединеніе балокъ шпонками или зубьями вполне достаточно для противодѣйствія взаимному сдвигенію этихъ балокъ. Описанные опыты доказали, однако, совершенную несостоятельность этого предположенія, поэтому необходимо выяснитъ причины такого незначительнаго сопротивленія составныхъ деревянныхъ фермъ. Уменьшеніе дѣйствительнаго сопротивленія противъ опредѣленнаго расчетомъ можно объяснить тѣмъ, что въ этомъ случаѣ происходитъ относительное сдвигеніе балокъ, вслѣдствіе чего общей нейтральной оси уже не имѣется и балки приближаются къ состоянію, при которомъ онѣ могутъ имѣть свободное движеніе.

Что такіа сдвигенія, при разсматриваемомъ соединеніи балокъ, должны имѣть мѣсто и не могутъ быть пренебрегаемы, слѣдуетъ уже изъ того, что волокна, перерѣзанныя зубьями и врубками шпонокъ, подвергаются упругому укороченію, которое пропорціонально давленію на зубья. Но этого упругаго сдвигенія до-



Фиг. 1.

Фиг. 2.

статочно для того, чтобы совершенно измѣнить распределеніе напряженій въ балкахъ. Далѣе отсюда же слѣдуетъ заключить, что фермы, соединенныя шпонками, подвергающимися сжатію перпендикулярно въ направленію волоконъ,

будутъ дѣйствовать при одинаковомъ давленіи во врубкахъ менѣе благоприятно, чѣмъ фермы, соединенныя зубьями или вставными брусками, подвергающимися давленію вдоль волоконъ, такъ какъ въ первомъ случаѣ упругія укороченія и взаимное сдвигеніе балокъ будутъ больше.

Принимая въ основаніе вышеизложенныя замѣчанія, профессоръ Melan *) даетъ слѣдующій способъ расчета составныхъ балокъ, основанный на данныхъ, полученныхъ изъ описанныхъ опытовъ Moritz'a Bock'a.

Вслѣдствіе взаимнаго сдвигенія, соприкасающіеся слои волоконъ отдѣльныхъ балокъ не будутъ болѣе одинаково напряжены. Пусть, напримѣръ, въ составной фермѣ, состоящей изъ трехъ балокъ, напряженіе крайнихъ волоконъ средней балки будетъ $= \sigma_1$, напряженіе смежныхъ слоевъ волоконъ верхней, соответственно нижней балки будетъ равно σ_2 и разность $\sigma_1 - \sigma_2 = \Delta s$.

Такъ какъ кривизну всѣхъ трехъ балокъ, а также и вращеніе симметрично расположенныхъ поперечныхъ сѣченій ихъ, можно принять одинаковыми, то нормальныя напряженія въ общемъ могутъ быть представлены графически фигурою 2. Поэтому напряженіе волокна, лежащаго въ разстояніи v отъ оси средней балки, будетъ:

*) Wochenschrift d. österr. Ing. u. Archit. Vereines 1891. № 6.

для верхней или нижней балки $\sigma = \alpha \cdot v - \Delta s$.

„ средней балки $\sigma' = \alpha \cdot v$

Условіе равенства моментовъ внутреннихъ и внѣшнихъ силъ:

$$M = 2 \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{3h}{2}} v \sigma df + \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} v \sigma' df = \frac{9}{4} \alpha b h^3 - 2 b h^2 \Delta s;$$

откуда

$$\alpha = \frac{4}{9} \frac{M + 2 b h^2 \Delta s}{b h^3}$$

и, слѣдовательно,

$$\sigma = \alpha v - \Delta s = \frac{4}{9} \cdot \frac{M v}{b h^3} + \frac{8 v - 9 h}{9 h} \Delta s$$

Подставляя сюда $v = \frac{3}{2} h$, найдемъ наибольшее напряженіе волоконъ

$$S = \frac{2}{3} \frac{M}{b h^2} + \frac{1}{3} \Delta s = s_0 + \frac{1}{3} \Delta s \dots \dots \dots (1).$$

Если бы балки были соединены неподвижно въ одно цѣлое, то наибольшее напряженіе волоконъ было бы равно s_0 .

Точно такимъ же образомъ для фермъ, состоящихъ изъ 2 балокъ, нашли бы наибольшее напряженіе волоконъ:

$$s = s_0 + \frac{1}{4} \Delta s \dots \dots \dots (2).$$

и для фермы изъ 4 балокъ

$$s = s_0 + \frac{3}{8} \Delta s \dots \dots \dots (3).$$

Разность напряженій Δs , какъ не трудно убѣдиться, можно принять пропорціональной сдвигенію ω балокъ на единицу длины, а именно при коэффициентѣ упругости E относительныя продольныя измѣненія смежныхъ волоконъ лежащихъ другъ надъ другомъ балокъ равны $\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = E \sigma_1$ и $\frac{\Delta \lambda'}{\alpha} = E \sigma_2$, поэтому относительное сдвигеніе $\omega = \frac{\Delta \lambda}{\alpha} - \frac{\Delta \lambda'}{\alpha} = E (\sigma_1 - \sigma_2) = E \cdot \Delta s$.

Но съ другой стороны это относительное сдвигеніе ω обусловливается смятіемъ слоевъ волоконъ, соотвѣтствующихъ зацѣпленію шпонокъ или зубьевъ, а послѣднее въ свою очередь находится въ прямомъ отношеніи къ давленію z на поверхность зубьевъ или шпонокъ, такъ что

$$\omega = E \cdot \Delta s = C \cdot z \dots \dots \dots (4).$$

Напримѣръ, если бы шпонки были изъ несжимаемаго матеріала, то получили бы $\omega = 2Ez$ и $\Delta s = 2z$; но, принимая во вниманіе смятіе шпонокъ, коэффициентъ C въ уравненіи (4) слѣдуетъ взять больше. Изъ предъидущаго слѣдуетъ, что вообще

$$\Delta s = \beta \cdot z$$

и наибольшее напряженіе волоконъ:

$$\left. \begin{array}{l} \text{при двухъ балкахъ} \quad S = S_0 + \frac{1}{4} \beta \cdot Z \\ \text{„ трехъ „} \quad S = S_0 + \frac{1}{3} \beta \cdot Z \\ \text{„ четырехъ „} \quad S = S_0 + \frac{3}{8} \beta \cdot Z \end{array} \right\} \dots \dots \dots (5).$$

причемъ давленіе Z опредѣляется извѣстнымъ образомъ по перерѣзывающему усилию.

Для опредѣленія коэффициента β воспользуемся вышеприведенными результатами опытовъ.

а) *Фермы со шпонками.* Въ данномъ случаѣ воспользуемся только опытомъ съ фермою V, такъ какъ сопротивленіе соединенія шпонками въ фермѣ II было совершенно превзойдено и прочность этой формы не превышала прочности трехъ рядомъ положенныхъ балокъ.

Давленіе на шпонки здѣсь точно также было принято слишкомъ велико. Въ фермѣ V при изломѣ оказалось $s_0 = 191$ кгр. на кв. сант. и $Z = 95$ кгр. на кв. сант., а поэтому, принимая во вниманіе, что временное сопротивленіе при изломѣ отдѣльныхъ балокъ S составляло отъ 400 до 440 или въ среднемъ 420 кгр. на кв. сант., будемъ имѣть:

$$420 = 191 + \frac{1}{3} \beta \cdot 95,$$

откуда

$$\beta = 7,2.$$

Такимъ образомъ для фермы VII, состоявшей изъ 4 балокъ, соединенныхъ шпонками, и доведенной до излома при расчетномъ напряженіи $s_0 = 147$ кгр. и одновременномъ давленіи на поперечные бруски въ среднемъ промежуткѣ, $Z = 96$ кгр., дѣйствительное временное сопротивленіе излому составляло-бы:

$$s = 147 + \frac{3}{8} \cdot 7,2 \cdot 96 = 406 \text{ кгр. на кв. сант.}$$

б) Ферма со вставными брусками. Для фермы III, какъ оказалось изъ опыта, $s_0 = 191$ кгр. на кв. сант. и $Z = 185$ кгр. на кв. сант., поэтому β опредѣлится изъ уравненія:

$$420 = 191 + \frac{1}{3}\beta \cdot 185,$$

откуда

$$\beta = 3,7.$$

Примѣняя этотъ коэффициентъ къ фермѣ VI, найдемъ, для напряженія при изломѣ, $S = 205 + \frac{1}{3} \cdot 3,7 \cdot 200 = 451$ кгр. на кв. сант., что представляется весьма вѣроятнымъ, если принять во вниманіе особенную вязкость стыка въ этой фермѣ.

в) Фермы изъ балокъ, соединенныхъ зубьями и фермы со шпонками, расположенными по направленію волоконъ. Фермы VIII и IX сломались при расчетномъ напряженіи въ 233, соотвѣтственно 239 кгр. на кв. сант. или въ среднемъ 336 кгр. на кв. сант. Давленіе во врубкѣ въ обоихъ случаяхъ составляло 120 кгр. на кв. сант. Такимъ образомъ

$$420 = 236 + \frac{1}{3}\beta \cdot 120,$$

откуда

$$\beta = 4,6.$$

Слѣдствія. Изъ изложеннаго явствуетъ, что расчетъ составныхъ балокъ можно вести какъ и прежде, т. е. въ предположеніи взаимной неподвижности балокъ, однако, при этомъ безопасное напряженіе необходимо принимать меньше, чѣмъ для простыхъ балокъ а именно:

- | | | | |
|------------------------------------|---|---|--------------|
| а) для фермъ со шпонками | $s_0 = s - \frac{1}{m} \cdot 7,2 \cdot Z$ | } | (6). |
| б) для фермъ съ брусками | $s_0 = s - \frac{1}{m} \cdot 3,7 \cdot Z$ | | |
| в) для фермъ, соединенныхъ зубьями | $s_0 = s - \frac{1}{m} \cdot 4,6 \cdot Z$ | | |

Коэффициентъ $\frac{1}{m}$ составляетъ:

| | |
|----------------------------|-----------------------------|
| для 2-хъ связанныхъ балокъ | $\frac{1}{m} = \frac{1}{4}$ |
| „ 3-хъ „ „ | $\frac{1}{m} = \frac{1}{3}$ |
| „ 4-хъ „ „ | $\frac{1}{m} = \frac{3}{8}$ |

причем σ означает напряжение дерева, допускаемое для простых балок и Z — наибольшее давление на врубку. Вообще, чтобы соединение было действительно, т. е., чтобы составная ферма имела большую прочность, чем простая, рядом лежащая балка, давление на врубку не должно превосходить известного предѣла. Предѣлъ этот определяется изъ условия, чтобы для двухъ связанныхъ балокъ было $S_0 > \frac{S}{2}$; для 3-хъ связанныхъ балокъ $S_0 > \frac{S}{3}$ и для 4-хъ связанныхъ балокъ $S_0 > \frac{S}{4}$.

Поэтому вообще можно допускать

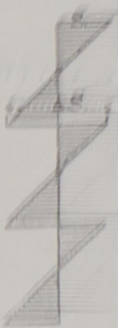
$$Z < \frac{2S}{3} \dots \dots \dots (7)$$

Въ фермѣ II это условие не было выполнено, почему соединеніе шпонками и оказалось недействительнымъ.

III. Поправка къ расчету деревянныхъ составныхъ балокъ, предложенная проф. Thullie.

Теорія профессора Melan'a, какъ припомнимъ, основана на томъ, что вълѣдствіе сдвиженій, которыя должны имѣть мѣсто и при самой тщательной сборкѣ составныхъ балокъ, такъ какъ послѣднія состоятъ изъ упругаго матеріала, — соприкасающіеся слои волоконъ отдѣльныхъ балокъ подвергаются уже неодинаковымъ напряжениямъ и что разность этихъ напряженій $\Delta\sigma$ (фиг. 2) пропорціональна давленію на врубку. Фиг. 2 представляетъ распредѣленіе напряженій по площади поперечнаго сѣченія.

Не смотря, однако, на чрезвычайно остроумную теорію профессора Melan'a, предложенный имъ расчетъ составныхъ балокъ, по мнѣнію профессора Thullie, приводитъ отчасти къ невѣроятнымъ, отчасти къ весьма неутѣшительнымъ результатамъ.



Фиг. 3.

Въ самомъ дѣлѣ изъ фиг. 2 видно, что при $\Delta\sigma = 0$ ферма работаетъ, какъ простая балка. Чѣмъ больше будетъ $\Delta\sigma$, тѣмъ менѣе будетъ сопротивленіе составной балки. Когда $\Delta\sigma = 2S$ (фиг. 3), тогда составляющія балки работаютъ независимо другъ отъ друга, какъ будто бы между ними не было никакой связи. Больше $\Delta\sigma$ быть не можетъ, такъ какъ этотъ предѣлъ соотвѣтствуетъ

тремя другъ на друга положеннымъ балкамъ, поэтому *max.*
 $\Delta\sigma = 2S$.

Но по Melan'у

$$\Delta\sigma = \beta Z (1)$$

гдѣ β есть численный коэффициентъ и Z — давленіе на врубку. Въ фермѣ V при изломѣ вычисленное по обыкновенной формулѣ разрушающее напряженіе

$$S_0 = \frac{6M}{bh^2} = 191 \text{ клгр. на кв. сант. и}$$

$Z = 95$ клгр. на кв. сант., а по Melan'у $\beta = 7,2$, слѣдовательно

$$\Delta\sigma = 7,2 \times 95 = 674 \text{ клгр. на кв. сант.}$$

или почти равно $2 \times 420 = 840$, что представляется невѣроятнымъ.

Заключительные выводы профессора Melan'а, какъ упомянуто выше, весьма неутѣшительны. Такъ, напримѣръ, для фермъ, составленныхъ изъ 3-хъ балокъ, соединенныхъ шпонками, Melan получаетъ

$$S_0 = S - \frac{1}{3} \cdot 7,2Z = S - 2,4Z$$

причемъ S означаетъ допускаемое напряженіе для простыхъ балокъ, а S_0 — для составной.

Пусть $Z = 30$ клгр. на кв. сант., тогда $S_0 = 80 - 2,4 \cdot 30 = 8$ клгр. на кв. сант.; если же $Z = 20$ клгр. на кв. сант., то $S_0 = 80 - 2,4 \cdot 20 = 32$ клгр. на кв. сант.

Для фермъ, составленныхъ изъ 3-хъ балокъ, соединенныхъ зубьями, $S_0 = 80 - \frac{1}{3} \cdot 4,6Z = 80 - 1,53Z$. Для $Z = 30$ клгр. на кв. сант. будемъ имѣть $S_0 = 34$ клгр. на кв. сант. Очевидно, что при такихъ допускаемыхъ напряженіяхъ о примѣненіи на практикѣ составныхъ деревянныхъ балокъ не можетъ быть и рѣчи.

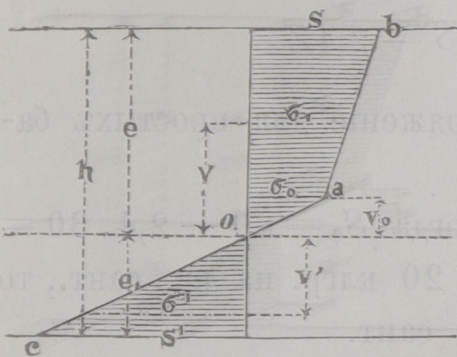
Но почему, однако, опытъ не согласуется съ этою теоріею? Слѣдуетъ думать, что теорія сама по себѣ совершенно правильна, но коэффициентъ β слишкомъ великъ. При выводѣ этой теоріи на основаніи опытовъ Воск'а, проф. Melan, очевидно, упустилъ изъ виду то обстоятельство, что за предѣломъ упругости напряженія распределяются по совершенно иному закону. Если мы желаемъ принять въ основаніе опыты на изломъ, то должны опредѣлить напряженія, которыя наступаютъ въ моментъ разрушенія и не

слѣдуютъ затѣмъ простымъ законамъ, справедливымъ только до предѣла упругости.

Поэтому профессоръ Thullie считаетъ необходимымъ для деревянныхъ фермъ, доведенныхъ до разрушенія, установить особыя формулы, которыя и послужатъ для опредѣленія коэффициента β .

Для этого нужно припомнить нѣсколько извѣстныхъ положеній изъ теоріи упругости. Модуль упругости для хвойнаго дерева, при растяженіи вдвое больше, чѣмъ при сжатіи, такъ что приблизительно при растяженіи $s' = 600$ до 800 клгр. на кв. сант. и при сжатіи $s = 300 - 400$ клгр. на кв. сант. Модуль упругости при разрушеніи лежитъ между s и s' , такъ что $s' = 450$ до 600 клгр. на кв. сант., по опытамъ же Воск'а составляетъ около 420 клгр. на кв. сант. Это кажущееся противорѣчіе разъясняется слѣдующимъ образомъ.

Предѣлъ упругости дерева при растяженіи настолько приближается къ модулю упругости, что едва можетъ быть опредѣленъ *);



Фиг. 4.

для сжатія же онъ соотвѣтствуетъ около $160 - 200$ клгр. на кв. сант.

Поэтому, если простая деревянная балка будетъ нагружена до разрушенія, то растягивающія напряжения σ' (фиг. 4) будутъ пропорціональны разстояніямъ v' отъ нейтральной оси, что однако не будетъ имѣть мѣста для сжимающихъ

напряженій. Такимъ образомъ до предѣла упругости получимъ прямую линію oa и нѣкоторую кривую, за которую для простоты примемъ прямую ab . Результаты вслѣдствіе этого будутъ не вполне точны, тѣмъ не менѣе они дадутъ надлежащее понятіе о распредѣленіи напряженій.

При такомъ предположеніи для сжатой до предѣла упругости части будетъ

$$\sigma = \alpha v \dots \dots \dots (1)$$

и поэтому:

$$\alpha_1 = \alpha (v_0 + \mu [v - v_0]) = \alpha v_0 (1 - \mu) - \alpha \mu v = \sigma_0 (1 - \mu) + \alpha \mu v \dots (2)$$

*) См. Mittheilungen aus dem mechanisch-technischen Laboratorium der techn. Hochschule in München von Bauschinger, IX Heft.

гдѣ μ представляетъ коэффициентъ, который по опытамъ Баушингера можетъ быть принятъ равнымъ $\frac{1}{10}$.

Для вытянутой части:

$$\sigma' = \alpha v' \dots \dots \dots (3).$$

Сумма сжимающихъ и растягивающихъ напряженій должна быть равна нулю, поэтому:

$$\int_0^{v_0} \sigma dF + \int_{v_0}^e \sigma' dF - \int_0^e \sigma' dF = 0$$

или:

$$\sigma_0 \int_0^v v dF + \sigma_0 (1 - \mu) \int_{v_0}^e dF + \alpha \mu \int_{v_0}^e v dF - \int_0^e v' dF = 0$$

Или:

$$\alpha S_0 + \sigma_0 (1 - \mu) F_1 + \alpha \mu S_1 - \alpha S' = 0 \dots \dots (4)$$

Но

$$F_1 = b (e - v_0); S_1 = \frac{b}{2} (e - v_0) (e + v_0) = \frac{b(e^2 - v_0^2)}{2};$$

$$S_0 = \frac{bv_0^2}{2} \text{ и } S' = \frac{be'^2}{2}.$$

Подставляя эти величины въ уравн. (4), получимъ:

$$\sigma_0 (1 - \mu) b (e - v_0) + \alpha \left(\mu \frac{b(e^2 - v_0^2)}{2} + \frac{bv_0^2}{2} - \frac{be'^2}{2} \right) = 0.$$

Такъ какъ величина v_0^2 по отношенію къ e^2 незначительна, то можемъ ею пренебречь и написать:

$$2 \sigma_0 (1 - \mu) (h - e' - v_0^2) + \alpha (\mu e^2 - e'^2) = 0.$$

Далѣе изъ уравн. (3) получимъ: $\alpha = \frac{\sigma_1}{v'} = \frac{s'}{e'}$.

$$\text{Кромѣ того } 2\sigma_0 (1 - \mu) (h - e' - v_0) - s'e' + s'\mu e \frac{e}{e'} = 0$$

$$2\sigma_0 (1 - \mu) (h - v_0) + s'\mu h \frac{e}{e'} = s'e' \left(1 + \mu \frac{e}{e'} \right) + 2\sigma_0 (1 - \mu) e';$$

откуда

$$e' = \frac{2\sigma_0 (1 - \mu) (h - v_0) + s'\mu h \frac{e}{e'}}{2\sigma_0 (1 - \mu) + s' \left(1 + \mu \frac{e}{e'} \right)} \dots \dots \dots (5).$$

Если примемъ $\frac{e}{e'} = 2$, $\sigma_0 = 160$ клгр. на кв. сант., $\mu = 0,1$, $v_0 = 0,1h$, $S' = 600$ клгр. на кв. сант., то по уравн. (5)

$$e' = 0,32 \text{ или } e' = \frac{h}{3} \dots \dots \dots (6)$$

а вмѣстѣ съ тѣмъ $\frac{e}{e'} = 2$, какъ и было принято.

Такимъ образомъ нейтральная ось въ моментъ разрушенія находится на $\frac{1}{3}$ высоты поперечнаго сѣченія.

Условіе равенства моментовъ внутреннихъ и вѣшнихъ силъ даетъ:

$$M = \alpha \int_0^{v_0} v^2 dF + \sigma_0 (1 - \mu) \int_{v_0}^e v dF + \alpha \mu \int_{v_0}^e v^2 dF + \alpha \int_0^{e'} v^2 dF$$

или, пренебрегая по малости величины первымъ членомъ второй части равенства, получимъ:

$$M = \sigma_0 (1 - \mu) S_1 + \alpha \mu J_1 + \alpha J' \dots \dots \dots (7)$$

гдѣ J_1 означаетъ моментъ инерціи верхней части, а J' — нижней части поперечнаго сѣченія относительно нейтральной оси.

Подставляя въ уравн. (7)

$$\alpha = \frac{s'}{e'}, S_1 = \frac{b(e^2 - v_0^2)}{2} = \frac{be^2}{2}, J_1 = \frac{1}{3} be^3, J' = \frac{1}{3} be'^3,$$

найдемъ:

$$M = \sigma_0 (1 - \mu) \frac{be^2}{2} + \frac{s'b}{3e'} (\mu e^3 + e'^3)$$

и отсюда

$$s' = \frac{3e'}{b(\mu e^3 + e'^3)} M - \frac{3\sigma_0(1-\mu)}{2\left[\mu \frac{e}{e'} + \left(\frac{e'}{e}\right)^2\right]} \dots \dots \dots (8)$$

Для $e' = \frac{1}{3} h$ и $e = \frac{2}{3} h$ будемъ имѣть:

$$s' = \frac{27}{1+8\mu} \cdot \frac{M}{bh^2} - \frac{6\sigma_0(1-\mu)}{1-8\mu} \dots \dots \dots (9)$$

и для $\mu = 0,1$

$$s' = \frac{15M}{bh^2} - 3\sigma_0 \dots \dots \dots (10)$$

Если теперь подставимъ въ уравн. (7) изъ (2)

$$\alpha = \frac{s - \sigma_0(1-\mu)}{\mu e},$$

то получимъ:

$$M = \sigma_0 (1 - \mu) \frac{be^2}{2} + \frac{s - \sigma_0(1-\mu)}{\mu e} \frac{b}{3} (\mu e^3 + e'^3)$$

$$M = \sigma_0 (1 - \mu) \frac{be^2}{2} + \frac{b}{3e} (s - \sigma_0 [1 - \mu]) \left(e^3 + \frac{e'^3}{\mu}\right)$$

$$\text{и } S = \frac{3Me}{b\left(e^3 + \frac{e'^3}{\mu}\right)} - \frac{3\sigma_0(1-\mu)e^3}{2\left(e^3 + \frac{e'}{\mu}\right)} + \sigma_0(1-\mu) \dots \dots \dots (11)$$

Для $e' = \frac{1}{3} h$, $e = \frac{2}{3} h$ будемъ имѣть:

$$s = \frac{54}{8 + \frac{1}{\mu}} \cdot \frac{M}{bh^2} - \frac{3(1-\mu)\sigma_0}{2\left(1 + \frac{1}{8\mu}\right)} + \sigma_0(1-\mu)$$

и для $\mu = 0,1$

$$S = \frac{3M}{bh^2} + 0,3\sigma_0 \dots \dots \dots (12).$$

Если наибольшее напряжение, соответствующее излому, вычислимъ по обычной формулѣ и назовемъ его черезъ S_0 , то

$$S_0 = \frac{6M}{bh^2} \dots \dots \dots (13).$$

Подставляя это выраженіе s_0 въ уравн. 10 и 12 найдемъ:

$$\left. \begin{aligned} s' &= 2,5 s_0 - 3\sigma_0 \\ s &= \frac{1}{2} s_0 + 0,3\sigma_0 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (14).$$

Изъ опытовъ на переломъ въ среднемъ получается $s = 450$ кгр. на кв. сантим., примемъ далѣе по *Баушингеру* $\sigma_0 = 160$ кгр. на кв. сантим., тогда:

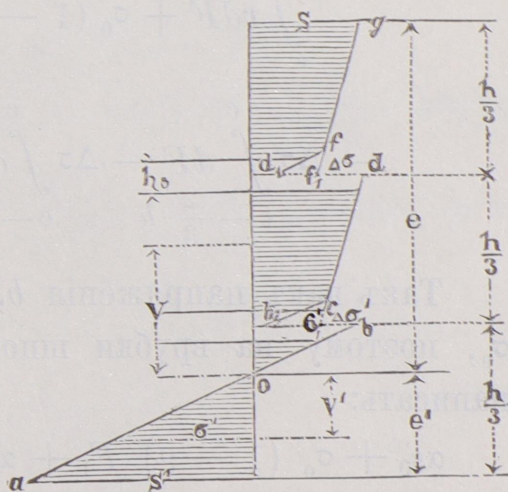
$$s' = 2,5 \cdot 450 - 3 \cdot 160 = 645 \text{ кгр. на кв. сантим.}$$

$$\text{и } s = \frac{1}{2} 450 + 0,3 \cdot 160 = 273 \text{ " " " "}$$

Отсюда усматривается, что полученныя цифры достаточно согласуются съ опытами на растяженіе и сжатіе и что при разрушеніи временное сопротивленіе вытягиванію превосходится раньше, чѣмъ временное сопротивленіе сжатію, что также подтверждается и опытами.

Разсмотримъ теперь распредѣленіе напряженій въ составной деревянной балкѣ въ моментъ излома (фиг. 5).

И въ этомъ случаѣ линія напряженій представляетъ ломаную прямую. Но такъ какъ шпонки сжимаемы и такъ какъ изготовленіе балокъ не можетъ быть совершенно точно, то, вслѣдствіе побочных напряженій, обуславливающихъ давленіе на шпонки, здѣсь будетъ имѣть мѣсто небольшое сдвигеніе волоконъ расположенныхъ другъ надъ другомъ балокъ, что въ свою очередь будетъ имѣть послѣдствіемъ разность напряженій этихъ волоконъ. Линію напряженій представляетъ здѣсь ломаная линія $aobb_1cdd_1fg$.



Фиг. 5.

Подставляя эти значенія въ предыдущее уравненіе, получимъ:

$$\sigma_0 (1 - \mu) (h - e' - v_0) + \frac{\alpha}{2} (v_0^2 + \mu e^2 - \mu v_0^2 - e'^2) + \\ - \frac{2}{3} \Delta\sigma' - \frac{1}{3} \Delta\sigma - 2h_0\sigma_0 = 0$$

v_0^2 сравнительно съ e^2 очень мало, точно также v_0 — сравнительно съ h , почему ими можно пренебречь и тогда

$$\sigma_0 (1 - \mu) (h - e') + \frac{\alpha}{2} (\mu e^2 - e'^2) - \frac{1}{3} (2\Delta\sigma' + \Delta\sigma) + \\ - 2h_0\sigma_0 = 0.$$

Изъ уравненія (18) получимъ

$$\alpha = \frac{\sigma'}{v'} = \frac{s'}{e'},$$

отсюда

$$\sigma_0 (1 - \mu) (h - e') + \frac{s'}{2e'} (\mu e^2 - e'^2) - \frac{1}{3} (2\Delta\sigma' + \Delta\sigma) + \\ - 2h_0\sigma_0 = 0$$

и

$$e' = \frac{2\sigma_0 (1 - \mu) h}{2\sigma_0 (1 - \mu) + s' + s'\mu \frac{e}{e'}} + \frac{s'\mu \frac{e}{e'} h}{2\sigma_0 (1 - \mu) + s' + s'\mu \frac{e}{e'}} + \\ - \frac{2h}{3} \cdot \frac{2\Delta\sigma' + \Delta\sigma + 6\sigma_0 \frac{h_0}{h}}{2\sigma_0 (1 - \mu) + s' + s'\mu \frac{e}{e'}} \dots \dots \dots (20)$$

Примемъ теперь:

$\sigma_0 = 160$ клгр. на кв. сант., $\mu = 0,1$, $s' = 600$ клгр. на кв. сант., $\frac{h_0}{h} = 0,15$, тогда $\frac{e}{e'} = 3,5$ и $\Delta\sigma = \Delta\sigma' = 80$; такъ что:

$$e' = \left(\frac{288}{1098} + \frac{210}{1098} - \frac{256}{1098} \right) h = 0,22 h$$

Нейтральная ось находится поэтому въ моментъ излома приблизительно на $\frac{1}{4}$ высоты фермы.

Условіе равенства моментовъ внутреннихъ и внѣшнихъ силъ даетъ:

$$M = \alpha \int_0^{v_0} v^2 dF + \sigma_0 (1 - \mu) \int_{v_0}^e v dF + \\ + \alpha \mu \int_{v_0}^{e'} v^2 dF - \Delta\sigma' \int_{e - \frac{2}{3}h}^e v dF + \\ - \Delta\sigma \int_{e - \frac{1}{3}h}^e v^2 dF + \sigma \int_0^{e'} v'^2 dF - bh_0\sigma_0 (2e - h)$$

или: $M = aJ_0 + \sigma_0 (1 - \mu) s_1 + \mu J_1 - \Delta\sigma' s_2 - \Delta\sigma s_3 + \mu J_1 + aJ_1 +$
 или: $M = \sigma_0 J_0 + 2\sigma_0 (1 - \mu) s_1 + \mu J_1 - \Delta\sigma' s_2 - \Delta\sigma s_3 + \mu J_1 + aJ_1 +$
 $- bh_0 \sigma_0 (2e - h).$

Моментом инерции J_0 по малости его величины сравнительно с J можем пренебречь.

Далее $S_1 = \frac{1}{2} (e^2 - v_0^2) = \frac{b}{2} e^2 = \frac{1}{3} J_1 = \frac{1}{3} b e^3$, $J = \frac{1}{3} b e^3$,
 Далее $S_1 = \frac{1}{2} (e^2 - v_0^2) = \frac{b}{2} e^2$, $J_1 = \frac{1}{3} b e^3$, $J = \frac{1}{3} b e^3$,
 $S_2 = \frac{2}{3} b h$, $S_3 = \frac{11}{36} b h^2$, $S_4 = \frac{b h}{3}$, $S_5 = \frac{7}{36} b h^2$, $S_6 = \frac{1}{3} b h$, $S_7 = \frac{7}{36} b h^2$, $S_8 = \frac{1}{3} b h$,
 $S_9 = \frac{2}{3} b h$, $S_{10} = \frac{11}{36} b h^2$, $S_{11} = \frac{b h}{3}$, $S_{12} = \frac{7}{36} b h^2$, $S_{13} = \frac{1}{3} b h$, $S_{14} = \frac{7}{36} b h^2$, $S_{15} = \frac{1}{3} b h$,
 поэтому:

поэтому:
 $M = \sigma_0 (1 - \mu) \frac{bc^2}{2} + \frac{ab}{3} (\mu e^3 + e'^3) - \frac{bh^2}{36} (10\Delta\sigma' + 7\Delta\sigma) +$
 $M = \sigma_0 (1 - \mu) \frac{bc^2}{2} + \frac{ab}{3} (\mu e^3 + e'^3) - \frac{bh^2}{36} (10\Delta\sigma' + 7\Delta\sigma) +$
 $- 0,15bh\sigma_0 (2e - h) \dots \dots \dots (21)(21).$

Подставляя теперь $\alpha = \frac{S}{e'}$, определяем отсюда S' , тогда

Подставляя теперь $\alpha = \frac{S}{e'}$, определяем отсюда S' , тогда
 $S' = \frac{3Me'}{b(\mu e^3 + e'^3)} - \frac{3\sigma_0(1-\mu)e^2 e'}{2(\mu e^3 + e'^3)} - \frac{h^2 e'}{12(\mu e^3 + e'^3)} + \frac{10\Delta\sigma' + 7\Delta\sigma}{12(\mu e^3 + e'^3)} +$
 $+ \frac{0,15bh\sigma_0(2e-h)}{\mu e^3 + e'^3}$

и для $e = 0,78h$, $e' = 0,22h$ и $\mu = 0,1$
 и для $e = 0,78h$, $e' = 0,22h$ и $\mu = 0,1$
 $S' = 11,35 \frac{M}{bh^2} - 3,107\sigma_0 + 3,15\Delta\sigma' + 2,205\Delta\sigma + 0,95\sigma_0(2e-h) \dots (22)(22).$

Далее из уравнения (17) имеем:

Далее из уравнения (17) имеем:
 $a = \frac{S}{\mu e} = \frac{S - \sigma_0(1-\mu) \frac{bc^2}{2} + \Delta\sigma' s_2 + \Delta\sigma s_3}{\mu e}$

Подставляя это выражение в (21), находим:

Подставляя это выражение в (21), находим:
 $M = \sigma_0 (1 - \mu) \frac{bc^2}{2} + \frac{ab}{3} [S + \frac{S - \sigma_0(1-\mu) \frac{bc^2}{2} + \Delta\sigma' s_2 + \Delta\sigma s_3}{\mu e}] - \frac{bh^2}{36} (10\Delta\sigma' + 7\Delta\sigma) - bh_0 \sigma_0 (2e - h)$

и отсюда получаем:

и отсюда получаем:
 $S = \frac{3Me}{b(e^3 - \frac{e'^3}{\mu})} - \frac{3\sigma_0(1-\mu)e^2}{2(e^3 - \frac{e'^3}{\mu})} - \frac{h^2 e}{12(e^3 - \frac{e'^3}{\mu})} + \frac{10\Delta\sigma' + 7\Delta\sigma}{12(e^3 - \frac{e'^3}{\mu})} + \frac{3eh\sigma_0(2e-h)}{e^3 - \frac{e'^3}{\mu}}$

Для $h_0 = 0,15h$, $e = 0,78h$, $e' = 0,22h$, $\mu = 0,1$ найдем:

Для $h_0 = 0,15h$, $e = 0,78h$, $e' = 0,22h$, $\mu = 0,1$ найдем:
 $S = 4,02 \frac{M}{bh^2} + 0,101\sigma_0 + 0,118\Delta\sigma' - 0,217\Delta\sigma + 0,338\sigma_0(2e-h) \dots (23)(23).$

Если подставим в уравнен. (22) и (23)

$\frac{M}{bh^2} = \frac{S}{6} \frac{S_0}{S}$

то будемъ имѣть:

$$\left. \begin{aligned} S &= 1,89S_0 - 2,257\sigma_0 + 3,15\Delta\sigma' + 2,05\Delta\sigma \\ S' &= 0,67S_0 + 0,439\sigma_0 + 0,118\Delta\sigma - 0,217\Delta\sigma \end{aligned} \right\} \dots (24).$$

Подставляемъ теперь сюда $S' = 600$ влтр. на кв. сант. и $S_0 = 160$ влтр. на кв. сант.; кроме того S_0 при опытѣ съ фермою W оказалось равнымъ 191 влтр. на кв. сант., слѣдовательно:

$$600 = 1,89 \cdot 191 - 2,257 \cdot 160 + 3,15\Delta\sigma' + 2,205\Delta\sigma.$$

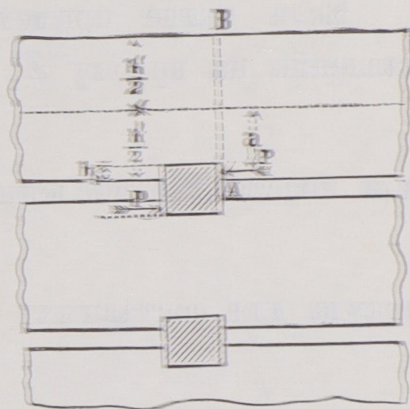
Если примемъ $\Delta\sigma' = \Delta\sigma$, то

$$\Delta\sigma = \frac{600 - 361 + 361}{536} = 111 \text{ влтр. на кв. сант.}$$

и $S = 0,67 \cdot 191 + 0,439 \cdot 160 - 0,109 \cdot 111 = 186$ влтр. на кв. сант.

Въ эти результаты слѣдуетъ еще ввести поправку, такъ какъ въ слѣдствіе передаваемого шпонками давленія, являются второстепенныя напряженія, которыя слѣдуетъ прибавить къ главнымъ. Эти второстепенныя напряженія могутъ быть опредѣлены приблизительно слѣдующимъ образомъ:

Если обозначимъ черезъ P (фиг. 6) передаваемое шпонкою давленіе, то въ поперечномъ сѣченіи AB въ слѣдствіе этого проявятся:



Фиг. 6.

Сжимающее напряженіе въ A :

$$\nu_1 = - \frac{P}{bh'} \left(1 + \frac{6a}{h'} \right)$$

и растягивающее напряженіе въ B :

$$\nu_2 = - \frac{P}{bh'} \left(1 - \frac{6a}{h'} \right).$$

Называя сжимающее напряженіе между шпонкою и балкою черезъ Z , получимъ

$$Z = \frac{P}{h_1 b} \text{ и } a = \frac{h' - h_1}{2}$$

Подставляя эти значенія въ предыдущія уравненія, будемъ имѣть:

$$\left. \begin{aligned} \nu_1 &= - Z \frac{h_1}{h'} \left(1 + \frac{3(h' - h_1)}{h'} \right) = - Z \frac{h_1}{h'} \left(4 - \frac{3h_1}{h'} \right) \\ \nu_2 &= - Z \frac{h_1}{h'} \left(1 - \frac{3(h' - h_1)}{h'} \right) = + Z \frac{h_1}{h_1} \left(2 - \frac{3h_1}{h'} \right) \end{aligned} \right\} \dots (25).$$

Поэтому, если $h_1 = \frac{1}{5} h'$, $z = 95$ клгр. на кв. сант., то $v_1 = -65$ клр. на кв. сан., $v_2 = 27$ клгр. на кв. сан. Подставим теперь въ уравнение (24) $S' = 600 - 27 = 573$ кгрм. и получимъ $\Delta\sigma = 107$ клгр. на кв. сант. и $S = 186$ клгр. на кв. сант.

Къ этому присоединяются еще добавоч. напряженія: въ g (см. фиг. 5) растягив. напряженіе 27 клгр. на кв. сант. и въ f — сжимающее напряженіе 65 клгр. на кв. сант.

Вмѣстѣ съ тѣмъ имѣемъ:

$$\Delta\sigma' = \Delta\sigma = bc_1 = df_1 = 107 \text{ клгр. на кв. сант.}$$

но величины bb_1 и dd_1 точно опредѣлить затруднительно, по приблизительнымъ же вычисленіямъ $dd_1 = \Delta\sigma_1 = 200$ клгр. на кв. сант.

Если далѣе примемъ по Melan'у, что $\Delta\sigma_1$ пропорціонально давленію на врубку Z , то получимъ

$$\Delta\sigma = \beta \cdot Z \quad (26)$$

или подставляя численныя величины

$$200 = \beta \cdot 95,$$

откуда для составныхъ балокъ, соединенныхъ шпонками,

$$\beta = \frac{200}{95} = 2,1.$$

Для фермы III со вставными брусками было получено $S_0 = 191$ кгр. на кв. сант. и $Z = 185$ кгр. на кв. сант.

Принимая при этомъ снова $\Delta\sigma_1 = 200$, найдемъ:

$$\beta = \frac{200}{185} = 1,08.$$

Для фермъ VIII и IX изъ брусевъ, соединенныхъ зубьями, въ среднемъ найдено $S_0 = 236$. Давленіе на врубку въ обоихъ случаяхъ составляло 120 кгр. на кв. сант. Подставляя затѣмъ въ уравненіи (24) $h_0 = 0$, будемъ имѣть:

$$573 = 1,89 \cdot 236 - 2,257 \cdot 120 + 3,15\Delta\sigma' + 2,205\Delta\sigma$$

и отсюда $\Delta\sigma = \Delta\sigma' = 91$ клгр. на кв. сант.

Если теперь положимъ $\Delta\sigma_1 = 180$ клгр. на кв. сант., то $180 : 120 = 1,5 = \beta$

Отсюда усматривается, что коэффициенты β гораздо меньше, чѣмъ приняты Melan'омъ.

Если фермы нагружены ниже предѣла упругости, то напряженія распредѣляются согласно фиг. 2 и въ этомъ случаѣ можно пользоваться формулами Melan'a непосредственно:

Расчетъ составныхъ балокъ тогда можетъ вестись, какъ и прежде, т. е. въ предположеніи несдвигаемости балокъ; только въ этомъ случаѣ сравнительно съ простыми балками слѣдуетъ брать меньшее допускаемое напряженіе, а именно:

$$\left. \begin{array}{l} \text{а) для фермъ со шпонками } S_0 = S - \frac{1}{m} 2,1Z \\ \text{б) для фермъ съ брусками } S_0 = S - \frac{1}{m} 1,1Z \\ \text{в) для фермъ, соединенныхъ зубьями } S_0 = S - \frac{1}{m} 1,5Z \end{array} \right\} \dots (27).$$

Коэффициентъ $\frac{1}{m}$ по Melan'у составляетъ:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для двухъ связанныхъ балокъ } \frac{1}{m} = \frac{1}{4} \\ \text{„ трехъ „ „ „ } \frac{1}{m} = \frac{1}{3} \\ \text{„ четырехъ „ „ „ } \frac{1}{m} = \frac{3}{8} \end{array} \right\} \dots (28).$$

Теперь еще нужно установить, какую величину слѣдуетъ принимать для S и Z . Для постоянныхъ мостовъ обыкновенно берутъ $S = 80$ клгр. на кв. сант., для временныхъ мостовъ можно брать $S = 100$ клгр. на кв. сант. Для составныхъ балокъ, соединенныхъ дубовыми шпонками, безопасное сжимающее напряженіе до сихъ поръ допускалось $Z = 80$ клгр. на кв. сант.

Но такое сжимающее напряженіе по направленію, перпендикулярному къ волокнамъ, несомнѣнно слишкомъ велико, такъ какъ при 120 клгр. на кв. сант. оно достигаетъ уже временнаго сопротивленія матеріала. Поэтому, казалось бы, что для постоянныхъ сооружений слѣдуетъ принимать Z равнымъ около 50 клгр. на кв. сант. и для временныхъ мостовъ въ 60 клгр. на кв. сант. Въ составныхъ балкахъ, соединенныхъ брусками и зубьями, сжатіе направлено вдоль волоконъ, временное сопротивленіе сжатію значительно больше и поэтому можно принять $Z = 60$ клгр. на кв. сант. и для временныхъ мостовъ $Z = 70$ клгр. на кв. сант. Такимъ образомъ слѣдовало бы принимать:

для постоянныхъ мостовъ:

$$\left. \begin{array}{l} \text{а) при соединеніи балокъ шпонками } Z = 50 \text{ клгр.} \\ \text{на кв. сант.; } S_0 = 80 - \frac{1}{m} 105 \text{ клгр. на кв. сант.} \\ \text{б) при соединеніи балокъ брусками } Z = 60 \text{ клгр.} \\ \text{на кв. сант.; } S_0 = 80 - \frac{1}{m} 66 \text{ клгр. на кв. сант.} \\ \text{в) при соединеніи балокъ зубьями } Z = 60 \text{ клгр.} \\ \text{на кв. сант.; } S_0 = 80 - \frac{1}{m} 90 \text{ клгр. на кв. сант.} \end{array} \right\} \dots (29)$$

и для временныхъ мостовъ:

$$\left. \begin{array}{l} \text{а) при соединеніи балокъ шпонками } Z = 60 \text{ клгр.} \\ \text{на кв. сант.; } S_0 = 100 - \frac{1}{m} 126 \text{ клгр. на кв. сант.;} \\ \text{б) при соединеніи балокъ брусками } Z = 70 \text{ клгр.} \\ \text{на кв. сант.; } S_0 = 100 - \frac{1}{m} 77 \text{ клгр. на кв. сант.;} \\ \text{в) при соединеніи балокъ зубьями } Z = 70 \text{ клгр.} \\ \text{на кв. сант.; } S_0 = 100 - \frac{1}{m} 105 \text{ клгр. на кв. сант.} \end{array} \right\} \dots (30).$$

Напримѣръ, для составной фермы изъ 3-хъ балокъ изъ уравненій 29 и 30 найдется:

| | Постоянные мосты. | Временн. мосты. |
|-----------------------------------|----------------------------|--------------------|
| При примѣненіи шпонокъ | $S_0 = 45$ клгр. на кв. с. | 58 клгр. на кв. с. |
| При примѣненіи брусковъ | $S_0 = 58$ " " " " | 74 " " " " |
| При примѣненіи зубьевъ | $S_0 = 50$ " " " " | 65 " " " " |

Для двухъ связанныхъ балокъ получаютъ нѣсколько высшія безопасныя напряженія, для четырехъ, напротивъ, меньшія; вообще же составныя балки изъ 4-хъ брусковъ употребляются рѣдко, такъ какъ при такой высотѣ уже становятся выгоднѣе раскосныя фермы.

Вышеприведенныя безопасныя напряженія хотя и не высоки, но на практикѣ еще возможны. При допущеніи ихъ примѣненіе составныхъ деревянныхъ балокъ хотя и ограничивается, но не дѣлается невозможнымъ. Съ другой стороны, въ виду положенія,

что послѣ перехода за предѣлъ упругости распредѣленіе напряженій въ составной фермѣ менѣе благопріятно, чѣмъ въ простой балкѣ, что подтверждается и опытами Воск'а, нужно быть особенно осторожнымъ и во всякомъ случаѣ не переходить за предѣлы вышеуказанныхъ напряженій.

Предполагаемыя безопасныя напряженія основаны на опытахъ Воск'а. Но еще весьма сомнительно, — замѣчаетъ профессоръ Thullie, — чтобы результаты этихъ опытовъ, при которыхъ фермы были въ нѣсколько иныхъ условіяхъ, чѣмъ на практикѣ, имѣли непосредственное значеніе для деревянныхъ мостовъ; можетъ быть, другіе опыты, болѣе отвѣчающіе условіямъ нагруженія мостовыхъ фермъ, дадутъ и болѣе благопріятные результаты.

Поэтому, принимая во вниманіе, что вышеприведенный расчетъ не совершенно точенъ, на уравненія 27, 29 и 30 не слѣдуетъ смотрѣть, какъ на окончательныя, но, согласно произведеннымъ до сихъ поръ опытамъ, ихъ можно рекомендовать для примѣненія въ практикѣ.

Профессоръ Thullie, какъ и Melan, въ своемъ расчетѣ принималъ, что сдвигенія балокъ и разность въ напряженіи смежныхъ волоконъ $\Delta\sigma'$ пропорціональна давленію на врубку. Но это положеніе не вполнѣ вѣрно. Собственно говоря, слѣдовало бы допустить, что $\Delta\sigma^1 = \gamma + \beta z$, гдѣ γ представляетъ нѣкоторую постоянную величину, зависящую отъ точности сборки и сухости матеріала. При малой величинѣ z сдвигеніе будетъ поэтому соответственно больше, чѣмъ было принято, хотя, съ другой стороны, съ увеличеніемъ z , если предѣлъ упругости превзойденъ, упругія укороченія, а вмѣстѣ съ тѣмъ и сдвигенія будутъ соответственно увеличиваться. Имѣя это въ виду, можно брать допускаемыя напряженія по уравненію 29 и 30, но при этомъ необходимо обращать особенное вниманіе на тщательность сборки фермъ, такъ какъ прочность составныхъ балокъ отъ этого зависитъ гораздо въ большей степени, чѣмъ прочность другихъ системъ фермъ.

IV. Возраженіе Thullie со стороны проф. Melan'а.

По поводу мнѣнія профессора Thullie, что теорія профессора Melan'а хотя и можетъ считаться правильною, но даетъ резуль-

таты отчасти *невъроятныя*, а отчасти *неуважительныя*, такъ какъ по формуламъ Melan'a получаются слишкомъ низкія величины для допускаемыхъ напряженій, профессоръ Melan замѣчаетъ, что ему очень хорошо извѣстно, что за предѣломъ упругости напряженія распредѣляются по иному закону, но что Thullie не правъ, обвиняя его въ упущеніи изъ виду этого обстоятельства тамъ, гдѣ въ дѣйствительности рѣчь идетъ о совершенно различныхъ понятіяхъ.

Какъ извѣстно говоритъ Melan, допускаемое напряженіе, соотвѣтствующее опредѣленному способу нагруженія, до сихъ поръ всегда опредѣлялось на основаніи опытовъ на разрушеніе, при чемъ, при коэффициентѣ безопасности равномъ n , разрушеніе можетъ послѣдовать при нагрузкѣ въ n разъ большей. Поэтому допускаемое напряженіе можно принимать равнымъ $\frac{1}{n}$ части расчетнаго разрушающаго напряженія въ томъ предположеніи, что послѣднее вычислено по формуламъ, въ коихъ допущена пропорціональность между нагрузкой и напряженіемъ, хотя таковыя имѣютъ значеніе только до предѣла упругости.

Если мы, примѣрно, найдемъ, что деревянная балка разрушается при нагрузкѣ, соотвѣтствующей вычисленной по формулѣ Navier, въ 420 клгр. на кв. сант., то при пятикратной прочности можно принять безопасное напряженіе $S = 84$ клгр. на кв. сант. Если же, на противъ (по опыту V), для фермы, состоящей изъ 3-хъ балокъ, соединенныхъ шпонками, расчетное разрушающее напряженіе опредѣляется въ 191 клгр. на кв. сант., при давленіи на врубку въ 95 клгр. на кв. сант., то для этой фермы при нагрузкѣ въ $\frac{1}{5}$ отъ разрушающаго груза, т. е. при 5-ти кратной прочности, безопасное напряженіе будетъ $S_0 = 38$ клгр. на кв. сант. при давленіи на врубку $s = 19$ клгр. на кв. сант.

Это, именно, тѣ допускаемыя по расчету напряженія въ балкѣ и во врубкахъ, взаимная зависимость которыхъ выражается формулою $S_0 = s - kz$, гдѣ k есть коэффициентъ, зависящій какъ отъ числа связанныхъ балокъ, такъ и отъ способа ихъ соединенія. Для этихъ напряженій, посредствомъ прямой подстановки въ выше приведенную формулу расчетныхъ разрушающихъ напряженій, профессоръ Thullie находитъ другія величины, а вмѣстѣ съ тѣмъ получаетъ и гораздо большія значенія для безопасныхъ напря-

женій. Такъ, напримѣръ, для безопаснаго давленія на врубку въ балкахъ, соединенныхъ шпонками (постоянныя сооруженія), онъ предлагаетъ $z = 50$ клгр. и безопасное напряженіе при 3-хъ балкахъ $S_0 = 45$ клгр. Но легко убѣдиться, что въ такомъ случаѣ о пятикратной прочности не можетъ быть и рѣчи, такъ какъ уже при нагрузкѣ въ $2^{1/2}$ раза бѣльшей сопротивленіе сжатію дерева въ шпонкахъ \perp къ волокнамъ достигаетъ 125 клгр., и если расчетное напряженіе при изгибѣ для $2^{1/2}$ кратной нагрузки составляетъ 113 клгр., то послѣднее, по причинѣ болѣе высокаго давленія во врубкѣ, точно также будетъ лежать недалеко отъ временнаго сопротивленія разрушенію, которое при $z = 95$ клгр. соотвѣтствуетъ 191 клгр.

Поэтому, по мнѣнію профессора Melan'a, давленіе на врубку въ балкахъ, соединенныхъ шпонками, слѣдуетъ допускать значительно меньше, а именно отъ 17 до 20 клгр. на кв. сант., причемъ изъ его формулы, при пятикратной прочности, получается все таки еще достаточно большая величина безопаснаго напряженія ($S_0 =$ отъ 43 до 36). Это незначительное давленіе на врубку въ конструктивномъ отношеніи еще вполне достижимо. Вообще-же, чтобы соединеніе балокъ было не бесполезно, давленіе на врубку должно соотвѣтствовать нѣкоторому предѣлу, что имѣетъ мѣсто, если (при 3-хъ балкахъ) $S_0 < \frac{1}{3} S$.

Если поэтому, замѣчаетъ въ заключеніе профессоръ Melan, и можно говорить о *неутѣшительныхъ* результатахъ, полученныхъ имъ относительно составныхъ деревянныхъ балокъ, то это вполне зависитъ отъ опытныхъ данныхъ, которыя въ дѣйствительности оказались менѣе благопріятными, чѣмъ можно было ожидать. Остается стало-быть нерѣшеннымъ вопросъ, подтвердится или нѣтъ это мнѣніе дальнѣйшими опытами, производство которыхъ было-бы весьма желательно.

Принимая-же во вниманіе тѣ данныя, которыми до сихъ поръ руководствовались при изготовленіи составныхъ деревянныхъ балокъ, профессоръ Melan, съ своей стороны, также находитъ возможнымъ довольствоваться меньшею степенью безопасности, принимая въ вышеприведенной формулѣ $S = 100$ до 120 клгр. на кв. сант., причемъ, напримѣръ, для фермъ, составленныхъ изъ

3-хъ балокъ, соединенныхъ шпонками при $z = 25$ клгр. на кв. сант., получилось-бы $S_0 = 40$ до 60 клгр. на кв. сант.

Послѣ всего сказаннаго, мы не будемъ болѣе распространяться о значеніи и послѣдствіяхъ результатовъ опытовъ Воск'а. Выводы изъ нихъ настолько очевидны, что не требуютъ дальнѣйшихъ комментариевъ. На русскихъ желѣзныхъ дорогахъ и по настоящее время имѣется много деревянныхъ мостовъ, не только временныхъ, но и постоянныхъ, которые по тѣмъ или другимъ причинамъ не замѣнены желѣзными; составными деревянными балками, благодаря обилію и дешевизнѣ лѣса, приходится пользоваться постоянно, считывая на ихъ прочность. Насколько эта прочность велика, мы сейчасъ видѣли и смѣемъ думать, что всѣ русскіе инженеры, по печенію коихъ ввѣрены деревянныя составныя балки, служащія фермами мостовъ, по которымъ пропускаются желѣзнодорожные поѣзда или провозятся тяжелые грузы, отнесутся съ должнымъ вниманіемъ къ описаннымъ опытамъ. Мы могли бы указать примѣры, когда деревянные многопролетные балочные мосты съ фермами изъ составныхъ балокъ закрывались для движенія черезъ 2 года послѣ сооруженія, вслѣдствіе полного разстройства фермъ. Слѣдуетъ думать, что такіе примѣры больше не повторятся.

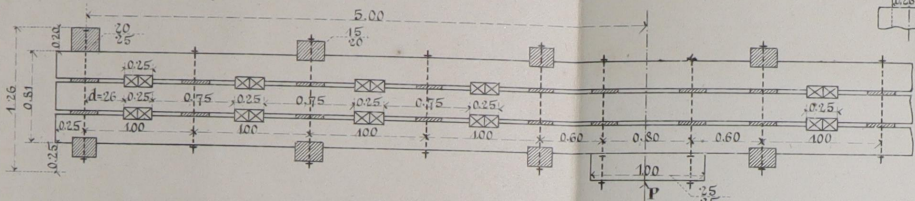
Въ заключеніе позволимъ себѣ привести здѣсь, въ дословномъ переводѣ, слова начальника австрійскаго инженернаго штаба Moritz'a Воск'а, сказанныя имъ при докладѣ о своихъ опытахъ: „Если правительство,—говоритъ г. Воск,—съ одной стороны имѣетъ право привлекать желѣзнодорожнаго инженера къ законной отвѣтственности за несчастіе, вызванное крушеніемъ моста, то, съ другой стороны, его прямая обязанность оффиціальными опытами разъяснить всѣ сомнѣнія и издать такія правила, которыми желѣзныя дороги могли-бы сознательно руководствоваться“.

Разрѣзь по АВ.

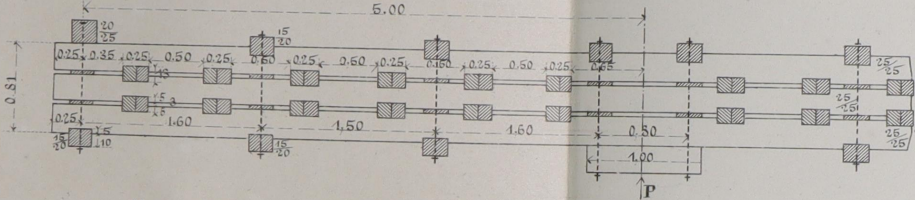
Черт. 1. Ферма, соединенная болтами I.



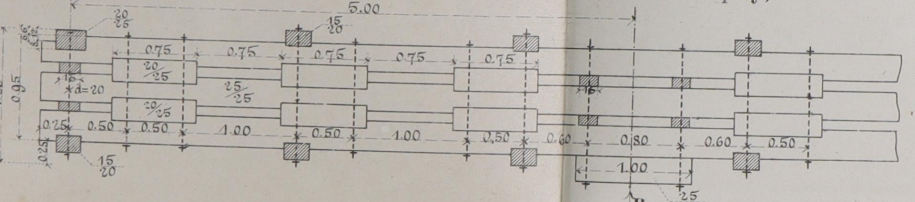
Черт. 2. Ферма со шпонками II.



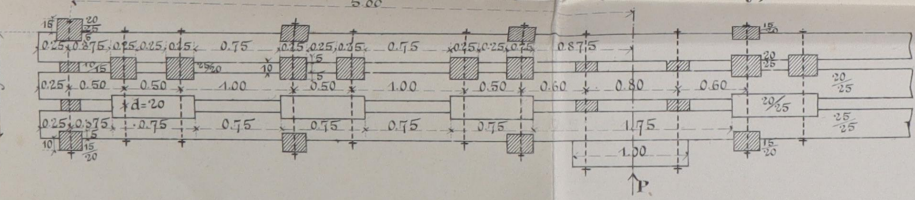
Черт. 3. Ферма со шпонками V.



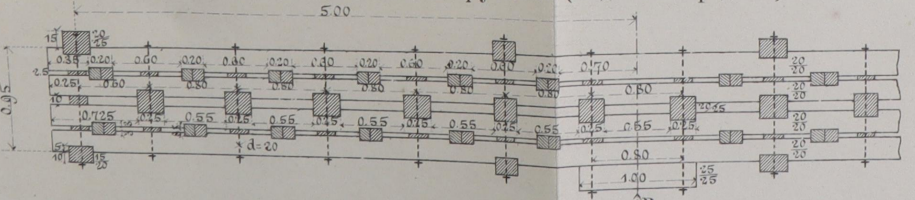
Черт. 4. Ферма со вставными брусками (ѣзда по верху) III.



Черт. 5. Ферма со вставными брусками (ѣзда по низу) VI.

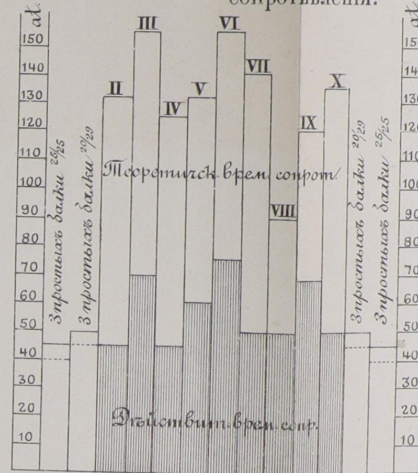


Черт. 6. Ферма со вставными брусками (ѣзда по серединѣ) VII.



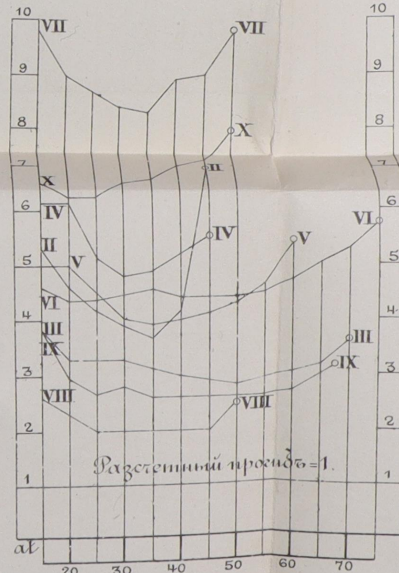
Черт. 12.

Графическое сравненіе теоретическаго и дѣйствительнаго временнаго сопротивленія.

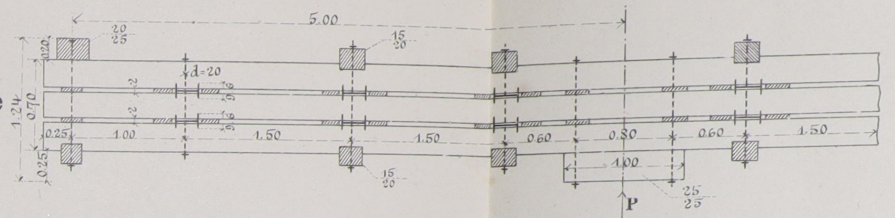


Черт. 13.

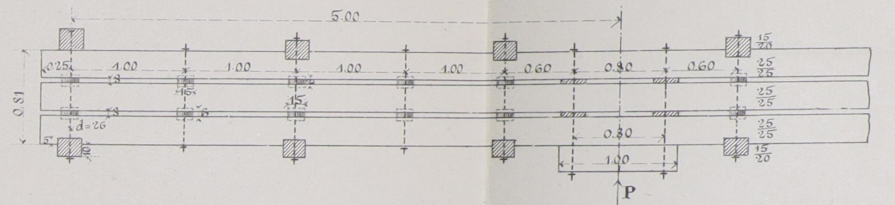
Графическое изображеніе отношенія дѣйствит. прогиба къ расчетному.



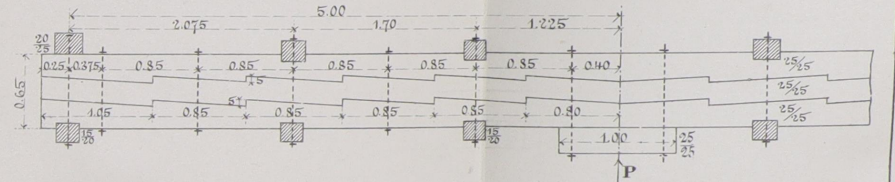
Черт. 7. Ферма со шпонками изъ двутавроваго желѣза IV.



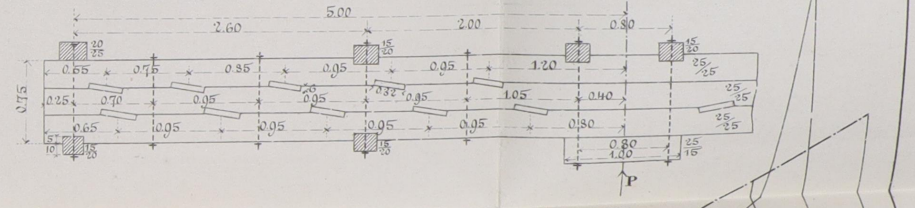
Черт. 8. Ферма съ чугунными шайбами X.



Черт. 9. Ферма изъ балокъ, соединенныхъ зубьями VIII.



Черт. 10. Ферма съ косыми продольными шпонками IX.



Черт. 11. Ферма изъ балокъ, соединенныхъ болтами XI.

Упругіе прогибы.

