626.4
П-53

Изданіе Института Инженеровъ Путей Сообщенія Императора Александра I.

626.4
П-53

РАЗСЧЕТЪ
ПЛОСКИХЪ
ШЛЮЗНЫХЪ ПОЛОТЕНЪ,
СОСТОЯЩИХЪ ИЗЪ СТОЕКЪ И РИГЕЛЕЙ.

И. Польковскій,
Инженеръ Путей Сообщенія.

1589

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.
Типографія Ю. Н. Эрлихъ, Садовая, № 9.
1901.

1569

Печатано по распоряженію Института Инженеровъ Путей Сообщенія
Императора АЛЕКСАНДРА I.

Изданіе Института Инженеровъ Путей Сообщенія Императора Александра I.

РАЗСЧЕТЪ
ПЛОСКИХЪ
ШЛЮЗНЫХЪ ПОЛОТЕНЪ,
СОСТОЯЩИХЪ ИЗЪ СТОЕКЪ И РИГЕЛЕЙ.

И. Польковскій,
Инженеръ Путей Сообщенія.

Цѣна 1 р. 20 к.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.
Типографія Ю. Н. Эрлихъ, Садовая, № 9.
1901.

626.4
П-53

CALCUL

DES PORTES D'ÉCLUSES

AUX VANTAUX PLATS,

CONSTRUITS

DE MONTANTS ET D'ENTRETOISES,

проверено
1966 г.

I. Polkowski,

Ingénieur des voies de communication.

ST. PETERSBOURG.
Imprimerie **I. Ehrlich.** Sadovaïa, 9.
1901.

ОГЛАВЛЕНІЕ.

ГЛАВА I.

Полотна системы Лавуана.

ГЛАВА II.

Полотна съ жесткою рамою.

SOMMAIRE.

CHAPITRE I.

Vantaux — système Lavoine.

CHAPITRE II.

Vantaux aux cadres rigides.

Таблицы.

PAG.

CHAPITRE III.

Exemples numériques.

Tables.

Въ Извѣстіяхъ Собранія Инженеровъ Путей Сообщенія за 1898 годъ помѣщена моя статья подъ заглавіемъ «О разсчетѣ шлюзныхъ полотенъ». Въ ней разобраны и развиты извѣстныя формулы Лавуана и выведены общія указанія для подбора наивыгоднѣйшихъ размѣровъ частей полотенъ; кромѣ того, предложенъ способъ разсчета полотенъ, состоящихъ изъ жесткой рамы со стойками поддержанными однимъ ригелемъ или двумя.

Въ примѣненіи къ дѣлу, предложенныя указанія и формулы представили нѣкоторыя затрудненія, происшедшія, главнымъ образомъ, отъ неполноты; такъ напр. формулы Лавуана изслѣдованы въ примѣненіи лишь къ самому простому случаю, а именно, къ полотнамъ одностворчатымъ, состоящимъ изъ одиночныхъ ригелей и такихъ же стоекъ, между тѣмъ какъ о полотнахъ двустворчатыхъ замѣчено лишь вскользь, а о полотнахъ съ составными ригелями или стойками не упомянуто вовсе.

Въ настоящей статьѣ этотъ недостатокъ посильно устраненъ; въ ней помѣщены изслѣдованія и формулы относящіяся до всевозможныхъ типовъ плоскихъ полотенъ, состоящихъ изъ ригелей и стоекъ, причемъ, для болѣе удобнаго примѣненія ихъ къ практикѣ, приложенъ, въ видѣ примѣра, разсчетъ полотенъ данной высоты и ширины въ 6-ти варіантахъ для одностворчатыхъ полотенъ и въ столькихъ же для двустворчатыхъ. Кромѣ того, помѣщенъ численный примѣръ разсчета подможнаго бруса (для плотины) деревяннаго или желѣзнаго, при стойкахъ деревянныхъ и разсчетъ полотенъ съ жесткою рамою. Наконецъ исправлены неточности и ошибки вкравшіяся въ прежнюю статью.

Инж. **Польковскій.**

Спб. Октябрь, 1900 г.

En 1898 j'eus l'honneur de présenter au VII-ième Congrès International de Navigation une communication «Du calcul des portes d'écluses». C'était un essai d'introduire dans le calcul de M. Lavoine une condition pour donner le moyen de la recherche des dimensions les plus économiques des pièces d'une porte. Outre cela, j'ai donné des formules et une table pour le calcul d'une porte consistant en un cadre parfaitement ridige et en montants soutenus par une seule on par deux entretoises.

Cependant l'application de ces calculs dans la pratique a présenté beaucoup de difficultés, par ce que dans mon étude la question n'a été traitée qu'en un cas particulier — des carcasses formées de barres simples, dans les portes à un seul vantail, tandis que celui des portes busquées et des vantaux construits de barres composées — doubles ou de barres continues (serrées) n'était pas examiné.

Cette lacune est comblée dans la brochure suivante. Les divers types possibles des portes à vantaux plats, consistant en montants et en entretoises y sont étudiés et suivis d'exemples numériques, — de sorte que la détermination de leurs dimensions les plus économiques devient très simple et très facile.

Les questions étudiées sont énumérées dans le sommaire ci-joint.

I. Polkowski.

Разсчетъ плоскихъ шлюзныхъ полотенъ, состоящихъ изъ стоекъ и ригелей.

ГЛАВА I.

Полотна по системѣ Лавуана.

§ 1. Положенія и формулы Лавуана.

Лавуанъ, какъ извѣстно, сдѣлалъ весьма точное исчисленіе напряженій въ частяхъ полотенъ, предположивъ, что таковыя, въ общемъ случаѣ, состоятъ изъ вертикальныхъ реберъ или стоекъ однообразнаго сѣченія, размѣщенныхъ въ равныхъ другъ отъ друга и весьма близкихъ разстояніяхъ и поддерживаемыхъ горизонтальными элементами—ригелями, тоже однообразнаго сѣченія и тоже размѣщенными въ равныхъ и очень близкихъ разстояніяхъ, причемъ число ригелей можетъ быть очень велико (для общаго случая разсчета, не менѣе 5). Опорами ригелей служатъ вереяльный и створный столбы, а стойки имѣютъ твердыя опоры только внизу, въ порогѣ. Два доказанныя Лавуаномъ, помощью вычисленій, положенія, до извѣстной степени, облегчаютъ разсчеты, а именно: 1) что, если высота напора со стороны нижняго бьефа равна или менѣе половины высоты напора со стороны верхняго—(что въ большинствѣ случаевъ шлюзной практики имѣетъ мѣсто), то въ величинѣ напряженія наиболѣе напряженнаго ригеля не замѣчается чувствительной разницы, принимается ли въ разсчетъ напоръ со стороны нижняго бьефа или нѣтъ; и затѣмъ, 2) что слѣдуетъ, для разсчета, высоту напора со стороны верхняго бьефа принимать равною высотѣ полотенъ, такъ какъ такое допущеніе тоже не измѣняетъ чувствительно величинъ напряженій.

Впрочемъ, при разсчетѣ шлюзныхъ полотенъ и другихъ системъ, принимается обыкновенно, что ворота поддерживаютъ полный односторонній напоръ, равный высотѣ воротъ.

Окончательныя формулы Лавуана, служащія для разсчета напряженій стоекъ и ригелей въ полотнахъ вышеуказанной конструкціи, даны Лавуаномъ въ его статьѣ въ «Ann. des ponts et chaussées» и Флямамомъ въ «Stabilité des constructions» въ слѣдующемъ видѣ (съ сохраненіемъ почти всѣхъ обозначеній, принятыхъ въ курсѣ водяныхъ сообщеній Θ. Г. Зброжека *):

$$k^4 = 29{,}75 \left(\frac{a}{H}\right)^3 \cdot \frac{mI_1}{NI_0} \cdot \frac{E_1}{E_0} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

$$R_0 = \frac{q_i P}{2N} \cdot \left(\frac{az_0}{2I_0} + \frac{\cot\theta}{\omega_0}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

$$R_1 = q_{ii} 2 \frac{PH z_1}{mI_1}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

гдѣ k — показатель сравнительной жесткости вертикальныхъ и горизонтальныхъ элементовъ,

E_1 — коэффиціентъ упругости матеріала вертикальныхъ элементовъ—стоекъ (реберъ),

E_0 — тоже горизонтальныхъ — ригелей,

E — для дерева хвойнаго 42.500 пуд.-дюйм. (108.000 кил.-сант.), для желѣза 788.000 пуд.-дюйм. (2.000.000 кил.-сант.),

I_1 — моментъ инерціи поперечнаго сѣченія вертикальнаго элемента—стойки,

I_0 — моментъ инерціи поперечнаго сѣченія ригеля,

H — высота полотна,

$2a$ — ширина полотна,

z_1 — удаленіе крайнихъ волоконъ поперечнаго сѣченія вертикальнаго элемента отъ нейтральной оси его,

z_0 — тоже ригеля,

N — число всѣхъ работающихъ ригелей, т. е. безъ нижняго,

m — число стоекъ,

P — вся нагрузка на полотно $= \delta a H^2$, гдѣ δ — вѣсъ куб. единицы воды (1 куб. дюймъ воды вѣситъ 0,001 пуда и 1 куб. сант.—0,001 кил.),

q_i — коэффиціенты наибольшихъ напряженій горизонтальныхъ элементовъ полотна,

q_{ii} — тоже вертикальнаго элемента въ срединной оси полотна,

ω_0 — площадь поперечнаго сѣченія ригеля,

θ — уголъ наклоненія полотна къ поперечной оси шлюза,

R_0 — напряженіе матеріала ригеля,

R_1 — тоже вертикальнаго элемента.

R — допускаемое напряженіе: для дерева хвойнаго 30 пуд. на кв. дюймъ (76 кил. на кв. сант.), для желѣза: 275 пуд. на кв. дюймъ (700 кил. на кв. сант.).

---

*) — тоже въ статьѣ Θ. Г. Зброжека „Статическій разсчетъ шлюзныхъ воротъ"— помѣщенной въ 7-ой книгѣ журнала Министерства П. С. за 1896 годъ.

Коэффиціенты q_I и q_{II} для разныхъ k, отъ $k^4 = 0{,}05$ до $k^4 = 15$ даны Лавуаномъ въ двухъ таблицахъ, приведенныхъ въ курсѣ Ѳ. Г. Зброжека; коэффиціенты q_I, соотвѣтствующіе наибольшимъ напряженіямъ въ горизонтальныхъ элементахъ — ригеляхъ, вычислены для разныхъ ригелей, отъ верха до низа полотна, черезъ каждую 0,1 часть H, — что даетъ наглядную картину измѣненія напряженій въ ригеляхъ и вмѣстѣ съ тѣмъ показываетъ для всякаго k^4 нумеръ ригеля наиболѣе напряженнаго; коэффиціенты же q_{II} соотвѣтствуютъ для всякаго k^4 лишь максимуму напряженія въ одномъ срединномъ вертикальномъ элементѣ—стойкѣ. Такъ какъ элементамъ полотенъ придаются размѣры, соотвѣтствующіе наибольшимъ напряженіямъ, то, для практическихъ цѣлей, важны лишь наибольшіе изъ q_I, поэтому, *ниже, въ формулахъ и таблицахъ, подъ q_I будемъ подразумѣвать лишь наибольшій изъ Лавуановскихъ табличныхъ q_I*, соотвѣтствующихъ извѣстному k^4.

§ 2. Развитіе формулъ Лавуана.

Какъ ни просты вышеприведенныя три формулы, но при проектированіи встрѣчаемъ сразу затрудненіе, какое выбрать k^4? Фляманъ напр. совѣтуетъ выбирать k^4 по возможности равное 5, при которомъ q_I имѣетъ наименьшее значеніе. Но, выбирая нѣкоторое k^4 и q_I, мы вмѣстѣ съ тѣмъ выбираемъ и q_{II}, наименьшее значеніе котораго не совпадаетъ съ наименьшимъ значеніемъ q_I, какъ видно изъ таблицы; поэтому, хотя при $k^4 = 5$ мы придали бы ригелямъ наименьшіе размѣры, но размѣры соотвѣтственныхъ вертикальныхъ элементовъ—стоекъ могли бы получиться настолько велики, что весь объемъ матеріала, т. е. объемъ ригелей и стоекъ оказался бы далеко не наименьшимъ, между тѣмъ какъ, приданіе наименьшихъ размѣровъ, при обезпеченной прочности, конечно, для проектированія, всего существеннѣе.

Неизвѣстность, насколько при выбранномъ k^4 мы близки къ наименьшему объему матеріала, усиливается еще тѣмъ обстоятельствомъ, что наивыгоднѣйшіе размѣры элементовъ несомнѣнно тѣ, при которыхъ напряженія матеріала R_0 и R_1 подходятъ какъ можно ближе къ предѣльнымъ, допускаемымъ напряженіямъ и, если ригели и стойки сдѣланы изъ одного матеріала, то — при равныхъ R_0 и R_1; между тѣмъ, вычисляя размѣры частей полотенъ по приведеннымъ выше формуламъ, случайно развѣ можно попасть на такіе I_0 и I_1, при которыхъ R_0 и R_1 удовлетворятъ сказанному условію; если же окажется, что R_0 и R_1 нѣсколько значительно разнятся между собою, то придется подыскивать новые I_0 и I_1 и подбирать новый показатель k^4, не имѣя вовсе никакого указанія или признака, къ какимъ k^4 слѣдуетъ направить вычисленія. Этотъ пробѣлъ въ примѣненіи разсчета шлюзныхъ полотенъ по способу Лавуана и имѣемъ въ виду пополнить.

Цѣль эта легко можетъ быть достигнута, если нѣсколько упростить выше приведенныя формулы, а именно: 1) предположимъ, что стойки и ригели сдѣланы, изъ одного и того же матеріала, слѣдовательно $E_1 = E_0$; еслибы, въ частномъ случаѣ, пришлось имѣть дѣло съ полотнами изъ разныхъ матеріаловъ, то нетрудно было бы ввести соотвѣтственную поправку на E; 2) зависимость величины напряженія ригеля отъ продольнаго сжатія, обозначенную въ формулѣ (2) выраженіемъ $\frac{\cot\theta}{\omega_0}$, можемъ исключить съ тѣмъ, чтобы ввести ее въ разсчетъ впослѣдствіи, помощью нѣкотораго уменьшенія допускаемаго напряженія R. Такимъ образомъ, вмѣсто формулъ (1), (2) и (3) получаемъ слѣдующія:

$$k^4 = 29{,}75\left(\frac{a}{H}\right)^3 \cdot \frac{m}{N} \cdot \frac{I_1}{I_0} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (4)$$

$$q_l \cdot \frac{\delta a^2 H^2}{4} = \rho R \cdot N \cdot \left(\frac{I_0}{z_0}\right), \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (5)$$

гдѣ ρ коэффиціентъ меньшій единицы, опредѣляющій уменьшеніе R вслѣдствіе исключенія члена съ $\cot\theta$.

$$q_{ll}\,\delta H^3 \cdot 2a = R \cdot m \cdot \left(\frac{I_1}{z_1}\right) \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (6)$$

Раздѣляя (6) на (5), получаемъ:

$$8\,\frac{q_{ll}}{q_l} \cdot \frac{H}{a} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{m}{N} \cdot \frac{I_1}{I_0} \cdot \frac{z_0}{z_1};$$

подставляя сюда изъ формулы (5)

$$\frac{m}{N} \cdot \frac{I_1}{I_0} = \frac{k^4}{29{,}75} \cdot \left(\frac{H}{a}\right)^3,$$

имѣемъ

$$8\,\frac{q_{ll}}{q_l}\left(\frac{a}{H}\right)^2 \cdot \frac{29{,}75}{k^4} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{z_0}{z_1},$$

откуда

$$\frac{z_0}{z_1} = \rho \cdot \frac{238}{k^4} \cdot \frac{q_{ll}}{q_l} \cdot \left(\frac{a}{H}\right)^2.$$

Обозначая

$$\frac{238}{k^4} \cdot \frac{q_{ll}}{q_l} = \varphi \quad \text{и} \quad \frac{a}{H} = c,$$

имѣемъ:

$$\frac{z_0}{z_1} = \rho\varphi c^2 = \alpha. \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (7)$$

Эта формула даетъ намъ прямо, для каждаго ρ, φ и c такое отношеніе между толщиною ригелей и стоекъ, при которомъ ригели и стойки одинаково напряжены при условіи, конечно, что I_1 и I_0 подобраны по тому k^4, которое входитъ въ выбранное $\varphi = \frac{238}{k^4} \cdot \frac{q_{ll}}{q_l}$. Ниже приведена таблица № 1 величинъ φ, по наибольшимъ q_l, взятымъ изъ таблицы Лавуана. Что касается до ρ, то для большинства случаевъ, для типовъ съ одиночными ригелями можно таковое принять равнымъ около 0,8 и 0,9, а для типовъ съ двойными ригелями (въ обхватъ стоекъ) — 0,65—0,75; впрочемъ, по формулѣ (2) и разсчитанному ω_0 всегда легко удостовѣриться, насколько эта величина удовлетворительна;—точная величина ρ выведена ниже.

Еслибы стойки и ригели были сдѣланы изъ разныхъ матеріаловъ, то формула (7) имѣла бы видъ:

$$\alpha = \rho\varphi c^2 \frac{E_1}{E_0} \cdot \frac{R_0}{R_1}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7a)$$

гдѣ R_0 и R_1 допускаемыя напряженія ригеля и стойки.

§ 3. Объемъ матеріала полотенъ.

Формула (7) даетъ намъ возможность найти выраженіе для исчисленія объема матеріала въ полотнахъ. Обозначимъ черезъ s толщину воротъ Лавуановскаго типа, т. е. состоящихъ изъ ряда стоекъ поддержанныхъ рядомъ ригелей

$$2z_0 + 2z_1 = s,$$

тогда изъ (7) имѣемъ:

$$2z_0 = s \cdot \frac{\rho\varphi c^2}{1 + \rho\varphi c^2} = s \frac{\alpha}{1 + \alpha} \text{ и } 2z_1 = s \cdot \frac{1}{1 + \rho\varphi c^2} = s \frac{1}{1 + \alpha}, \quad (8)$$

а включая R и обозначая ρR для ригелей $= R_0$ и R для стоекъ $= R_1$

$$2z_0 = s \cdot \frac{R_0 \varphi c^2}{R_1 + R_0 \varphi c^2} \text{ и } 2z_1 = s \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_0 \varphi c^2}.$$

Если ригели имѣютъ въ поперечномъ сѣченіи размѣры $2z_0 \cdot b_0 = \omega_0$, а стойки $2z_1 \cdot b_1$, то объемъ всѣхъ ригелей будетъ:

$$W = N \cdot 2z_0 \cdot b_0 \cdot 2a,$$

а стоекъ

$$V = m \cdot 2z_1 \cdot b_1 \cdot H$$

и объемъ матеріала въ полотнѣ:

$$W + V = N \cdot 2z_0 \cdot b_0 \cdot 2a + m \cdot 2z_1 \cdot b_1 \cdot H.$$

Произведенія $N \cdot b_0$ и $m \cdot b_1$ могутъ быть опредѣлены изъ (5) и (6), а именно:

$$q_l \cdot \frac{\delta \cdot a^2 \cdot H^2}{4} = R_0 \cdot N \cdot \frac{I_0}{z_0} = R_0 N \cdot \frac{(2z_0)^2}{6} \cdot b_0$$

откуда

$$Nb_0 = \frac{3}{2} q_l \frac{\delta a^2 H^2}{R_0 (2z_0)^2};$$

и

$$q_{II}\delta H^3\, 2a = R_1 m . \frac{I_1}{z_1} = R_1 m \frac{(2z_1)^2}{6} b_1$$

откуда

$$mb_1 = 6 q_{II} \frac{\delta H^3 .\ 2a}{R_1 (2z_1)^2};$$

слѣдовательно

$$W + V = 2aH \left[\frac{3}{2} q_I \frac{\delta a^2 H}{R_0 (2z_0)} + 6 q_{II} \frac{\delta H^3}{R_1 (2z_1)}\right] = 2aH . G, \quad (9)$$

гдѣ

$$G = \frac{3}{2} q_I \frac{\delta a^2 H}{R_0\, 2z_0} + 6 q_{II} \frac{\delta H^3}{R_1\, 2z_1} = \frac{3}{2} q_I \frac{\delta c^2 H^3}{R_0\, 2z_0} + 6 q_{II} \frac{\delta H^3}{R_1\, 2z_1}.$$

Затѣмъ, подставивъ формулы (8) съ R_0 и R_1, имѣемъ

$$G = \frac{3}{2} \delta \frac{H^3}{s} \left(q_I c^2 \frac{R_1 + R_0 \varphi c^2}{R^2{}_0 \varphi c^2} + 4 q_{II} \frac{R_1 + R_0 \varphi c^2}{R^2{}_1}\right)$$

или окончательно:

$$G = \frac{3}{2} \delta \frac{H^3}{s} \left(\frac{q_I}{\varphi} \frac{R_1}{R^2{}_0} + q_I \frac{c^2}{R_0} + \frac{4 q_{II}}{R_1} + 4 q_{II} \varphi c^2 \frac{R_0}{R^2{}_1}\right). \quad . \quad (10)$$

Эта формула даетъ точную величину объема полотенъ, ригели и стойки которыхъ имѣютъ сѣченія прямоугольныя; при сѣченіяхъ же другого вида, напр. двутавровыхъ но подобныхъ, объемъ ригелей и стоекъ можетъ быть выраженъ тою же формулою (10) съ нѣкоторымъ коэффиціентомъ; если же сѣченія ригелей и стоекъ не подобны, то въ этой формулѣ члены съ q_I будутъ съ однимъ коэффиціентомъ, а съ q_{II}—съ другимъ.

Ниже, всѣ формулы до 30-й включительно, за исключеніемъ лишь 17-ой, соотвѣтствуютъ полотнамъ съ ригелями и стойками прямоугольнаго сѣченія или, съ нѣкоторымъ коэффиціентомъ, полотнамъ, которыхъ ригеля и стойки имѣютъ сѣченія другого вида, но подобныя.

§ 4. Напряженіе матеріала въ полотнахъ,—въ частности въ ригеляхъ.

Хотя, вообще, казалось бы, что наивыгоднѣйшіе размѣры частей полотенъ должны получаться тогда, когда они разсчитаны на наибольшія предѣльныя допускаемыя напряженія, т. е. на $R_0 = R_1$, но видъ формулы (10) не даетъ въ этомъ увѣренности, такъ какъ R_0 и R_1 входятъ въ оную въ числителѣ и въ знаменателѣ и притомъ во второй степени; поэтому чтобы судить о вліяніи R_0 и R_1 на величину выраженія G, разсмотримъ въ отдѣльности члены зависящіе отъ R_0 и отъ R_1, для случая когда $\rho = 1$, т. е. когда $\theta = 0$, или для полотенъ одностворчатыхъ.

Пусть R_1 имѣетъ наибольшее предѣльное значеніе и остается таковымъ (т. е. равно коэффиціенту прочнаго сопротивленія), а R_0 пусть уменьшается, тогда выраженіе

$$\frac{1}{R_0} q_I \left(\frac{1}{\varphi}\frac{R_1}{R_0} + c^2\right) \text{ увеличивается,}$$

а

$$R_0 \frac{4q_{II}\varphi c^2}{R_1^{\,2}} \text{ уменьшается;}$$

въ сложности же получается увеличеніе или уменьшеніе G смотря по тому, что больше, приращеніе ли увеличенія или приращеніе уменьшенія, т. е. что больше:

$$\left(\frac{q_I}{\varphi}\frac{R_1}{R_0} + q_I c^2\right) \text{ или } \frac{4q_{II}\varphi c^2}{R^2_{\;1}}.$$

Но изъ таблицы I-ой видимъ, что при всѣхъ k^4 одно уже q_I всегда больше $4q_{II}\varphi$ или $q_I c^2$ всегда больше $4q_{II}\varphi c^2$ и тѣмъ болѣе больше $\frac{4q_{II}\varphi c^2}{R^2_{\;1}}$, слѣдовательно всегда и

$$\frac{q'}{\varphi}\frac{R_1}{R_0} + q_I c^2 > \frac{4q_{II}\varphi c^2}{R^2_{\;1}},$$

а потому, отъ уменьшенія R_0, всегда произойдетъ увеличеніе G, т. е. увеличеніе объема матеріала полотенъ, что указываетъ на невыгодность придавать ригелямъ размѣры несоотвѣтствующіе наибольшему допускаемому напряженію.

§ 5. Напряженіе матеріала въ стойкахъ; при нѣкоторыхъ k^4 выгодно уменьшать это напряженіе.

Теперь допустимъ, что R_0 не измѣняется, оставаясь равнымъ коэффиціенту прочнаго сопротивленія, а R_1 уменьшается, начиная съ предѣльной величины $R_1 = R_0$; тогда въ формулѣ (10) часть

$$\left(4q_{II} + 4q_I\varphi c^2 \frac{R_0}{R_1}\right)\frac{1}{R_1} \text{ увеличивается,}$$

а

$$\frac{q_I}{\varphi}\frac{1}{R^2_{\;0}} R_1 \text{ уменьшается;}$$

для того же, чтобы узнать, что произойдетъ въ совокупности, уменьшеніе или увеличеніе, умножимъ сумму этихъ членовъ на R_0 и обозначимъ $\frac{R_1}{R_0} = t$, тогда:

$$\left(\frac{q_I}{\varphi}\frac{R_1}{R^2_{\;0}} + 4q_{II}\frac{1}{R_1} + 4q_I\varphi c^2\frac{R_0}{R^2_{\;1}}\right) R_0 =$$

$$= \left(\frac{q_I}{\varphi} t + 4q_{II}\frac{1}{t} + 4q_I\varphi c^2 \frac{1}{t^2}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

Выраженіе (11) есть уравненіе съ одной перемѣнной t вида

$$At + B\frac{1}{t} + C\frac{1}{t^2},$$

гдѣ

$$A = \frac{q_{\prime}}{\varphi},\quad B = 4q_{\prime\prime} \text{ и } C = 4q_{\prime}\varphi c^2.$$

Пусть, при $R_0 = R_1$, т. е. когда $t = 1$ уравненіе это имѣетъ значеніе D, или

$$A + B + C = D.$$

Какъ только t измѣнится (оставаясь всегда меньшимъ единицы, такъ какъ $R_1 < R_0$), уравненіе (11) приметъ видъ и будетъ имѣть значеніе:

$$At + \frac{B}{t} + \frac{C}{t^2} = D + F.$$

Разность

$$A(t-1) + B\left(\frac{1}{t} - 1\right) + C\left(\frac{1}{t^2} - 1\right) = F. \quad . \quad . \quad (12)$$

укажетъ, при F положительномъ, что съ уменьшеніемъ R_1 значеніе выраженія (11), а стало быть и объемъ матеріала полотенъ увеличивается, а при F отрицательномъ—уменьшается.

Положимъ, что $F < 0$; такъ какъ для насъ тутъ не важна абсолютная величина разности F, а лишь знакъ ея, то выраженіе (12) можетъ быть написано:

$$A(t-1) + B\left(\frac{1}{t} - 1\right) + C\left(\frac{1}{t^2} - 1\right) < 0$$

или

$$At^2(t-1) + Bt(1-t) + C(1-t^2) < 0$$

или

$$C(1+t) + Bt - At^2 < 0$$

или

$$t^2 - \frac{B+C}{A}t - \frac{C}{A} > 0.$$

Лѣвую часть неравенства можемъ изобразить черезъ $(t - t_1)(t - t_2)$, гдѣ t_1 и t_2 корни уравненія

$$t^2 - \frac{B+C}{A}t - \frac{C}{A} = 0$$

равные

$$t_{1,2} = \frac{B + C \pm \sqrt{(B+C)^2 + 4AC}}{2A},$$

слѣдовательно должно быть:

$$t - \frac{B + C + \sqrt{(B+C)^2 + 4AC}}{2A} > 0$$

или окончательно: для того чтобы F было < 0, надо чтобы всегда было

$$t > \frac{B + C + \sqrt{(B+C)^2 + 4AC}}{2A}$$

или, подставивъ значенія буквъ A, B и C, чтобы t было больше

$$\frac{4q_{II} + 4q_{I}\varphi c^2 + \sqrt{16(q_{II} + q_{I}\varphi c^2)^2 + 16 q_{I} q_{II} c^2}}{2q_{I}} \cdot \varphi$$

или

$$t > \frac{1}{2} \cdot 4\varphi \frac{q_{II}}{q_{I}} \left(1 + \varphi c^2 + \sqrt{(1+\varphi c^2)^2 + \frac{q_{I}}{q_{II}} c^2}\right).$$

Составивъ таблицу № 2 значеній

$$\frac{1}{2} \cdot 4\varphi \frac{q_{II}}{q_{I}} \left(1 + \varphi c^2 + \sqrt{(1+\varphi c^2)^2 + \frac{q_{I}}{q_{II}} c^2}\right) = L. \quad . \quad (13)$$

для разныхъ c, отъ $c^2 = 0{,}2$ до $c^2 = 1$, и разныхъ табличныхъ φ и $\frac{q_{II}}{q_{I}}$ или, что все равно, для разныхъ k^4 и выписавъ только тѣ значенія, которыя меньше единицы, такъ какъ по заданію $t < 1$, видимъ, во 1-хъ, что не ко всѣмъ k^4 относится приведенное изслѣдованіе, такъ какъ, при k^4 меньшихъ 4,4 всѣ значенія L получаются больше единицы, и во 2-хъ, что начиная съ $k^4 > 4{,}4$ и при возрастаніи величинъ c^2, съ k^4 еще большихъ, значенія t, заключающіяся между 1 и табличною величиною L даютъ $F < 0$, т. е. объемъ матеріала меньшій, чѣмъ при $t = 1$ (или при $R_0 = R_1$); при t же меньшихъ, чѣмъ табличныя L, получается $F > 0$, т. е. объемъ матеріала большій, чѣмъ при $t = 1$. Изъ сего вытекаетъ, что существуютъ нѣкоторыя значенія t, заключающіяся между $t = 1$ и $t = L$, которыя даютъ наивыгоднѣйшія рѣшенія задачи, т. е. наименьшій объемъ матеріала. Эти t найдутся изъ производной выраженія (11), приравненной нулю:

$$\frac{q_{I}}{\varphi} - \frac{4q_{II}}{t^2} - \frac{2t \cdot 4q_{I}\varphi c^2}{t^4} = 0,$$

откуда

$$t = \sqrt[3]{\frac{4q_{II}}{q_{I}}\varphi}\left(\sqrt[3]{\varphi c^2 + \sqrt{\varphi^2 c^4 - \frac{1}{27}\frac{4q_{II}}{q_{I}}\varphi}} + \right.$$

$$\left. + \sqrt[3]{\varphi c^2 - \sqrt{\varphi^2 c^4 - \frac{1}{27}\frac{4q_{II}}{q_{I}}\varphi}}\right) \cdot \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (14)$$

Значенія формулы (14) при разныхъ φ и c, отъ $c^2 = 0{,}2$ до $c^2 = 1$, вычислены въ таблицѣ № 3, которая указываетъ на какое напряженіе въ каждомъ данномъ случаѣ слѣдуетъ разсчитывать вертикальные элементы полотенъ—стойки, чтобы получить наименьшій объемъ матеріала

Итакъ, при R_0 = коэффиціенту прочнаго сопротивленія и при $R_1 = tR_0$, гдѣ t взято изъ таблицы № 3, получается наименьшій объемъ матеріала полотенъ, поскольку этотъ объемъ зависитъ отъ R_0 и R_1.

§ 6. Выборъ наивыгоднѣйшихъ k^4.

Выяснивъ, такимъ образомъ, наивыгоднѣйшія значенія R_0 и R_1 въ выраженіи

$$G = \frac{3}{2}\delta\frac{H^3}{s}\cdot\frac{1}{R_0}\left[\frac{q_{I}}{\varphi}\cdot\frac{R_1}{R_0} + q_{I}c^2 + 4q_{II}\frac{R_0}{R_1} + 4q_{II}\varphi c^2\frac{R_0^{\,2}}{R_1^{\,2}}\right]$$

остается разсмотрѣть какія слѣдуетъ предпочесть φ, q_{I}, q_{II}.

Часть выраженія G, заключающаяся въ скобкахъ, можетъ быть представлена такъ:

$$\frac{q_{I}}{\varphi}\,t + q_{I}c^2 + 4q_{II}\frac{1}{t} + 4q_{II}\varphi c^2\,\frac{1}{t^2},$$

гдѣ $t = \frac{R_1}{R_0}$. Положимъ пока, что $R_1 = R_0$ или $t = 1$, тогда оно получитъ видъ:

$$\frac{q_{I}}{\varphi} + q_{I}c^2 + 4q_{II} + 4q_{II}\varphi c^2 = \left(\frac{q_{I}}{\varphi} + 4q_{II}\right) + c^2\,(q_{I} + 4\varphi q_{II})\,. \quad (15)$$

Значенія $\frac{q_1}{\varphi} + 4q_{II}$ и $q_{I} + 4\varphi q_{II}$, при разныхъ φ или, что все равно, при разныхъ k^4 даны въ послѣднихъ столбцахъ таблицы № 1, и такъ какъ, начиная съ малыхъ k^4, первое выраженіе имѣетъ значенія постепенно увеличивающіяся, а второе—уменьшающіяся, то сумма ихъ при разныхъ c^2 должна повидимому имѣть опредѣленные максимумы или минимумы. Изъ таблицы № 4 значеній сего выраженія при разныхъ k^4 и разныхъ c, отъ $c^2 = 0{,}2$ до $c^2 = 1$, усматриваемъ однако, что для значеній $c^2 = 0{,}2$ и 0,3 выраженіе

$$\left(\frac{q_{I}}{\varphi} + 4q_{II}\right) + c^2\,(q_{I} + 4\varphi q_{II})$$

не имѣетъ ни максимумовъ, ни минимумовъ, такъ какъ оно съ увеличеніемъ k^4 постоянно увеличивается; для остальныхъ же c, отъ $c^2 = 0{,}4$ до $c^2 = 1$, имѣются минимумы въ предѣлахъ между $k^4 = 2{,}60$ и $k^4 = 4{,}40$. Значеніе $c^2 = 0{,}3$ составляетъ какъ бы границу между выраженіями

$$\left(\frac{q_{I}}{\varphi} + 4q_{II}\right) + c^2\,(q_{I} + 4\varphi q_{II}),$$

неимѣющими минимумовъ и имѣющими таковые; это значеніе $c^2 = 0{,}3$ соотвѣтствуетъ $c = 0{,}55$, т. е. соотвѣтствуетъ почти квадратной формѣ полотенъ; слѣдовательно, таблица № 4 наглядно указываетъ намъ, что въ полотнахъ разсматриваемаго типа съ высотою большею, чѣмъ ширина, выгоднѣе брать какъ можно меньшіе k^4,—въ этомъ отношеніи предѣла нѣтъ и развивать размѣры ригелей на счетъ реберъ; для полотенъ же, ширина которыхъ больше высоты, имѣется для всякаго отношенія $\frac{a}{H}=c$ опредѣленное k^4, при которомъ объемъ матеріала получается наименьшій,— но всѣ эти k^4 заключаются между 2,6 и 4,4.

Сравнивъ таблицу № 4 съ таблицами № 2 и № 3, видимъ, что для исчисленія наименьшихъ объемовъ матеріала при одинаковыхъ предѣльныхъ напряженіяхъ въ ригеляхъ и въ стойкахъ полезны числа таблицы № 4 лишь для k^4, меньшихъ 4,4 и находящіяся выше черточекъ; значенія же k^4 ниже ихъ могутъ пригодиться только въ случаяхъ, если, по конструктивнымъ соображеніямъ, нельзя построить полотенъ съ одинаковыми напряженіями матеріала и наивыгоднѣйшихъ размѣровъ, — въ такихъ случаяхъ, слѣдуетъ имѣть въ виду таблицы №№ 2 и 3 для выбора допускаемыхъ предѣльныхъ напряженій.

Въ разсматриваемомъ типѣ полотенъ, т. е. при $\rho = 1$ и для чиселъ таблицы 4-ой выше черточекъ, объемъ матеріала выразится по форм. 9 и 10.

$$W + V = 2aH \,.\, G = 3\delta a \frac{H^4}{Rs}\left[\left(\frac{q_I}{\varphi} + 4q_{II}\right) + c^2\,(q_I + 4q_{II}\varphi)\right] =$$

$$= 3\delta a \frac{H^4}{Rs}\left(\frac{q_I}{\varphi} + 4q_{II}\right)(1+\alpha) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (16)$$

§ 7. Общій пріемъ разсчета одностворчатыхъ полотенъ, состоящихъ изъ одиночныхъ ригелей и одиночныхъ стоекъ.

Итакъ, для разсчета наивыгоднѣйшихъ размѣровъ частей шлюзныхъ полотенъ этого типа *слѣдуетъ, сообразно данной величинѣ* $c = \frac{a}{H}$, *отыскать въ таблицѣ № 4 то* k^4, *при которомъ получается наименьшій объемъ матеріала* (при $\rho = 1$) и вычислить, по формулѣ (7), отношеніе между толщиною ригелей и стоекъ, а затѣмъ, по нѣкоторой толщинѣ полотенъ, найти размѣры поперечныхъ сѣченій ригелей и стоекъ, пользуясь формулами (5) и (6); причемъ, такъ какъ объемъ матеріала полотенъ этаго типа обратно пропорціоналенъ толщинѣ ихъ, что видно изъ форм. 10, то, слѣдовательно, выгодно увеличивать толщину полотенъ, насколько позволяютъ конструктивныя соображенія.

Толщина существующихъ шлюзныхъ полотенъ, какъ извѣстно, весьма различна: отъ $\frac{1}{8}$ до $\frac{1}{15}$ ширины ихъ.

§ 8. Коэффиціентъ ρ для полотенъ двустворчатыхъ.

Переходя къ полотнамъ двустворчатымъ, надо во 1-хъ опредѣлить какія точныя значенія можетъ принимать коэффиціентъ ρ и во 2-хъ изслѣдовать въ какой мѣрѣ измѣненіе его вліяетъ на измѣненіе объема полотенъ.

Изъ сравненія формулъ (2) и (5) имѣемъ:

$$(5) \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \quad \rho R = q_{,} \frac{Pa}{4N} \cdot \frac{z_0}{I_0},$$

откуда:

$$q_{,} \frac{P}{2N} = \rho R \frac{2}{a} \cdot \frac{I_0}{z_0}$$

$$(2) \quad . \ R = q_{,} \frac{P}{2N}\left(\frac{a}{2} \cdot \frac{z_0}{I_0} + \frac{cot\,\theta}{\omega_0}\right) = \rho R + \rho R \cdot \frac{2}{a} \cdot \frac{I_0}{z_0} \cdot \frac{cot\,\theta}{\omega_0}$$

и

$$\frac{1}{\rho} - 1 = 2\,\frac{I_0}{z_0} \cdot \frac{1}{\omega_0} \cdot \frac{cot\,\theta}{a} \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \quad (17)$$

§ 9. Изслѣдованіе коэффиціента ρ для полотенъ съ одиночными ригелями.

Для типа полотенъ съ одиночными ригелями прямоугольнаго сѣченія имѣемъ:

$$\frac{I_0}{z_0} \cdot \frac{1}{\omega_0} = \frac{(2z_0)}{6},$$

слѣдовательно:

$$\frac{1}{\rho} - 1 = \frac{(2z_0)}{3} \cdot \frac{cot\,\theta}{a} \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \quad (18)$$

Изъ этой формулы видно, что ρ тѣмъ болѣе, чѣмъ менѣе $2z_0$ — (толщина ригелей) и чѣмъ менѣе $\frac{cot\,\theta}{a}$.

Измѣненіе значеній $\frac{cot\,\theta}{a}$ зависитъ исключительно отъ θ, такъ какъ для данной ширины камеры (шлюза)—$2L$ ширина полотенъ приблизительно:

$$2a = \frac{L}{cos\,\theta},$$

слѣдовательно:

$$\frac{cot\,\theta}{a} = \frac{2}{L} \cdot cot\,\theta \cdot cos\,\theta,$$

каковое выраженіе тѣмъ менѣе, чѣмъ больше θ. Предѣлы колебанія значеній $cot\,\theta \cdot cos\,\theta$ при принятыхъ въ шлюзной практикѣ величинахъ θ отъ 14° до $18^1/_3$° заключаются между 3,89 (при $\theta = 14°$) до 2,86 (при $\theta = 18^1/_3°$), что соотвѣтствуетъ, при толщинѣ ригелей въ $0{,}1\,a$, измѣненіямъ величины ρ отъ 0,882 (при 14°) до 0,909 (при $18^1/_3$°), т. е. почти на 3%.

Какъ выше указано, увеличеніе ρ происходитъ и отъ уменьшенія $2z_0$ — толщины ригелей. Для нагляднаго представленія этихъ измѣненій подставимъ въ формулѣ (18) выраженіе $2z_0$ изъ формулы (8)

$$2z_0 = s \cdot \frac{\alpha}{1+\alpha}$$

и положивъ

$$s = 0{,}1 \,.\, 2a$$

найдемъ

$$\frac{1}{\rho} - 1 = \frac{0{,}2}{3} \cdot \frac{\alpha}{1+\alpha} \,.\, cot\,\theta \;.\;.\;.\;.\;.\;. \quad (19)$$

и при $\alpha = {}^1/_3$ и $\theta = 14° - \rho = 0{,}93731$, а при $\theta = 18{}^1/_3{}° - \rho = 0{,}95211$

при $\alpha = {}^1/_2$ и $\theta = 14° - \rho = 0{,}91817$, а при $\theta = 18{}^1/_3{}° - \rho = 0{,}9317$

при $\alpha = 1$ и $\theta = 14° - \rho = 0{,}88207$, а при $\theta = 18{}^1/_3{}° - \rho = 0{,}90860$

при $\alpha = 2$ и $\theta = 14° - \rho = 0{,}85161$, а при $\theta = 18{}^1/_3{}° - \rho = 0{,}88413$

при $\alpha = 3$ и $\theta = 14° - \rho = 0{,}83544$, а при $\theta = 18{}^1/_3{}° - \rho = 0{,}87150$

Изъ приведеннаго видно, что ρ въ разсматриваемомъ типѣ полотенъ, съ измѣненіемъ толщины ригелей и угла θ, измѣняется очень немного и поэтому вліяніе его на измѣненіе объема матеріала ихъ слабо.

Для полотенъ съ ригелями сѣченія не прямоугольнаго, а двутавроваго или иного, точное выраженіе коэффиціента ρ опредѣлить трудно; для типовъ съ одиночными ригелями можно приблизительно принимать ρ равнымъ отъ 0,7 до 0,9 и, по вычисленіи размѣровъ ригеля, провѣрять величину ρ по формулѣ 17-й или величину R_0 по формулѣ 2-й.

§ 10. Объемъ матеріала двустворчатыхъ полотенъ состоящихъ изъ одиночныхъ ригелей и изъ одиночныхъ стоекъ. Разсчетъ этихъ полотенъ. Выборъ угла θ.

Въ формулу (10) введемъ коэффиціентъ ρ полагая $R_0 = \rho R$ и $R_1 = R$, тогда

$$G = \frac{3}{2}\,\delta\,\frac{H^3}{Rs}\left[\frac{q_{\prime}}{\varphi}\,\frac{1}{\rho^2} + q_{\prime}\,\frac{c^2}{\rho} + 4q_{\prime\prime} + 4q_{\prime\prime}\rho\varphi c^2\right]$$

или

$$G = \frac{3}{2}\,\delta\,\frac{H^3}{Rs}\left(\frac{q_{\prime}}{\varphi}\cdot\frac{1}{\rho^2} + 4q_{\prime\prime}\right)(1+\alpha) \;.\;.\;.\;. \quad (20)$$

Для уменьшенія G слѣдуетъ выбирать по меньше $\left(\frac{q'}{\varphi}\cdot\frac{1}{\rho^2} + 4q_{\prime\prime}\right)$ и поменьше $\alpha = \rho\varphi c^2$, что для опредѣленнаго ρ приводитъ къ противоположнымъ требованіямъ, такъ какъ изъ табл. I-ой видно, что выраженіе $\frac{q'}{\varphi} + 4q_{\prime\prime}$ тѣмъ менѣе, чѣмъ менѣе k^4; при уменьшеніи же $\alpha = \rho\varphi c^2$, φ должно уменьшаться, т. е. k^4 — увеличиваться. Изъ этого слѣдуетъ заключить, что существуетъ нѣкоторое опредѣленное k^4, при которомъ G получается наименьшее; но вывести значеніе этого k^4 или даже составить таблицу, подобно тому какъ составлено для рѣшенія такой же задачи при $\rho = 1$, — не представляется возможнымъ. *Къ отысканію наивыгоднѣйшаго* k^4 *можно подойти ощупью, пользуясь вспомогательною таблицею* № 5, *составленною по формулѣ* (19) *для толщины полотенъ* $s = 0{,}1 \, . \, 2a$ и для $\theta = 14^\circ$ и $\theta = 18^1/_3{}^\circ$. *По этой таблицѣ находимъ для разныхъ* $\alpha = \frac{z_0}{z_1}$ *значенія соотвѣтственныхъ величинъ* ρ, *по которымъ для даннаго* c^2 *вычисляемъ* $\varphi = \frac{\alpha}{\rho} \cdot \frac{1}{c^2}$ $\left(\text{по табличнымъ } \frac{\alpha}{\rho}\right)$, а затѣмъ находимъ соотвѣтственные k^4, $\frac{q_I}{\varphi}$ и q_{II}, и по формулѣ (20) выраженія $\left(\frac{q'}{\varphi} \cdot \frac{1}{\rho^2} + 4q_{II}\right)(1 + \alpha)$, опредѣляющія, при извѣстныхъ s и θ, объемы матеріала. *По наименьшему изъ* $\left(\frac{q_I}{\varphi} \cdot \frac{1}{\rho^2} + 4q_{II}\right)(1 + \alpha)$, *размѣры ригелей и стоекъ вычисляемъ по формулѣ* (5) и (6).

Выше было выведено, что увеличивая θ достигаемъ увеличенія ρ, что въ свою очередь нѣсколько способствуетъ уменьшенію объема матеріала. Но съ увеличеніемъ θ увеличивается длина ригелей, отъ чего объемъ матеріала долженъ увеличиться. Чтобы разобраться въ этомъ вопросѣ обратимся къ формуламъ (5) и (6), которыя, при ширинѣ ригелей b_0 и стоекъ—b_1 при прямоугольныхъ сѣченіяхъ даютъ:

$$Nb_0 = \frac{3}{2} q_I \frac{\delta \, a^2 H^2}{\rho R} \cdot \frac{1}{(2z_0)^2}$$

и

$$mb_1 = 6q_{II} \frac{\delta \, H^3 2a}{R \, . \, (2z_1)^2} \, .$$

Такъ какъ для камеры шириною $2L$, ширину полотенъ можемъ принять

$$2a = \frac{L}{\cos\theta} \, ,$$

то

$$Nb_0 = \frac{3}{8} \cdot q_I \frac{\delta \, L^2 H^2}{\rho R \, . \, \cos^2\theta} \cdot \frac{1}{(2z_0)^2}$$

и

$$mb_1 = 6q_{II} \frac{\delta \, H^3 L}{R \, . \, \cos\theta \, . \, (2z_1)^2} \, .$$

Объемъ ригелей выражается

$$Nb_0 \; (2z_0) \, . \, 2a = \frac{3}{8} q_I \frac{\delta \, L^3 H^2}{\rho R \, . \, \cos^3\theta} \cdot \frac{1}{(2z_0)} \, ,$$

а объемъ стоекъ

$$mb_1 \, . \, (2z_1) \, . \, H = 6q_{II} \frac{\delta \, H^4 L}{R \, . \, \cos\theta \, . \, (2z_1)} \, .$$

Послѣднее выраженіе $mb_1 \, . \, (2z_1) \, . \, H$, очевидно, уменьшается съ уменьшеніемъ θ, а въ выраженіи $Nb_0 \, (2z_0) \, . \, 2a$, гдѣ въ знаменатель входитъ $\cos^3\theta$ и ρ зависящее отъ θ — это не ясно.

Приведенное ниже вычисленіе значеній $\frac{1}{\rho \cdot cos^3 \theta}$ при разныхъ α и при $\theta = 14^\circ$ и $\theta = 18^1/_3{}^\circ$ убѣждаетъ однако, что и $Nb_0 \cdot (2z_0) \cdot 2a$ тоже уменьшается съ уменьшеніемъ θ, почему, *для экономіи матеріала, слѣдуетъ всегда выбирать меньшій* θ.

При $\alpha = {}^1/_3$ и $\theta = 14^\circ$ — $\frac{1}{\rho cos^3 \theta} = 1{,}1679$, а при $\theta = 18^1/_3$ — $\frac{1}{\rho cos^3 \theta} = 1{,}2280$.

При $\alpha = {}^1/_2$ и $\theta = 14^\circ$ — $\frac{1}{\rho cos^3 \theta} = 1{,}1922$, а при $\theta = 18^1/_3$ — $\frac{1}{\rho cos^3 \theta} = 1{,}2475$.

При $\alpha = 1$ и $\theta = 14^\circ$ — $\frac{1}{\rho cos^3 \theta} = 1{,}2410$, а при $\theta = 18^1/_3$ — $\frac{1}{\rho cos^3 \theta} = 1{,}2868$.

При $\alpha = 2$ и $\theta = 14^\circ$ — $\frac{1}{\rho cos^3 \theta} = 1{,}2854$, а при $\theta = 18^1/_3$ — $\frac{1}{\rho cos^3 \theta} = 1{,}3214$.

При $\alpha = 3$ и $\theta = 14^\circ$ — $\frac{1}{\rho cos^3 \theta} = 1{,}3103$, а при $\theta = 18^1/_3$ — $\frac{1}{\rho cos^3 \theta} = 1{,}3415$.

§ 11. Объемъ матеріала двустворчатыхъ полотенъ со стойками обхваченными двойными ригелями, разсматриваемыми какъ составные брусья. Разсчетъ полотенъ такого типа двустворчатыхъ и одностворчатыхъ.

Въ этомъ случаѣ $2z_0 = s$ и, по формулѣ (7) $\frac{z_0}{z_1} = \rho \varphi c^2 = \alpha$, имѣемъ $2z_1 = \frac{s}{\alpha}$ (α для этого типа воротъ всегда больше единицы).

Объемъ N ригелей шириною b_0 будетъ $W = N\ (2z_0 - 2z_1)\ b_0 \cdot 2a$, а объѐмъ всего матеріала

$$W + V = Ns\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) b_0 2a + m\ \frac{s}{\alpha} \cdot b_1 \cdot H,$$

гдѣ mb_1 число и ширина стоекъ.

Изъ формулъ (5) и (6), при сѣченіяхъ ригелей и стоекъ прямоугольныхъ, находимъ значенія Nb_0 и mb_1, а именно

$$q_I\ \frac{\delta\, a^2 H^2}{4\rho R} = N\ \frac{s^3 - \frac{s^3}{\alpha^3}}{6 \cdot s}\ b_0,$$

откуда

$$Nb_0 = \frac{3}{2}\ q_I\ \frac{\delta\, a^2 H^2}{\rho R} \cdot \frac{1}{s^2} \cdot \frac{\alpha^3}{\alpha^3 - 1}$$

и

$$6 q_{II}\ \frac{\delta H^3 \cdot 2a}{R} = m\ \frac{s^2}{\alpha^2} \cdot b_1,$$

откуда

$$mb_1 = 6 q_{II}\ \frac{\delta H^3 \cdot 2a}{R} \cdot \frac{\alpha^2}{s^2}$$

и затѣмъ

$$W + V = 2a \cdot H \cdot \frac{3}{2}\, \delta\, \frac{H^3}{Rs}\left[\frac{\alpha - 1}{\alpha} \cdot \frac{q_I}{\rho} \cdot c^2\ \frac{\alpha^3}{\alpha^3 - 1} + 4 q_{II} \alpha\right]$$

или объемъ матеріала полотенъ

$$W + V = 2aHG',$$

гдѣ

$$G' = \frac{3}{2}\,\delta\,\frac{H^3}{Rs}\left[\frac{1}{\rho}\cdot\frac{q_{I}c^2}{1+\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\alpha^2}} + 4q_{II}\alpha\right] \quad . \quad . \quad . \quad (21)$$

Чтобы выяснить измѣненія G' съ измѣненіемъ α, надо опредѣлить значеніе ρ.

Въ формулу (17) подставимъ (для двойныхъ ригелей)

$$\frac{I_0}{z_0}\cdot\frac{1}{\omega_0} = \frac{(2z_0)^3-(2z_1)^3}{6\,.\,(2z_0)}\,b_0\cdot\frac{1}{(2z_0-2z_1)\,b_0},$$

что при

$$2z_0 = s \quad \text{и} \quad 2z_1 = \frac{s}{\alpha}$$

приметъ видъ

$$\frac{I_0}{z_0} = \frac{s}{6}\cdot\left(1+\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\alpha^2}\right),$$

и слѣдовательно

$$\frac{1}{\rho} - 1 = \frac{s}{3a}\left(1+\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\alpha^2}\right)cot\,\theta = s\,.\,\frac{\alpha^2-1}{\alpha^2(\alpha-1)}\,\frac{cot\,\theta}{3a} \quad . \quad . \quad (22)$$

Вычисляя изъ этого выраженія значенія ρ для разныхъ α, при данныхъ s и θ и подставляя въ формулу (21) значенія ρ, q_{I} и q_{II} соотвѣтственныя извѣстному α, усматривается, что *съ уменьшеніемъ α уменьшается и величина G'.*

На основаніи этаго, для разсчета двустворчатыхъ полотенъ съ двойными ригелями, слѣдуетъ поступать такъ:

Задавшись угломъ θ и толщиною s полотенъ, выбираемъ наименьшее, наиболѣе удобное въ конструктивномъ отношеніи α и по формулѣ (22) *вычисляемъ ρ и $\frac{\alpha}{\rho}$; тогда изъ формулы $\alpha = \rho\varphi c^2$ находимъ $\varphi = \frac{\alpha}{\rho}\cdot\frac{1}{c^2}$* и сообразно этому φ — по таблицѣ № 1 — величины q_{I} и q_{II} *и по формуламъ* (5) *и* (6) *размѣры ригелей и стоекъ.*

Одностворчатыя полотна этого типа разсчитываются такъ же какъ и двустворчатыя; выбравъ возможно малое α находимъ $\varphi = \frac{\alpha}{c^2}$ и соотвѣтственно этому q_{I} и q_{II}, а по нимъ и размѣръ стоекъ и ригелей.

Само собою разумѣется, разсчетныя сѣченія брусьевъ должны быть чистыя, безъ отверстій для болтовъ, а толщина брусьевъ, составляющихъ ригели, должна быть увеличена на глубину врубокъ.

Такъ же какъ и въ § 9 коэффиціентъ ρ для конструкцій желѣзныхъ не можетъ быть точно опредѣленъ; для типовъ съ двойными ригелями, обхватывающими стойки, ρ можно принимать приблизительно равнымъ отъ 0,65 до 0,75 и по вычисленіи размѣровъ ригелей провѣрять ρ по формулѣ 17-й или R_0 по формулѣ 2-й.

§ 12. Объемъ матеріала двустворчатыхъ полотенъ съ ригелями обхваченными двойными стойками, разсматриваемыми какъ составные брусья. Разсчетъ полотенъ такого типа двустворчатыхъ и одностворчатыхъ.

Полагая $2z_1 = s$ и $\frac{z_0}{z_1} = \alpha = \rho\varphi c^2$, имѣемъ $2z_0 = \alpha s$. (α въ этомъ случаѣ всегда меньше единицы).

Объемъ стоекъ

$$V = m\,(2z_1 - 2z_0)\,b_1\,.\,H,$$

а объемъ ригелей

$$W = N\,.\,2z_0\,.\,b_0\,.\,2a.$$

Изъ (5) и (6) имѣемъ

$$Nb_0 = \frac{3}{2}\,q_I\,\frac{\delta\,a^2H^2}{\rho R}\cdot\frac{1}{\alpha^2 s^2}$$

и

$$mb_1 = 6q_{II}\,\frac{\delta\,H^3\,.\,2a}{R}\cdot\frac{1}{s^2\,(1-\alpha^3)}$$

Тогда обозначая $W + V = 2a\,.\,H\,.\,G''$ будетъ

$$G'' = \frac{3}{2}\,\delta\,\frac{H^3}{Rs}\left[4q_{II}\,\frac{1}{1+\alpha+\alpha^2} + \frac{1}{\rho}\cdot\frac{q_I c^2}{\alpha}\right]\quad.\quad.\quad.\;(23)$$

Изъ таблицы 5-ой можно усмотрѣть, что съ увеличеніемъ α произведеніе $\rho\alpha$ увеличивается тоже, и поэтому *для уменьшенія G'' надо увеличивать α.*

Для разсчета двустворчатыхъ полотенъ этого типа *надо, выбравъ извѣстное дробное α, возможно близкое къ единицѣ, вычислить по формулѣ* (19) *соотвѣтствующее* ρ (задавшись нѣкоторыми s и θ) и по $\varphi = \frac{\alpha}{\rho}\cdot\frac{1}{c^2}$, отыскавъ q_I и q_{II}, найти по нимъ размѣры частей по формуламъ (5) и (6).

Относительно желѣзныхъ конструкцій этого типа см. § 9.

Подобнымъ же образомъ разсчитываются и одностворчатыя полотна, находя $\varphi = \frac{\alpha}{c^2}$ по нѣкоторому заданному α—возможно большему.

§ 13. Замѣчанія относительно полотенъ съ двойными ригелями или двойными стойками. Болѣе выгодныя изъ нихъ.

Изъ формулъ (21) и (23) истекаетъ общее правило для достиженія экономіи матеріала, а именно: въ полотнахъ съ двойными ригелями надо брать $\alpha = \frac{z_0}{z_1}$ возможно меньше, а въ полотнахъ съ двойными стойками то же α — возможно больше, т. е. *въ обоихъ случаяхъ увеличеніе размѣровъ среднихъ, обхватываемыхъ частей выгодно.*

Эти же формулы даютъ возможность опредѣлить какой типъ полотенъ болѣе экономиченъ, — съ двойными ли ригелями или съ двойными стойками. Для сравненія положимъ, что въ первомъ случаѣ отношеніе $\frac{z_0}{z_1} = \alpha$ будетъ такое же, какъ и во второмъ $\frac{z_1}{z_0} = \alpha$, почему въ формулѣ (23) положимъ $\alpha = \frac{1}{\alpha}$ и тогда

$$G' = \frac{3}{2}\,\delta\,\frac{H^3}{Rs}\left[\frac{1}{\rho}\cdot\frac{q_{\prime}c^2}{1+\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\alpha^2}} + 4q_{\prime\prime}\alpha\right] \text{ для двойныхъ ригелей.}$$

$$G'' = \frac{3}{2}\,\delta\,\frac{H^3}{Rs}\left[4q_{\prime\prime}\,\frac{1}{1+\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\alpha^2}} + \frac{\alpha}{\rho}\,q_{\prime}c^2\right] \text{ для двойныхъ стоекъ.}$$

Различіе между этими выраженіями лишь въ членахъ въ скобкахъ:

$$L' = \frac{1}{\rho}\cdot\frac{q_{\prime}c^2}{1+\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\alpha^2}} + 4q_{\prime\prime}\alpha$$

и

$$L'' = 4q_{\prime\prime}\,\frac{1}{1+\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\alpha^2}} + q_{\prime}\,\frac{\alpha}{\rho}\,c^2.$$

Разность

$$L' - L'' = \frac{1}{\rho}\cdot\frac{1}{1+\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\alpha^2}}\left[4\rho q_{\prime\prime}\alpha + 4\rho q_{\prime\prime}\frac{1}{\alpha} - q_{\prime}\alpha c^2 - q_{\prime}c^2\,\frac{1}{\alpha}\right]$$

или

$$L' - L'' = \frac{1}{\rho}\cdot\frac{1}{1+\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\alpha^2}}\,(4q_{\prime\prime}\rho - q_{\prime}c^2)\left(1+\frac{1}{\alpha}\right).$$

Еслибы разность $4q_{\prime\prime}\rho - q_{\prime}c^2$ была всегда положительна, то всегда было бы $L' > L''$, т. е. всегда выгоднѣе было бы дѣлать полотна съ двойными стойками, чѣмъ съ двойными ригелями. Но изъ таблицы 1-ой легко усмотрѣть, что при ρ равномъ единицѣ, $4q_{\prime\prime} < q_{\prime}c^2$ при всѣхъ (почти) k^4 для $c^2 = 0{,}2$ и болѣе, а слѣдовательно тѣмъ болѣе $4q_{\prime\prime}\rho < q_{\prime}c^2$, т. е. типъ съ двойными стойками можетъ быть выгоденъ лишь для полотенъ узкихъ, ширина коихъ не болѣе 0,9 высоты; для полотенъ же болѣе широкихъ несомнѣнно выгоднѣе типъ съ двойными ригелями.

§ 14. Полотна состоящія изъ сплошныхъ рядовъ ригелей и стоекъ вообще. Разсчетъ такаго типа.

Объемъ такихъ полотенъ равенъ $2aHs$, гдѣ s, для данныхъ высоты и ширины, очевидно должна быть наименьшая возможная толщина ихъ. Выше было указано, что объемъ полотенъ обратно пропорціоналенъ толщинѣ ихъ, и что для уменьшенія объема ихъ, надо увеличивать толщину; это явствуетъ изъ общаго выраженія объема (формула 10), — поэтому съ экономической точки зрѣнія полотна, которымъ придана наименьшая возможная толщина т. е. полотна, состоящія изъ сплошныхъ рядовъ ригелей и стоекъ представляются невыгодными, что подтверждается и приведенными ниже примѣрами. Нѣкоторую выгоду можно усматривать въ томъ, что для этихъ полотенъ не требуется особой обшивки, — но все-таки объемъ матеріала въ нихъ больше, чѣмъ въ полотнахъ напр. съ двойными ригелями, въ особенности при нѣсколько значительной толщинѣ ихъ.

Въ типѣ изъ сплошныхъ ригелей и стоекъ слѣдуетъ опредѣлить разсчетомъ только двѣ неизвѣстныя: толщины горизонтальныхъ и вертикальныхъ частей, для чего необходимо имѣть только два уравненія, а именно формулы (5) и (6); формула же (4) является лишнею.

Для одиночныхъ ригелей и стоекъ размѣры частей находимъ изъ формулъ (5) и (6), подставляя $N = H$ и $m = 2a$, тогда,

$$q_I \frac{\delta a^2 H}{4 \rho R} = \frac{I_0}{z_0} = \frac{(2z_0)^2}{6}$$

и

$$q_{II} \frac{\delta H^3}{R} = \frac{I_1}{z_1} = \frac{(2z_1)^2}{6}$$

откуда

$$\left.\begin{aligned} 2z_0 &= \sqrt{\frac{3}{2}\, q_I \frac{\delta a^2 H}{\rho R}} \\ 2z_1 &= \sqrt{6\, q_{II} \frac{\delta H^3}{R}} \end{aligned}\right\} \quad \text{и} \quad \ldots\ldots \quad (24)$$

Если $\rho = 1$ (ворота одностворчатыя), то *рѣшеніе задачи сводится къ отысканію тѣхъ* q_I и q_{II}, *при которыхъ сумма*

$$s = 2z_0 + 2z_1 = \sqrt{\frac{6\,\delta\, H^3}{R}} \left(\frac{c}{2}\sqrt{q_I} + \sqrt{q_{II}}\right)$$

получается наименьшею; суммы $\frac{c}{2}\sqrt{q_I} + \sqrt{q_{II}}$ для c отъ $c = 0{,}3$ до $c = 1$ даны въ таблицѣ № 6.

Для воротъ двустворчатыхъ, когда ρ неизвѣстно, можно тоже руководствоваться таблицею № 6 и для нѣсколькихъ k^4 близкихъ къ наименьшей суммѣ $\frac{c}{2}\sqrt{q_{I}}+\sqrt{q_{II}}$ вычислить ρ изъ формулъ (18) и (24):

$$\frac{1}{\rho}-1=\sqrt{\frac{1}{6}\,q_{I}\,\frac{\delta H}{\rho R}\,\cot\theta}$$

или

$$\left(\frac{1}{\rho}-1\right)\sqrt{\rho}=\sqrt{q_{I}}\,D,$$

гдѣ

$$D=\sqrt{\frac{\delta H}{6\,R}\,\cot\theta},$$

откуда

$$\rho=\frac{2+q_{I}D^2\pm\sqrt{(2+q_{I}D^2)^2-4}}{2}\quad\ldots\quad(25)$$

и такимъ образомъ выбрать болѣе подходящее рѣшеніе.

§ 15. Полотна состоящія изъ сплошныхъ рядовъ ригелей и стоекъ, но двойныхъ тѣхъ или другихъ. Разсчетъ такихъ типовъ. Общія замѣчанія о Лавуановской системѣ полотенъ.

Для двойныхъ ригелей—сплошныхъ имѣемъ:

$$q_{I}\,\frac{\delta a^2 H}{4\rho R}=\frac{I_0}{z_0}=\frac{(2z_0)^3-(2z_1)^3}{6\,.\,(2z_0)}$$

и

$$q_{II}\,\frac{\delta\,H^3}{R}=\frac{I_1}{z_1}=\frac{(2z_1)^2}{6}$$

или при

$$2z_0=s$$

и

$$2z_1=\frac{s}{\alpha}$$

$$q_{I}\,\frac{\delta\,a^2 H}{4\rho R}=\frac{s^2}{6}\cdot\frac{\alpha^3-1}{\alpha^3}$$

и

$$q_{II}\,\frac{\delta\,H^3}{R}=\frac{s^2}{6}\cdot\frac{1}{\alpha^2}\quad\ldots\ldots\quad(26)$$

Раздѣляя первую формулу на вторую получаемъ:

$$\frac{q_{I}}{4\,q_{II}}=\rho\,\frac{1}{c^2}\cdot\frac{\alpha^3-1}{\alpha}\quad\ldots\ldots\quad(27)$$

Если полотно одностворчатое т. е. $\rho=1$, *то для выбраннаго* α *находимъ изъ* (27) *соотвѣтственныя* q_{I} и q_{II}, *умноживъ* $\frac{\alpha^3-1}{\alpha}$ (табл. 5) *на* $\frac{1}{c^2}$ *и отыскивая эту величину равную* $\frac{q_{I}}{4q_{II}}$ *въ послѣдней графѣ табл.* № 1.

Если же ρ не равно 1, то надо согласовать формулу (27) съ (22), которою опредѣляется значенiе ρ и отыскать наименьшее возможное s. Изъ формулъ этихъ находимъ:

$$s = \left[\frac{4q_{II}}{q_I} \cdot \frac{\alpha^3 - 1}{\alpha} \cdot \frac{1}{c^2} - 1 \right] \cdot \frac{3a}{\cot\theta} \cdot \frac{\alpha^2(\alpha - 1)}{\alpha^3 - 1},$$

или

$$s = \left[\frac{4q_{II}}{q_I} \cdot \frac{1}{c^2}\, \alpha(\alpha - 1) - \frac{\alpha^2(\alpha - 1)}{\alpha^3 - 1} \right] 3a \,.\, tg\,\theta \quad . \quad . \quad (28)$$

Формула эта указываетъ, что для уменьшенія s надо брать возможно малыя $\frac{4q_{II}}{q_I}$, что соотвѣтствуетъ возможно малымъ вертикальнымъ частямъ (см. табл. № 1), а также и малая α, такъ какъ, съ увеличенiемъ α, $\alpha(\alpha - 1)$ возрастаетъ очень быстро, а $\frac{\alpha^2(\alpha - 1)}{\alpha^3 - 1}$ всегда меньше единицы; эти условія для полученія меньшихъ s явствуютъ впрочемъ и изъ второй формулы (26).

Для проектированія двустворчатыхъ полотенъ этого типа надо поступать слѣдующимъ образомъ:

Формула (27) даетъ зависимость между α, $\frac{q_I}{4q''}$ и ρ; такъ какъ $\rho = 1$ есть предѣлъ, который не можетъ быть превзойденъ, то *по* $\frac{1}{c^2} \cdot \frac{\alpha^3 - 1}{\alpha}$ *получаемъ предѣльныя значенія* $\frac{q_I}{4q_{II}}$ и такъ какъ, по табл. № 1, величины ихъ заключаются между предѣлами 35,76 и 5,0456,—то по данному $c = \frac{a}{H}$ можно *найти границы величинъ* α, а по нимъ опредѣлить изъ второй формулы (26) *какія предѣльныя значенія можетъ имѣть* s *при найденныхъ предѣлахъ* $\frac{q_I}{4q_{II}}$ и α. Послѣ этого слѣдуетъ по формулѣ (22) опредѣлить для выбранныхъ α и s величины ρ и *окончательно, по формулѣ (27) среднее изъ* $\frac{q_I}{4q_{II}}$, *по которому и найдено будетъ* s. Для повѣрки, слѣдуетъ по этому s вычислить, по формулѣ (22), ρ и подставить въ первую формулу (26).

Подобнымъ образомъ для полотенъ изъ ригелей и **двойныхъ стоекъ— сплошныхъ** имѣемъ формулы:

$$q_I \frac{\delta\, a^2 H}{4\rho R} = \frac{(2z_0)^2}{6}$$

и

$$q_{II} \frac{\delta\, H^3}{R} = \frac{(2z_1)^3 - (2z_0)^3}{6\,(2z_1)}$$

и обозначая

$$2z_1 = s$$

и

$$\frac{z_1}{z_0} = \beta,$$

$$\left.\begin{array}{l} q_{\prime}\,\dfrac{\delta\, a^2 H}{4\rho R} = \dfrac{s^2}{6}\cdot\dfrac{1}{\beta^2} \\ \\ q_{\prime\prime}\,\dfrac{\delta\, H^3}{R} = \dfrac{s^2}{6}\cdot\dfrac{\beta^3-1}{\beta^3} \end{array}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (29)$$

и

и наконецъ

$$\frac{4q_{\prime\prime}}{q_{\prime}}\,\rho = c^2\,\frac{\beta^3-1}{\beta} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (30)$$

Изъ второй формулы (29) видно, что для уменьшенія s слѣдуетъ увеличивать β и брать меньшія $q_{\prime\prime}$.

При $\rho = 1$, *по формулѣ* (30) *опредѣляемъ* $q_{\prime\prime}$, *соотвѣтствующее выбранному* β, *по таблицамъ* № 5 и № 1; *если же* ρ *не равно единицѣ, то положивъ на время, въ формулѣ* 30 — $\rho = 1$, *находимъ предѣльныя величины* $\frac{4q_{\prime\prime}}{q_{\prime}}$ и β *и найдя изъ второй формулы* (29) *предѣльныя* s, *вычислимъ изъ* (22) *соотвѣтствующія* ρ *и т. д., какъ выше, при полотнахъ изъ сплошныхъ стоекъ со сплошными двойными ригелями.*

Закончивъ указанія о примѣненіи теоретически точнаго разсчета Лавуана къ практикѣ, слѣдуетъ замѣтить нижеслѣдующее:

Во 1-хъ, составленныя Лавуаномъ таблицы величинъ коэффиціентовъ $q_{\prime}$ для ригелей и, соотвѣтственно имъ, $q_{\prime\prime}$ для стоекъ даютъ возможность разсчитать напряженія въ 10-ти равноотстоящихъ точкахъ высоты полотенъ. Если высота полотна нѣсколько значительна, то и разстоянія между осями ригелей выходятъ значительны; и такъ какъ, вычисляемыя по табличнымъ коэффиціентамъ, наибольшія напряженія стоекъ относятся къ точкамъ пересѣченій ихъ съ ригелями, то возможно, что, въ дѣйствительности наибольшія напряженія стоекъ прійдутся не на пересѣченіяхъ съ ригелями, а гдѣ-либо въ промежуткѣ между ригелями, на свободной части стоекъ, и тогда дѣйствительныя наибольшія въ нихъ напряженія могутъ значительно превзойти разсчитанныя величины. Недостатокъ этотъ произошелъ отъ того, что по теоретическому заданію, послужившему основаніемъ для разсчетовъ, предположено, что полотно состоитъ изъ безконечнаго числа ригелей и реберъ, очень близкихъ между собою; на дѣлѣ же, нѣкоторое отдаленіе элементовъ можетъ осязательно измѣнить теоретически вѣрно вычисленныя соотношенія.

Во 2-хъ, постройка полотенъ съ ригелями, считая и верхній, совершенно одинакихъ размѣровъ, какъ требуется положеніемъ Лавуана, не всегда удобна; чаще шлюзныя полотна состоятъ изъ крѣпкой, солидно связанной изъ четырехъ брусьевъ рамы, и въ такой лишь рамѣ укрѣпляются ригели, стойки и прочее. Очевидно, къ такого рода полотнамъ разсчетъ, по свособу Лавуана, не примѣнимъ.

Въ самомъ дѣлѣ, если элементы рамы настолько солидны, что изгибъ ихъ отъ дѣйствующей нагрузки не чувствителенъ, то, помѣстивъ раму впереди напора и перекрывъ ее вертикальными или горизонтальными элементами и затѣмъ перпендикулярными къ нимъ, поддерживающими первые, получимъ полотно нѣсколько отличающееся отъ Лавуановскаго типа. Попытку разсчета такого полотна мы и предлагаемъ ниже.

ГЛАВА II.

Полотна съ жесткою рамою.

§ 16. Полотна состоящія изъ жесткой рамы, которая служитъ опорою стоекъ и ригелей. Выгода такихъ полотенъ.

Прежде всего надо рѣшить вопросъ, какимъ образомъ слѣдуетъ передать элементамъ рамы дѣйствіе напора. Допустимъ, что напоръ передается полотну посредствомъ тонкой обшивки, нежесткой и не участвующей въ сопротивленіи полотна; — обшивкою можемъ передать напоръ: 1) на горизонтальные элементы-ригели, поддерживаемые стойками, или 2) на стойки, поддержанныя ригелями; причемъ, конечно, концы тѣхъ и другихъ элементовъ опираются на раму, — будемъ принимать — свободно опираются.

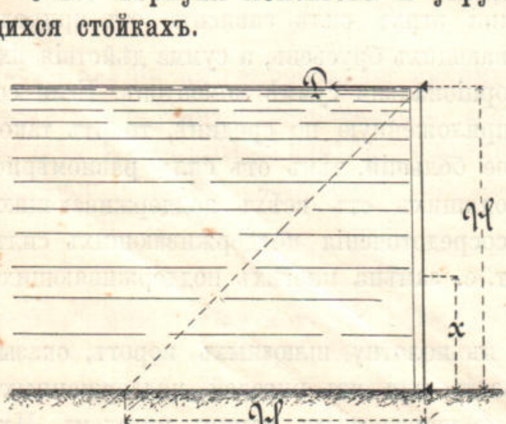
Если представимъ себѣ брусъ, свободно лежащій на двухъ опорахъ, нагруженный сверху и поддержанный снизу нѣсколькими перпендикулярно къ нему расположенными брусьями, которые изгибаются совмѣстно съ первымъ брусомъ подъ дѣйствіемъ его нагрузки, то дѣйствіе этихъ поддерживающихъ брусьевъ, относительно верхняго бруса, можетъ быть разсматриваемо, какъ дѣйствіе нѣкоторыхъ силъ, направленныхъ противоположно нагрузкѣ; причемъ, величина этихъ силъ зависитъ отъ природы матеріала и размѣровъ поддерживающихъ брусьевъ, а сумма дѣйствія ихъ на поддерживаемый брусъ пропорціональна суммѣ моментовъ. Если соединить всѣ эти силы въ одну, приложенную по рединѣ, то отъ такой силы получился бы моментъ вдвое большій, чѣмъ отъ силъ равномѣрно, но врозь дѣйствующихъ, происходящихъ отъ всѣхъ поддерживающихъ брусьевъ. Отсюда ясна выгода сосредоточенія поддерживающихъ силъ, по возможности, въ одну точку, т. е. замѣна многихъ поддерживающихъ брусьевъ—однимъ.

Приложивъ эти разсужденія къ полотну шлюзныхъ воротъ, оказывается, что слѣдуетъ таковое дѣлать или изъ ригелей, поддержанныхъ одною стойкою, или изъ стоекъ, поддержанныхъ однимъ ригелемъ. Изъ двухъ, однако, этихъ конструкцій, вторая имѣетъ несомнѣнныя преимущества, въ силу выше приведенныхъ же соображенiй, такъ какъ то, что сказано относительно стоекъ и ригелей, можетъ быть примѣнено и къ брусьямъ рамы. Рама шлюзнаго створнаго полотна состоитъ: изъ нижняго рамнаго и вереяльнаго брусьевъ, опирающихся твердо, по всей ихъ длинѣ, на порогъ и стѣну, изъ створнаго бруса, прижатаго къ другому створному брусу, и изъ верхняго рамнаго бруса, свободнаго по всей длинѣ и опирающагося твердо лишь концами. Конечно, наибольшей деформацiи отъ приложенныхъ къ рамѣ силъ можетъ подвергаться верхнiй рамный брусъ, какъ совершенно свободный, почему, передавая ему нѣкоторую нагрузку, слѣдуетъ ее распредѣлить равномѣрно, для возможнаго уменьшенiя изгиба его, что послужитъ къ болѣе совершенному соприкасанiю створныхъ брусьевъ и къ болѣе правильной работѣ полотенъ. Итакъ, проектируя полотна изъ многихъ параллельныхъ элементовъ, поддержанныхъ однимъ перпендикулярнымъ къ нимъ, слѣдуетъ нагружать по возможности равномѣрно распредѣленною нагрузкою верхнiй рамный брусъ, а сосредоточенную прилагать къ створному брусу, какъ болѣе обезпеченному отъ прогиба,—что и приводитъ насъ къ типу полотенъ, состоящему изъ стоекъ, поддержанныхъ однимъ ригелемъ.

Замѣтимъ кстати, что изъ извѣстныхъ опытовъ Гиллемэна надъ шлюзными полотнами, состоящими изъ стоекъ съ однимъ ригелемъ или изъ стоекъ съ двумя ригелями, оказалось, что первыя выгоднѣе послѣднихъ.

Переходя затѣмъ къ разсмотрѣнiю указаннаго выше типа полотенъ съ однимъ ригелемъ, воспользуемся приведенными выше, въ § 1, указанiями Лавуана относительно незначительности влiянiя отпора со стороны нижняго бьефа на величины напряженiй въ элементахъ полотенъ и на нечувствительность этихъ измѣненiй—принимать ли горизонтъ воды верхняго бьефа совпадающимъ съ осью верхняго рамнаго бруса или нѣсколько ниже ея.

§ 17. Формулы моментовъ и упругихъ линiй въ свободно опирающихся стойкахъ.



Черт. 1.

Прежде всего выведемъ формулы момента и упругой линiи вертикальнаго бруса высотою H, подверженнаго напору воды высотою тоже H (черт. 1).

Вся нагрузка на брусъ, шириною въ единицу, равна $\frac{H^2}{2}\delta$, гдѣ δ вѣсъ куб. единицы воды; а сопротивленiе опоры

$$D = \frac{H^2}{2} \cdot \frac{1}{3}\,\delta = \frac{H^2}{6}\,\delta.$$

Моментъ силъ на высотѣ x отъ порога будетъ

$$M_1 = \frac{H^2}{6}\,\delta\,(H-x) - \frac{(H-x)^2}{2}\cdot\frac{(H-x)}{3}\,\delta =$$

$$= \frac{x}{6}(x^2 - 3Hx + 2H^2)\,\delta\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ (31)$$

Интегрируя два раза, получаемъ:

$$E_1I_1\frac{\partial^2 y}{dx^2} = \frac{\delta}{6}(x^3 - 3Hx^2 + 2H^2x)$$

$$E_1I_1\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\delta}{6}\left(\frac{x^4}{4} - Hx^3 + H^2x^2\right) + C$$

$$E_1I_1y = \frac{\delta}{6}\left(\frac{x^5}{20} - \frac{Hx^4}{4} + \frac{H^2x^3}{3}\right) + Cx + C_1.$$

При $x=0$, $y=0$, слѣдов. $C_1 = 0$ и при $x = H$, $y = 0$,

$$0 = \frac{\delta}{6}\left(\frac{H^5}{20} - \frac{H^5}{4} + \frac{H^5}{3}\right) + CH,$$

откуда

$$C = -\frac{\delta}{6}\cdot\frac{8}{60}H^4,$$

и

$$E_1I_1y = \frac{\delta}{6}\left(\frac{x^5}{20} - \frac{Hx^4}{4} + \frac{H^2x^3}{3} - \frac{8}{60}H^4x\right),$$

или принявъ знакъ ($-$)

$$E_1I_1y = \frac{x\delta}{360}(8H^4 - 20H^2x^2 + 15Hx^3 - 3x^4)\ .\ .\ .\ .\ (32)$$

Формулы (31) и (32) удобнѣе изобразить нѣсколько иначе; а именно: обозначивъ $\frac{x}{H} = \lambda$ и раздѣливъ (31) на H^3, а (32) на H^5, тогда

$$M_1 = \frac{H^3}{6}\,\delta\lambda\,(\lambda^2 - 3\lambda + 2) = \frac{H^3}{6}\,\delta\mathfrak{M}_1,$$

гдѣ

$$\mathfrak{M}_1 = \lambda\,(\lambda^2 - 3\lambda + 2) = \lambda\,(1-\lambda)\,(2-\lambda)\ .\ .\ .\ (33)$$

и

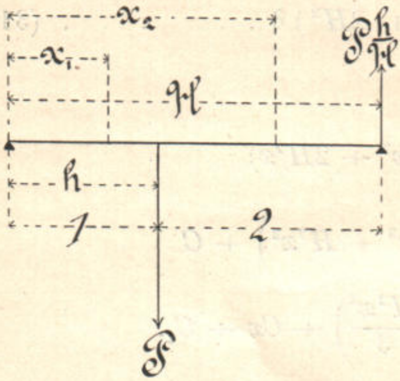
$$E_1I_1y = \frac{H^5}{6}\,\delta\cdot\frac{\lambda}{60}\left[8 - \lambda^2\,(3\lambda^2 - 15\lambda + 20)\right] = \frac{H^5}{6}\,\delta\,\gamma,\ .\ .\ (34)$$

гдѣ

$$\gamma = \frac{\lambda}{60}\left[8 - \lambda^2\,(3\lambda^2 - 15\lambda + 20)\right].$$

Для облегченія вычисленій моментовъ и прогибовъ бруса не трудно составить таблицу значеній $\mathfrak{M}_1$ и γ для разныхъ λ, отъ $\lambda = 0$ до $\lambda = 1$.

Подобнымъ образомъ могутъ быть изображены формулы моментовъ и упругой линіи бруса длиною H, подверженнаго сосредоточенной нагрузкѣ P (черт. 2):



Черт. 2.

$$M_{\mathrm{I}} = -P(h - x_1) + P\,\frac{h}{H}\,(H - x_1)$$

$$M_{\mathrm{I}} = Px_1\left(1 - \frac{h}{H}\right),$$

или обозначая

$$\frac{x_1}{H} = \lambda_1;\ \frac{h}{H} = \eta \ \text{ и } \ q\,.\,\frac{H^2}{2}\,\delta = P,$$

имѣемъ:

$$M_{\mathrm{I}} = \frac{H^3}{6}\,\delta\,.\,3q\lambda_1\,(1 - \eta)\ .\ .\ (35)$$

Далѣе:

$$M_{\mathrm{II}} = P\,\frac{h}{H}\,(H - x_2)$$

и

$$M_{\mathrm{II}} = \frac{H^3}{6}\,\delta\,.\,3q\eta\,(1 - \lambda_2)\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ (36)$$

При $x = h$, имѣемъ

$$M_h = \frac{H^3}{6}\,\delta\,.\,3\,q\eta\,(1 - \eta) = HP\eta\,(1 - \eta)\ .\ .\ .\ .\ (37)$$

Интегрируя M_{I} и M_{II}, находимъ для $x = h$:

$$E_1 I_1 y_h = P\,.\,\frac{H^3}{3}\,\eta^2\,(1 - \eta)^2 = P\,.\,\frac{H^3}{3}\,\sigma\ \ .\ .\ .\ .\ (38)$$

или

$$E_1 I_1 y_h = \frac{H^5}{6}\,\delta q\eta^2\,(1 - \eta)^2 = \frac{H^5}{6}\,\delta q\sigma,$$

гдѣ

$$\sigma = \eta^2\,(1 - \eta)^2.$$

Изъ формулъ (34) и (38) находимъ, что величина прогиба бруска въ точкѣ λ, подверженнаго дѣйствію напора, равна:

$$u_h = \frac{1}{E_1 I_1}\cdot\frac{H^3}{3}\,\gamma\left(\frac{H^2}{2}\,\delta\right),$$

а прогибъ такого же бруска отъ груза P, подвѣшеннаго въ той же точкѣ λ, равенъ

$$u_1 = \frac{1}{E_1 I_1}\cdot\frac{H^3}{3}\,\sigma P,$$

откуда слѣдуетъ, что для того чтобы прогибъ u_4 былъ такой же, какъ и u_1, должно быть:

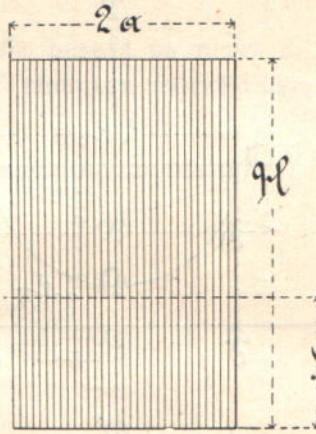
$$P = \frac{\gamma}{\sigma} \cdot \frac{H^2}{2} \delta = q \cdot \frac{H^2}{2} \delta, \text{ гдѣ } q = \frac{\gamma}{\sigma} = P \frac{2}{H^2} \cdot \frac{1}{\delta} \text{ при } \lambda = \eta \quad . \quad . \quad . \quad (39)$$

§ 18. Полотно, состоящее изъ стоекъ, опирающихся концами на рамѣ и поддержанныхъ однимъ ригелемъ.—Нагрузка ригеля.

Пусть $2m$ вертикальныхъ брусковъ, высотою H и шириною b, расположенныхъ другъ подлѣ друга рядомъ, опирающихся концами на неподвижныя опоры и составляющихъ въ общемъ ширину $2mb = 2a$, подвержены дѣйствію $2m$ горизонтальныхъ силъ $bP = \frac{a}{m} P$ или, на единицу длины ригеля, дѣйствію силъ

$$P = \frac{\gamma}{\sigma} \cdot \frac{H^2}{2} \delta = q \cdot \frac{H^2}{2} \delta,$$

приложенныхъ на высотѣ λ; причемъ нагрузка на всѣ бруски равна $2aP$, и величина прогиба ихъ въ точкахъ λ такая же, какъ и отъ дѣйствія напора воды, высотою H.



Черт. 3.

Представимъ себѣ, что всѣ эти $2m$ брусковъ съ силами $\frac{a}{m} P = \frac{a}{m} \cdot \frac{\gamma}{\sigma} \cdot \frac{H^2}{2} \cdot \delta$ заключены въ солидную раму шириною $2a$ и высотою H (черт. 3), и что черезъ направленія силъ $\frac{a}{m}$ P проходитъ плоскость координатъ; тогда плоскость эта пересѣчетъ бруски какъ разъ въ точкахъ приложенія силъ, и силы P (считаемыя на единицу ширины рамы) изобразятся на ней линіями $AF, \ldots, CG$ (черт. 4) такъ, что прямоугольникомъ $ACGF$ изобразится грузовая площадь, дѣйствующая на всѣ бруски и равная $2aP$. Нижнюю сторону этого прямоугольника FG примемъ за ось абсциссъ, а срединную линію за ось ординатъ; линіею KL пусть отсѣкаются величины прогибовъ брусковъ, отъ дѣйствія на нихъ грузовъ $\frac{a}{m} P$, или считая на единицу длины ригеля — грузовъ P, равные

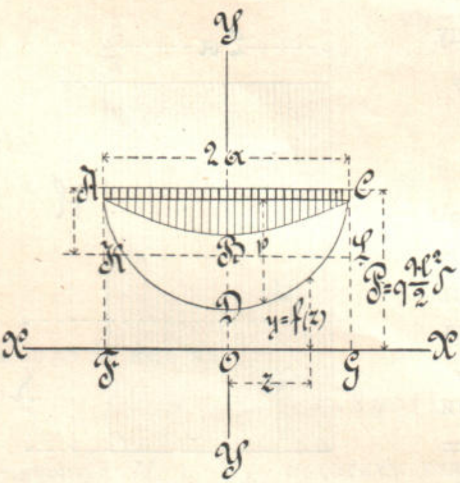
$$u_1 = \frac{1}{E_1 I_1} \cdot \frac{H^3}{3} \sigma P = \frac{1}{E_1 I_1} q \cdot \frac{H^5}{6} \cdot \delta,$$

линія эта, параллельная оси x, отстоитъ отъ нея на $P - u_1$.

Если въ той же плоскости координатъ подведемъ подъ всѣ бруски поперечный брусокъ (горизонтальный), опирающійся концами на боковыхъ граняхъ рамы въ точкахъ A и C (черт. 4), то изгибъ системы въ плоскости координатъ приметъ видъ нѣкоторой кривой ABC, и прогибъ брусковъ выразится:

$$u = \frac{1}{E_1 I_1} \cdot \frac{H^3}{3} \sigma p, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (40)$$

гдѣ p перемѣнная нагрузка, отсѣкаемая отъ грузовой площади нѣкоторою кривою ADC, такъ что нагрузка, изображенная площадью прямоугольника $ACGF$, раздѣлится этою кривою ADC на двѣ части: одну—площадь ADC, дѣйствующую на $2m$ брусковъ вертикальныхъ и другую—площадь $AFGCD$, дѣйствующую на горизонтальный брусокъ—ригель.



Черт. 4.

Кривая ADC должна непремѣнно проходить черезъ точки опоры горизонтальнаго бруска, т. е. черезъ A и C, такъ какъ находящіеся у этихъ точекъ вертикальные бруски, поддержанные горизонтальнымъ, не изогнутся вовсе, т. е. $u = 0$, а слѣдовательно и нагрузка ихъ p (см. формулу 40), производящая изгибъ, должна быть равна нулю; затѣмъ кривая ADC должна быть симметрична. Пусть уравненіе ея $y = f(z)$, тогда величина $P - y = p$ изобразитъ перемѣнную нагрузку на вертикальный брусокъ шириною въ единицу или $\frac{a}{m}(P - y) = \frac{a}{m} \cdot p$ — перемѣнную нагрузку на брусокъ ширины $\frac{a}{m} = b$.

Въ такихъ условіяхъ нагрузки и изгиба находится полотно шлюзныхъ воротъ, состоящее изъ $2m$ стоекъ, момента инерціи I_1 и одного ригеля момента инерціи I_0 и подверженныхъ дѣйствію напора воды высотою H.

Принявъ указанную выше систему координатъ, нагрузка (сплошная) на ригель выразится суммою ординатъ кривой $y = f(z)$, или площадью $2\int y dz$, а на каждую стойку будетъ $(P - f(z)) \frac{a}{m}$, изгибъ же стоекъ, пропорціональный нагрузкѣ, будетъ, какъ и выше:

$$u = \frac{1}{E_1 I_1} \cdot \frac{H^3}{3} \sigma \frac{a}{m} [P - f(z)]. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (41)$$

Разсчетъ такого полотна сводится къ отысканію уравненія кривой ADC, — $y = f(z)$, удовлетворяющаго даннымъ условіямъ изгиба.

§ 19. Уравненіе кривой раздѣла нагрузки на ригель и стойки въ полотнѣ § 18.

Выведемъ выраженіе момента силъ $y = f(z)$, дѣйствующихъ на ригель:

$$M_0 = (a - z) \int_0^a f(z)\,dz - \int_z^a zf(z)\,dz + z \int_z^a f(z)\,dz,$$

или

$$M_0 = a \int_0^a f(z)\,dz - z \int_0^z f(z)\,dz - \int_z^a zf(z)\,dz = - E_0 I_0 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2},$$

гдѣ w есть дѣйствительная величина прогиба ригеля въ точкѣ z. Такъ какъ во всѣхъ точкахъ соприкасанія ригеля со стойками прогибы ригеля w равны прогибамъ стоекъ u, то

$$\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}.$$

Изъ выраженія (41) имѣемъ:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = - \frac{1}{E_1 I_1} \cdot \frac{H^3}{3} \sigma \frac{a}{m} f''(z),$$

слѣдовательно,

$$M_0 = - a \int f(o) - z \int f(z)\,dz + z \int f(o) + \int zf(z)\,dz =$$

$$= \frac{a}{m} \frac{H^3}{3} \sigma \frac{E_0 I_0}{E_1 I_1} f''(z). \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (42)$$

Продифференцируемъ это выраженіе два раза:

$$\frac{\partial M_0}{\partial z} = - \int f(z)\,dz + \int f(o) = \frac{a}{m} \frac{H^3}{3} \sigma \frac{E_0 I_0}{E_1 I_1} f'''(z).$$

При $z = 0$, $\frac{\partial M_0}{\partial z} = 0$ и слѣдов. $f'''(0) = 0$

$$\frac{\partial^2 M_0}{\partial z^2} = - f(z) = \frac{a}{m} \frac{H^3}{3} \sigma \frac{E_0 I_0}{E_1 I_1} f^{\mathrm{IV}}(z)$$

или

$$f^{\mathrm{IV}}(z) = \frac{m}{a} \frac{3}{H^3} \frac{1}{\sigma} \frac{E_1 I_1}{E_0 I_0} f(z) = - \mu f(z), \quad . \quad . \quad . \quad (43)$$

гдѣ
$$\mu = \frac{m}{a}\,\frac{3}{H^3}\,\frac{1}{\sigma}\,\frac{E_1 I_1}{E_0 I_0} = \frac{m}{a}\,\frac{3}{H^3}\,\frac{q}{\gamma}\,\frac{E_1 I_1}{E_0 I_0},$$

и (см. 39)
$$q = \frac{P}{\frac{H^2}{2}\,\delta} = \frac{\gamma}{\sigma}.$$

Итакъ, мы пришли къ дифференціальному уравненію вида $r^4 + \mu = 0$, въ общій интегралъ котораго входятъ, какъ извѣстно, корни этого уравненія и постоянные коэффиціенты. Корни уравненія $r^4 + \mu = 0$ имѣютъ видъ:

$$r\left(\cos\frac{2k+1}{4}\pi + i\sin\frac{2k+1}{4}\pi\right),$$

что, при $k = 0,\ 1,\ 2$ и 3, даетъ значенія:

$$\frac{\sqrt[4]{\mu}}{\sqrt{2}}(1+i) = n(1+i)$$

$$\frac{\sqrt[4]{\mu}}{\sqrt{2}}(1-i) = n(1-i)$$

$$\frac{\sqrt[4]{\mu}}{\sqrt{2}}(-1+i) = -n(1-i)$$

$$\frac{\sqrt[4]{\mu}}{\sqrt{2}}(-1-i) = -n(1+i),$$

гдѣ
$$n = \frac{\sqrt[4]{\mu}}{\sqrt{2}} = \sqrt[4]{\frac{3}{4}\,\frac{1}{H^3}\,\frac{m}{a}\,\frac{1}{\sigma}\,\frac{E_1 I_1}{E_0 I_0}}.$$

Тогда искомый общій интегралъ будетъ имѣтъ видъ:

$$y = C_1 e^{zn(1+i)} + C_2 e^{zn(1-i)} + C_3 e^{-zn(1-i)} + C_4 e^{-zn(1+i)} \quad . \ . \ . \ (44)$$

По причинѣ симметріи кривой $y = f(z)$, уравненіе (44) должно быть удовлетворено при $z = -z$, почему получаемъ $C_1 = C_4$ и $C_2 = C_3$ и вмѣсто (44) имѣемъ

$$y = C_1\left[e^{zn(1+i)} + e^{-zn(1+i)}\right] + C_2\left[e^{zn(1-i)} + e^{-zn(1-i)}\right] \quad . \ . \ . \ (45)$$

Для опредѣленія коэффиціентовъ C_1 и C_2 продифференцируемъ (45) два раза:

$$y' = C_1 n(1+i)\left[e^{zn(1+i)} - e^{-zn(1+i)}\right] + C_2 n(1-i)\left[e^{zn(1-i)} - e^{-zn(1-i)}\right]$$

$$y'' = C_1 \cdot 2in\left[e^{zn(1+i)} + e^{-zn(1+i)}\right] - C_2 \cdot 2in\left[e^{zn(1-i)} + e^{-zn(1-i)}\right].$$

Подставивъ въ (42) $z = a$, получаемъ $M_0 = 0$ и $f''(a) = y'' = 0$, слѣдовательно:

$$0 = C_1 \cdot 2in \left[e^{an(1+i)} + e^{-an(1+i)}\right] - C_2 \cdot 2in \left[e^{an(1-i)} + e^{-an(1-i)}\right].$$

Далѣе, какъ, по заданію, при $z = a$, $y = f(a) = P$, то

$$y = P = C_1 \left[e^{an(1+i)} + e^{-an(1+i)}\right] + C_2 \left[e^{an(1-i)} + e^{-an(1-i)}\right],$$

откуда находимъ:

$$C_1 = \frac{P}{2} \cdot \frac{1}{e^{an(1+i)} + e^{-an(1+i)}},$$

$$C_2 = \frac{P}{2} \cdot \frac{1}{e^{an(1-i)} + e^{-an(1-i)}},$$

$$y = \frac{P}{2} \left(\frac{e^{zn(1+i)} + e^{-zn(1+i)}}{e^{an(1+i)} + e^{-an(1+i)}} + \frac{e^{zn(1-i)} + e^{-zn(1-i)}}{e^{an(1-i)} + e^{-an(1-i)}}\right).$$

Приводя къ одному знаменателю и замѣчая, что

$$e^{iz} = \cos z + i \sin z$$

и

$$e^{-iz} = \cos z - i \sin z,$$

находимъ окончательно искомое уравненіе кривой ADC:

$$y = P\Big(\cos n(a+z)\left[e^{n(a-z)} + e^{-n(a-z)}\right] +$$

$$+ \cos n(a-z)\left[e^{n(a+z)} + e^{-n(a+z)}\right]\Big) : 2\cos 2an + e^{2an} + e^{-2an}. \quad . \quad . \quad (46)$$

При $z = 0$

$$y = P\frac{2\cos an\,(e^{an} + e^{-an})}{2\cos 2an + e^{2an} + e^{-2an}} = P\omega = q \cdot \frac{H^2}{2} \cdot \delta \cdot \omega, \quad . \quad . \quad . \quad (47)$$

гдѣ

$$\omega = \frac{2\cos an\,(e^{an} + e^{-an})}{2\cos 2an + e^{2an} + e^{-2an}},$$

а при $z = a$, получаемъ $\omega = 1$ и $y = P$.

По найденному уравненію (46) можемъ построить по точкамъ кривую ADC (черт. 4), раздѣляющую данную грузовую площадь $ACGF$ на 2 части: одну, дѣйствующую на ригель, а другую—на стойки. Для удобства вычисленій ординатъ кривой ADC слѣдуетъ положить $\frac{z}{a} = k$, тогда:

$$y = q \cdot \frac{H^2}{2}\,\delta\Big[\cos an(1+k)\left(e^{an(1-k)} + e^{-an(1-k)}\right) +$$

$$+ \cos an(1-k)\left(e^{an(1+k)} + e^{-an(1+k)}\right)\Big]:$$

$$: 2\cos 2\,an + e^{2an} + e^{-2an}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (48)$$

Полагая послѣдовательно $k=0$; $k=0{,}1$; $k=0{,}2$; $k=\dots.\ 1$ и подставляя значенія $e=$ (основаніе Неперовыхъ логариѳмовъ) $=2{,}7182818$, можемъ, по заданнымъ величинамъ, обозначая $\frac{a}{H}=c$,

$$an=\sqrt[4]{\frac{3}{4}\,\frac{a^4}{H^3}\,\frac{m}{a}\,\frac{1}{\sigma}\,\frac{E_1I_1}{E_0I_0}}=\sqrt[4]{\frac{3}{4}\cdot c^3m\,\frac{q}{\gamma}\cdot\frac{E_1I_1}{E_0I_0}}$$

вычислить ординаты кривой, при чемъ, для перехода отъ чиселъ къ градусамъ, слѣдуетъ число an множить на $57^\circ{,}29578$, т. е. на величину радіуса круга въ градусахъ.

Если бруски шириною въ единицу и число ихъ не $2m$, а $2a$, то

$$an=\sqrt[4]{\frac{3}{4}\cdot c^3a\,\frac{q}{\gamma}\cdot\frac{E_1I_1}{E_0I_0}}\,.$$

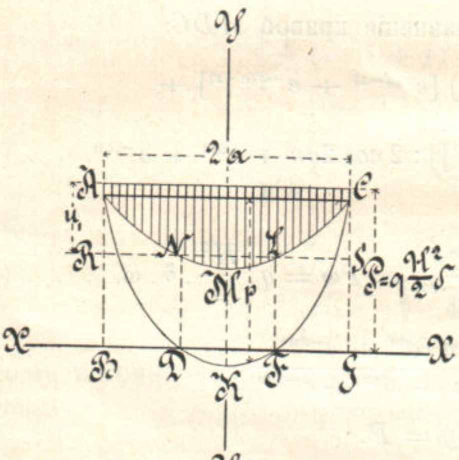
§ 20. Слабый ригель въ полотнахъ § 18 увеличиваетъ напряженіе стоекъ.

При построеніи кривой по формулѣ (48) видимъ, что, при $k=1$,

$$y=q\,\frac{H^2}{2}\,\delta=P,$$

а, при $k=$ меньшихъ 1, y уменьшается и, при $k=0$,

$$y=q\,\frac{H^2}{2}\,\delta\omega=P\omega$$



Черт. 5.

Можетъ случиться, что, при нѣкоторомъ значеніи k, $y=f(z)$ обратится въ нуль, и тогда, при значеніяхъ k еще меньшихъ, y будетъ получать значенія отрицательныя, т. е. кривая, ограничивающая грузовую площадь реберъ $ADKFC$, будетъ имѣть въ нѣкоторыхъ точкахъ p большія, чѣмъ данная нагрузка P (чер. 5), и изгибъ системы $ANMLC$ въ части NML большій, чѣмъ изгибъ однихъ реберъ (до линіи RS), безъ ригеля. Такой случай можетъ быть лишь тогда, когда данное

$$an=\sqrt[4]{\frac{3}{4}\,c^3\,\frac{m}{\sigma}\,\frac{E_1I_1}{E_0I_0}}$$

слишкомъ велико и именно когда оно больше 1,5708 такъ какъ $1{,}5708 . 57^\circ{,}29578 = 90^\circ$; и, такъ какъ величина an для всякаго даннаго случая зависитъ главное отъ $E_1 I_1$ и $E_0 I_0$, то—когда $E_c I_0$ слишкомъ мало въ сравненіи съ $E_1 I_1$, т. е. когда ригель слишкомъ слабъ въ сравненіи со стойками: причемъ, если стойки не скрѣплены съ ригелемъ, то, очевидно, ригель изогнется по кривой $ANMLC$, а стойки въ части NL, не касаясь ригеля, изогнутся лишь до прямой NL; — если же стойки скрѣплены съ ригелемъ, то въ части DKF къ данной, изгибающей стойки, нагрузкѣ P прибавится еще вытягивающее усиліе, появляющееся отъ изгиба перегруженнаго близъ концовъ ригеля, и вся система изогнется по $ANMLC$. Это указываетъ насколько важно правильное соотношеніе между размѣрами стоекъ и ригеля.

§ 21. Опредѣленіе наибольшихъ моментовъ въ ригелѣ и въ стойкахъ полотна § 18.

Перейдемъ теперь къ опредѣленію моментовъ силъ. Мы вывели, что $2a$ силъ P, дѣйствующихъ на высотѣ λ на полотно, состоящее изъ $2m$ стоекъ, поддержанныхъ однимъ ригелемъ на высотѣ λ отъ порога, или грузовая площадь $2aP$ раздѣляется кривою $y = f(z)$, опредѣленною уравненіемъ (46), на двѣ части, изъ которыхъ часть $ADCGF$ (черт. 4) дѣйствуетъ на одинъ лишь ригель. Моментъ силъ, изображенныхъ этою площадью, какъ выведено въ уравненіи (42), равенъ

$$M_0 = \frac{H^3}{3}\,\sigma\,\frac{a}{m}\,\frac{E_0 I_0}{E_1 I_1} \cdot f''(z) = \frac{1}{\mu} \cdot f''(z) = \frac{1}{4n^4} \cdot f''(z).$$

Дифференцируя 2 раза выраженіе (46), получаемъ

$$M_0 = \frac{P}{2n^2}\Big[\sin n\,(a + z)\,[e^{n(a-z)} - e^{-n(a-z)}] +$$

$$+ \sin n\,(a - z)\,[e^{n(a+z)} - e^{-n(a+z)}]\Big]:$$

$$: 2\cos 2\,an + e^{2an} + e^{-2an} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (49)$$

и при $z = 0$

$$max.\ M_0 = \frac{P}{n^2}\,\frac{\sin an\,(e^{an} - e^{-an})}{2\cos 2\,an + e^{2an} + e^{-2an}} =$$

$$= a^2 \cdot \frac{H^2}{2}\,\delta\mathfrak{M}_0, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (50)$$

гдѣ, вводя обозначеніе (39)

$$\mathfrak{M}_0 = \frac{1}{a^2 n^2} \cdot \frac{\sin an\,(e^{an} - e^{-an})}{2\cos an + e^{2an} - e^{-2an}} \cdot q$$

Величину грузовой площади, дающей этотъ моментъ, выводимъ тоже изъ уравненія (46), а именно:

$$\text{площ. } ADCGF = \frac{P}{n} \cdot \frac{2\sin 2an + e^{2an} - e^{-2an}}{2\cos 2an + e^{2an} + e^{-2an}}.$$

Разсчетъ момента силъ дѣйствующихъ на ригель не представилъ никакихъ трудностой, ни сомнѣній, такъ какъ изгибъ и моментъ исчислены по одной и той же площади, величина которой опредѣлена приведенною формулою. Разсчетъ же моментовъ въ стойкахъ можетъ быть сдѣланъ на основаніи того положенія, что усилія, а слѣд. и напряженія въ ригелѣ и стойкахъ распредѣляются такъ, что стрѣлы прогибовъ въ точкахъ ихъ соприкасанія одинаковы.

Прогибъ стойки шириною b_1 отъ дѣйствія на нее напора воды выражается формулою (34)

$$u_1 = \frac{1}{E_1 I_1}\, b_1\, \frac{H^5}{6} \cdot \delta \,.\, \gamma,$$

или подставляя $P = \frac{\gamma}{\sigma} \cdot \frac{H^2}{2} \cdot \delta,$

$$u_1 = \frac{1}{E_1 I_1}\, b_1 \,.\, P \,.\, \frac{H^3}{3} \cdot \sigma.$$

Сосредоточенный грузъ — дѣйствіе ригеля даетъ стойкѣ другой прогибъ (въ обратную сторону), а именно (41)

$$u_2 = \frac{1}{E_1 I_1} \cdot \frac{H^3}{3} \cdot \sigma \,.\, b_1\,[P - f(z)],$$

откуда

$$u_1 - u_2 = \frac{1}{E_1 I_1} \cdot \frac{H^3}{3} \cdot b_1 \,.\, \sigma \,.\, f(z)$$

— величина прогиба, являющагося вслѣдствіе присутствія ригеля, слѣд. стойку можемъ разсматривать какъ брусъ нагруженный напоромъ воды и горизонтальною силою $b_1\, f(z)$, приложенною на разстояніи $\eta = \frac{h}{H}$ отъ порога и направленною въ сторону обратную напору.

Моментъ силъ въ точкѣ $\eta = \frac{h}{H}$ стойки, являющійся отъ напора воды H, равенъ какъ выведено (33)

$$M' = b_1\, \frac{H^3}{6} \cdot \delta \,.\, \mathfrak{M}_1 = b_1\, \frac{H^3}{6}\, \delta \,.\, \eta \,.\, (1 - \eta)\,(2 - \eta),$$

а отъ груза $b_1 f(z)$, приложеннаго въ той же точкѣ η (37)

$$M'' = b_1 H f(z) . \eta (1 - \eta),$$

слѣд. моментъ въ стойкѣ подпертой ригелемъ въ точкѣ η выразится

$$M_1 = M' - M'' = b_1 \eta (1 - \eta) \left[\frac{H^3}{6} \cdot \delta . (2 - \eta) - H f(z) \right]$$

Въ срединной стойкѣ, по формулѣ (47)

$$f(z) = y = \frac{\gamma}{\sigma} \cdot \frac{H^2}{2} \cdot \delta . \omega,$$

слѣдовательно

$$M_1 = b_1 . \eta (1 - \eta) \cdot \frac{H^3}{6} \cdot \delta \left[2 - \eta - 3 \frac{\gamma}{\sigma} \cdot \omega \right]$$

или по (33)

$$M_1 = b_1 \cdot \frac{H^3}{6} \cdot \delta \left[\mathfrak{M}_1 - 3 \cdot \frac{\gamma}{\sigma} \cdot \omega . \eta (1 - \eta) \right]$$

Обозначая $\frac{\gamma}{\sigma} \cdot \omega = q . \omega = \Omega$, моментъ силъ въ стойкѣ въ мѣстѣ встрѣчи съ ригелемъ, будетъ

$$M_1 = \frac{a}{m} \cdot \frac{H^3}{6} \cdot \delta \left[\mathfrak{M}_1 - 3\Omega . \eta (1 - \eta) \right] \quad . \quad . \quad . \quad (51)$$

Величины моментовъ въ крайнихъ стойкахъ будутъ отрицательныя, при $\omega = 1$

$$M'_1 = \frac{a}{m} \cdot \frac{H^3}{6} \cdot \delta \left[\mathfrak{M}_1 - 3q\eta (1 - \eta) \right] =$$

$$= \frac{a}{m} \cdot \frac{H^3}{6} \cdot \delta . \eta (1 - \eta) \left[2 - (3q + \eta) \right] \quad . \quad . \quad . \quad (51\text{-a})$$

Выведенный моментъ силъ (51) не наибольшій, дѣйствующій на стойку; наибольшихъ положительныхъ моментовъ въ стойкѣ, поддержанной однимъ ригелемъ будетъ два—между концами ея и мѣстомъ пересѣченія съ ригелемъ. Такъ какъ размѣры стойки должны быть разсчитаны по наибольшему моменту, то, конечно, всего выгоднѣе будетъ, когда оба наибольшіе положительные момента будутъ одинаковы. Выведемъ формулы этихъ наибольшихъ моментовъ и условія ихъ равенства.

Формулою (51) опредѣляется моментъ бруса, подверженнаго дѣйствію напора и противодѣйствію сосредоточеннаго груза въ точкѣ приложенія послѣдняго $\lambda = \frac{x}{H}$ (черт. 6); если же грузъ или сила $b_1 f(z)$ приложена въ точкѣ h или $\frac{h}{H} = \eta$, то выраженія моментовъ въ разныхъ точкахъ бруса, внѣ точки η, будутъ, подставляя вмѣсто b_1 равное ему $\frac{a}{m}$

$$M'_1 = \frac{a}{m} \frac{H^3}{6} \delta \left[\mathfrak{M}'_1 - 3\Omega\lambda_1 (1 - \eta) \right] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (52)$$

$$M''_1 = \frac{a}{m} \frac{H^3}{6} \delta (\mathfrak{M}''_1 - 3\Omega\eta + 3\Omega\lambda_2\eta), \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (53)$$

гдѣ

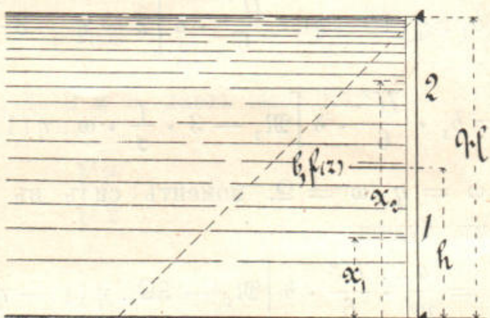
$$\mathfrak{M}'_1 = \lambda^3_1 - 3\lambda^2_1 + 2\lambda_1$$

и

$$\mathfrak{M}''_1 = \lambda^3_2 - 3\lambda^2_2 + 2\lambda_2$$

Max. M'_1, и max. M''_1, опредѣляются изъ

$$\left.\begin{array}{r} 3\lambda^2_1 - 6\lambda_1 + 2 - 3\Omega + 3\Omega\eta = 0 \\ 3\lambda^2_2 - 6\lambda_2 + 2 + 3\Omega\eta = 0 \end{array}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (54)$$



Черт. 6.

Вставляя (54) въ (52) и въ (53), находимъ:

$$\left.\begin{array}{l} max.\ M'_1 = \dfrac{a}{m}\dfrac{H^3}{6}\,\delta\,(-2\lambda^3_1 + 3\lambda^2_1) \\ max.\ M''_1 = \dfrac{a}{m}\dfrac{H^3}{6}\,\delta\,(-2\lambda^3_2 + 3\lambda^2_2 - 3\Omega\eta) = \\ \qquad\qquad = \dfrac{a}{m}\dfrac{H^3}{6}\,\delta\,.\,2\,(1-\lambda_2)^3. \end{array}\right\} \quad . \quad . \quad (55)$$

причемъ изъ (54) имѣемъ

$$\lambda_1 = 1 - \sqrt{\frac{1}{3} + \Omega - \Omega\eta}$$

$$\lambda_2 = 1 - \sqrt{\frac{1}{3} - \Omega\eta}.$$

Подставивъ значенія λ_1 и λ_2 въ M'_1 и M''_1 и приравнявъ послѣднія, получимъ условіе, что для равенства M'_1 и M''_1 должно быть:

$$\left(\frac{1}{3} + \Omega - \Omega\eta\right)^{\frac{3}{2}} + \left(\frac{1}{3} - \Omega\eta\right)^{\frac{3}{2}} = \frac{3}{2}\,\Omega\,(1-\eta).$$

Для практической цѣли удобнѣе приравнять выраженія (55) $M_1 = M''_1$, то есть

$$2(1-\lambda_2)^3 = 3\lambda^2_1 - 2\lambda^3_1,$$

откуда

$$1-\lambda_2 = \sqrt[3]{\frac{3}{2}\lambda^2_1 - \lambda^3_1}$$

и, вычисливъ λ_2 по разнымъ заданнымъ величинамъ λ_1, напримѣръ черезъ каждую 0,01, составить таблицу, помѣстивъ въ ней соотвѣтствующія величины $\Omega\eta$, Ω, η и $\mathfrak{M}_h$, которыя нетрудно найти изъ (54) по слѣдующимъ формуламъ:

$$\Omega\eta = \frac{1}{3} - (1-\lambda_2)^2;\ \Omega = \Omega\eta + \lambda^2_1 - 2\lambda_1 + \frac{2}{3};$$

$$\eta = \frac{\Omega\eta}{\Omega};\ \mathfrak{M}_h = 2\left(\frac{3}{2}\lambda^2_1 - \lambda^3_1\right);$$

наконецъ, вычисливъ по (47) ω для разныхъ an, внести въ ту же таблицу тѣ

$$\omega = \frac{2\cos an\,(e^{an} + e^{-an})}{2\cos 2an + e^{2an} + e^{-2an}},$$

которыя равны

$$\frac{\Omega}{q} = \frac{\sigma}{\gamma}\Omega$$

изъ принятаго выше (51) обозначенія

$$\Omega = \frac{\gamma}{\sigma}\omega,$$

гдѣ γ и σ соотвѣтствуютъ точкѣ приложенія силы или положенію ригеля η. Такая таблица даетъ полную картину зависимостей между всѣми элементами, необходимыми для наивыгоднѣйшаго разсчета стоекъ, сообразно положенію ригеля. Итакъ, сдѣлавъ указанныя вычисленія, легко убѣдиться, что, при измѣненіи ω отъ 1 до 0 (а ω внѣ этихъ предѣловъ не имѣетъ практическихъ значеній), величина η или положеніе ригеля, измѣняется отъ 0,380 H до 0,421 H, т. е., для наивыгоднѣйшаго рѣшенія задачи, ригель можетъ быть помѣщаемъ лишь въ этихъ предѣлахъ.

§ 22. Разсчетъ размѣровъ ригеля и стоекъ полотенъ § 18. Замѣтка о деревянныхъ полотнахъ.

Зная наибольшій моментъ силъ въ ригелѣ и наибольшіе равные моменты въ срединномъ ребрѣ, нетрудно вычислить соотвѣтственные размѣры ригеля и реберъ, исходя изъ величины

$$\omega = \frac{2\cos an\,(e^{an} + e^{-an})}{2\cos 2an + e^{2an} + e^{-2an}},$$

гдѣ

$$an = \sqrt[4]{\frac{3}{4}\frac{m}{\sigma}\frac{a^3}{H^3}\frac{E_1 I_1}{E_0 I_0}}.$$

Видъ однако этихъ формулъ таковъ, что какими-либо простыми дѣйствіями нелегко по однѣмъ даннымъ величинамъ отыскать другія, поэтому всего проще составить таблицу и по ней подбирать соотвѣтственныя числа. Ниже приведена таблица № 7, составленная по величинамъ η, отъ $\eta = 0{,}390$ до $\eta = 0{,}420$, черезъ каждыя 0,005 и соотвѣтственно этимъ η вычислены, по выше приведеннымъ формуламъ, величины

$$\Omega,\ \omega,\ (an)^4,\ m\,\frac{a^3}{H^3}\frac{E_1 I_1}{E_0 I_0} = B,\ q = \frac{\gamma}{\sigma},$$

$$\mathfrak{M}_h = 2\left(\frac{3}{2}\lambda_1{}^2 - \lambda_1{}^3\right),$$

наконецъ $\mathfrak{M}_0$ по уравненію (50), при $\lambda = \eta$. Кромѣ этого прибавлена еще графа величннъ $\frac{1}{3}\frac{1}{B}\frac{\mathfrak{M}_h}{\mathfrak{M}_0}$ по нижеслѣдующему соображенію.

Вычисленные по формуламъ B, $\mathfrak{M}_h$ и $\mathfrak{M}_0$, моменты инерціи стоекъ и ригеля обезпечиваютъ правильность изгиба и распредѣляютъ извѣстнымъ образомъ усилія, оставляя въ сторонѣ вопросъ о наивыгоднѣйшихъ напряженіяхъ матеріала, т. е. о равенствѣ наибольшихъ напряженій въ ригелѣ и стойкахъ. Для того, чтобы обезпечить и равенство напряженій, надо, при извѣстныхъ I_0 и I_1 придать брусьямъ опредѣленные линейные размѣры въ плоскости изгиба.

Какъ выше выведено (55):

$$\left.\begin{aligned} &max.\ M_h = \frac{a}{m}\frac{H^3}{6}\,\delta\,.\,2\left(\frac{3}{2}\lambda_1{}^2 - \lambda_1{}^3\right) = \frac{a}{m}\frac{H^3}{6}\,\delta\,.\,\mathfrak{M}_h = R_1\frac{I_1}{z_1} \\ &\text{и (50) при } \lambda = \eta \\ &\qquad max.\ M_0 = a^2\frac{H^3}{2}\,\delta\,.\,\mathfrak{M}_0 = \rho R_0\frac{I_0}{z_0}\ ^{*)} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . (56)$$

гдѣ ρ коэффиціентъ, какъ въ форм. (5), замѣняющій формулу на продольное сжатіе; величину ρ можемъ опредѣлять по форм. (17) или другимъ изъ нея выведеннымъ, какъ напр. форм. (22).

Раздѣляя M_h на M_0 получаемъ:

$$\frac{1}{m}\frac{H}{3a}\frac{\mathfrak{M}_h}{\mathfrak{M}_0} = \frac{R_1 I_1}{\rho R_0 I_0}\frac{z_0}{z_1}.$$

---

*) Формулы max. M_h и max. M_0 совершенно тождественны съ (5) и (6) если положить $N = 2$, $q_{\prime} = 4\mathfrak{M}_0$ и $q_{\prime\prime} = \frac{1}{12}\mathfrak{M}_h$.

Подставляя сюда получаемое изъ графы 5-й таблицы:

$$\frac{I_1}{I_0} = \frac{B}{mc^3} \cdot \frac{E_0}{E_1}$$

гдѣ $c = \frac{a}{H}$, имѣемъ:

$$\frac{z_0}{z_1} = \rho \frac{1}{3B} \frac{\mathfrak{M}_h}{\mathfrak{M}_0} c^2 \frac{R_0}{R_1} \frac{E_1}{E_0}$$

или обозначая

$$\frac{1}{3B} \frac{\mathfrak{M}_h}{\mathfrak{M}_0} = \varphi$$

получаемъ

$$\frac{z_0}{z_1} = \rho\varphi c^2 \frac{R_0}{R_1} \cdot \frac{E_1}{E_0} = \alpha \quad . \quad , \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad (57)$$

(R_0 и E_0 — для ригеля, а R_1 и E_1 для стоекъ). Значенія этихъ φ и даемъ въ графѣ 9-й таблицы № 7.

Формула (57) совершенно тождественна съ форм. (7-а).

Для проектированія полотенъ по предложеннымъ формуламъ и таблицъ, слѣдуетъ, по заданной высотѣ и ширинѣ ихъ, вычислить помощью графы 5-й отношенія $\frac{I_1}{I_0}$ *и по графѣ 9-й отношенія* $\frac{z_0}{z_1}$, какія могутъ быть приняты при разныхъ η; и тогда, задаваясь нѣкоторой толщиной полотенъ, примѣрно въ $\frac{1}{8}$ до $\frac{1}{15}$ ширины ихъ, нетрудно опредѣлить размѣры стоекъ и ригеля для табличныхъ η и отсюда, помощью сравненія, опредѣлить наивыгоднѣйшее отношеніе элементовъ полотенъ.

Приведенный разсчетъ и таблица могутъ очевидно служить не только для исчисленія двустворчатыхъ и одностворчатыхъ шлюзныхъ полотенъ, а также подможныхъ брусьевъ въ плотинахъ, но, съ гораздо большею еще точностью, и для стѣнокъ, опирающихся на дѣйствительно неподвижныя опоры. Впрочемъ рамы шлюзныхъ полотенъ могутъ быть, безъ большой погрѣшности, приняты за неподвижныя опоры, въ особенности въ одностворчатыхъ полотнахъ, такъ какъ всѣмъ рамнымъ брусьямъ могутъ быть даны какіе угодно размѣры, и притомъ моментъ инерціи верхняго рамнаго бруса можетъ быть увеличенъ соотвѣтственнымъ устройствомъ служебнаго мостика.

При постройкѣ деревянныхъ полотенъ приведеннаго типа, т. е. съ однимъ ригелемъ, могутъ встрѣтиться затрудненія вслѣдствіе того, что по разсчету могутъ потребоваться слишкомъ крупные размѣры лѣса. Конечно, относительно стоекъ никакихъ трудностей въ этомъ отношеніи быть не можетъ, какъ видно изъ формулы (56) M_h, такъ какъ число ихъ — m

можетъ быть взято какое угодно; но для ригеля мы должны имѣть одинъ брусъ такого поперечнаго сѣченія, чтобы было удовлетворено

$$max.\ M_0 = a^2 \cdot \frac{H^2}{2} \cdot \delta \,.\, \mathfrak{M}_0 = \rho \,.\, R' \frac{I_0}{z_0}$$

Самый ходовой лѣсъ въ практикѣ шлюзныхъ воротъ обыкновенно 9,10 и не выше 12-вершковой толщины. Вытесанные изъ такого лѣса брусья, квадратнаго сѣченія, при одиночныхъ ригеляхъ, могутъ быть употреблены для одностворчатыхъ полотенъ, слѣдующихъ размѣровъ, въ дюймахъ, при $\mathfrak{M}_0 = 0{,}07436$ и $R' = 30$ пуд.

Бревна толщ. въ вершк.	Вытесанный квадр. брусъ въ дюйм.	Его $\frac{I_0}{z_0}$	Его $R' \frac{I_0}{z_0}$	Что соотвѣтствуетъ размѣрамъ полотна въ дюйм.	
				$a.\ H$	или при $2a = H =$
10	12,3	310,14	9304,2	15.800	177,8
11	13,6	419,24	12577,2	18.380	191,8
12	14,8	540,30	16209,0	20.870	204,2

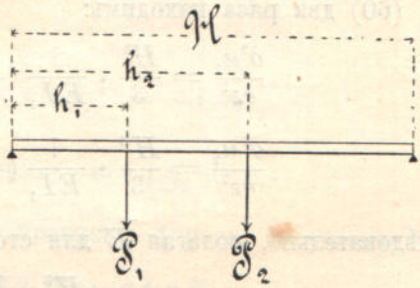
Если, для даннаго полотна, aH больше 20870 кв. д., то, за отсутствіемъ лѣса толще 12 вершковъ, необходимо прибѣгнуть къ конструкціи съ двойными ригелями,—но здѣсь можетъ явиться новое затрудненіе. Разсматривая по форм. (57) соотношеніе

$$\alpha = \frac{z_0}{z_1} = \varphi c^2 \frac{R'}{R}$$

и имѣя въ виду подвергнуть стойки наибольшему предѣльному напряженію, т. е. полагая $R' = R$ (при $\rho = 1$, т. е. для полотенъ одностворчатыхъ) можетъ случиться, что α немногимъ отличается отъ единицы, между тѣмъ какъ, при двойныхъ ригеляхъ, въ большинствѣ случаевъ, неудобно дѣлаль x меньше 2. Тогда приходится принять R, для разсчета стоекъ, меньше предѣльнаго, настолько меньше, чтобы $\alpha = \varphi c^2 \frac{R'}{R}$ было равно 2, т. е. отказаться отъ наивыгоднѣйшаго распредѣленія матеріала. Полотна одностворчатыя, въ которыхъ aH больше 20870 кв. д. и въ которыхъ $c = \frac{a}{H}$ меньше 0,702, именно таковы, что стойкамъ нельзя придать размѣровъ соотвѣтствующихъ наибольшему допускаемому напряженію; равно какъ и полотна двустворчатыя (при толщинѣ полотенъ въ 0,1 пролета, при $\theta = 14$ и $\rho = 0{,}68124$), когда c меньше 0,851 при подобномъ-же aH.

§ 23. Полотна состоящія изъ стоекъ опирающихся концами на раму и поддержанныхъ двумя ригелями; кривыя раздѣла нагрузки ригелей и стоекъ.

Закончивъ изложеніе разсчета полотенъ съ однимъ ригелемъ, скажемъ нѣсколько сковъ о подобномъ же разсчетѣ полотенъ съ двумя ригелями, имѣя въ виду, что, хотя теоретически, по объему матеріала, полотна съ однимъ ригелемъ самыя выгодныя, но можетъ случиться, что, по конструктивнымъ соображеніямъ, предпочтительнѣе сдѣлать два ригеля.



Черт. 7.

Для бруса, на двухъ опорахъ, величины прогибовъ въ точкахъ приложенія грузовъ P_1 и P_2, отстоящихъ отъ одной изъ опоръ на h_1 и h_2 или на $\frac{h_1}{H} = \eta_1$ и $\frac{h_2}{H} = \eta_2$ (черт. 7), выражаются формулами:

$$\left.\begin{aligned} u' &= \frac{H^3}{3} \cdot \frac{1}{EI_1} (P_1\sigma_1 + P_2 C) \\ u'' &= \frac{H^3}{3} \cdot \frac{1}{EI_1} (P_2\sigma_2 + P_1 C) \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (58)$$

гдѣ

$$\left.\begin{aligned} \sigma_1 &= \eta_1^2 (1 - \eta_1)^2; \quad \sigma_2 = \eta_2^2 (1 - \eta_2)^2 \\ C &= \frac{\eta_1}{2} (2\eta_1 - \eta_1^2 - \eta_2^2)(1 - \eta_2). \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad (59)$$

Если подъ стойки, числомъ $2a$, подверженныя указанной на черт. 7 нагрузкѣ, подведемъ два ригеля въ точкахъ отстоящихъ отъ лѣвой опоры на h_1 и h_2, то уравненія кривыхъ, раздѣляющихъ грузовыя площади $2aP_1$ и $2aP_2$, будутъ какъ и при одномъ ригелѣ $y_1 = f_1(z)$ и $y_2 = f_2(z)$, и, тогда, прогибы (58) какой-либо стойки, отстоящей отъ срединной стойки на z, будутъ:

$$\left.\begin{aligned} u_1 &= \frac{H^3}{3} \cdot \frac{1}{EI_1} [(P_1 - y_1)\sigma_1 + (P_2 - y_2) C] \\ u_2 &= \frac{H^3}{3} \cdot \frac{1}{EI_1} [(P_2 - y_2)\sigma_2 + (P_1 - y_1) C]. \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad (60)$$

Если M_1 и M_2 моменты силъ $y_1 = f_1(z)$ и $y_2 = f_2(z)$ дѣйствующихъ на ригели, I_{01} и I_{02} моменты инерціи поперечныхъ ихъ сѣченій а w_1 и w_2 ихъ прогибы, то:

$$M_1 = -EI_{01}\frac{\partial^2 w_1}{\partial z^2};\quad M_2 = -EI_{02}\frac{\partial^2 w_2}{\partial z^2}.$$

Такъ какъ во всѣхъ точкахъ соприкасанія ригелей и стоекъ $w_1 = u_1$ и $w_2 = u_2$, то и $\frac{\partial^2 w_1}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2}$ и $\frac{\partial^2 w_2}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2}$. Продифференцировавъ u_1 и u_2 (60) два раза находимъ:

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2} = \frac{H^3}{3}\cdot\frac{1}{EI_1}(-y_1''\sigma_1 - y_2''C) = \frac{\partial^2 w_1}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2} = \frac{H^3}{3}\cdot\frac{1}{EI_1}(-y_2''\sigma_2 - y_1''C) = \frac{\partial^2 w_2}{\partial z^2}$$

слѣдовательно, полагая E для стоекъ и ригелей одинаковымъ:

$$M_1 = \frac{H^3}{3}\cdot\frac{I_{01}}{I_1}(y_1''\sigma_1 + y_2''C)$$

$$M_2 = \frac{H^3}{3}\cdot\frac{I_{02}}{I_1}(y_2''\sigma_2 + y_1''C).$$

Продифференцировавъ затѣмъ M_1 и M_2 два раза, найдемъ, какъ и въ случаѣ для одного ригеля (см. уравн. 42):

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial^2 M_1}{\partial z^2} &= -y_1 = \frac{H^3}{3}\cdot\frac{I_{01}}{I_1}(y_1^{(4)}\sigma_1 + y_2^{(4)}C) = -f_1(z)\\ \frac{\partial^2 M_2}{\partial z^2} &= -y_2 = \frac{H^3}{3}\cdot\frac{I_{02}}{I_1}(y_2^{(4)}\sigma_2 + y_1^{(4)}C) = -f_2(z)\end{aligned}\right\}\quad .\quad .\quad (61)$$

причемъ имѣемъ:

при $z = a$, $M_1 = 0$ и $M_2 = 0$, слѣдовательно:

$$f_1''(a)\sigma_1 + f_2''(a)C = 0;\quad f_2''(a)\sigma_2 + f_1''(a)C = 0;$$

при $z = 0$, $\frac{\partial M_1}{\partial z} = 0$ и $\frac{\partial M_2}{\partial z} = 0$, слѣдовательно:

$$f_1'''(o)\sigma_1 + f_2'''(o)C = 0;\quad f_2'''(o)\sigma_2 + f_1'''(o)C = 0;$$

Кромѣ того при $z = a$, $u_1 = 0$ и $u_2 = 0$, слѣдовательно:

$$[P_1 - f_1(a)]\sigma_1 + [P_2 - f_2(a)]C = 0$$

$$[P_2 - f_2(a)]\sigma_2 + [P_1 - f_1(a)]C = 0$$

и вмѣстѣ съ тѣмъ, при $z = a$, $P_1 = f_1(a)$ и $P_2 = f_2(a)$, наконецъ при $z = 0$, $\frac{\partial u_1}{\partial z} = 0$ и $\frac{\partial u_2}{\partial z} = 0$, слѣд.:

$$f_1'(o)\sigma_1 + f_2'(o)C = 0;\quad f_2'(o)\sigma_2 + f_1'(o)C = 0.$$

Для опредѣленія $f_1(z)$ и $f_2(z)$ надо рѣшить совокупныя дифференціальныя уравненія (61):

$$\left.\begin{aligned} \sigma_1 y_1^{(4)} + C y_2^{(4)} + t_1 y_1 = 0, \text{ гдѣ } t_1 = \frac{3}{H^3}\cdot\frac{I_1}{I_{01}} \\ \sigma_2 y_2^{(4)} + C y_1^{(4)} + t_2 y_2 = 0, \text{ гдѣ } t_2 = \frac{3}{H^3}\cdot\frac{I_1}{I_{02}} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad (62)$$

исключая $y_1^{(4)}$, имѣемъ:

$$C^2 y_2^{(4)} + C t_1 y_1 = \sigma_1 \sigma_2 y_2^{(4)} + \sigma_1 t_2 y_2$$

или

$$(\sigma_1\sigma_2 - C^2)\, y_2^{(4)} - C t_1 y_1 + \sigma_1 t_2 y_2 = 0.$$

Продифференцировавъ послѣднее уравненіе 4 раза, получаемъ:

$$(\sigma_1\sigma_2 - C^2)\, y_2^{(8)} - C t_1 y_1^{(4)} + \sigma_1 t_2 y_2^{(4)} = 0,$$

но, по (61),

$$y_1^{(4)} = -\frac{t_2}{C}\, y_2 - \frac{\sigma_2}{C}\, y_2^{(4)},$$

тогда

$$(\sigma_1\sigma_2 - C^2)\, y_2^{(8)} + t_1\sigma_2 y_2^{(4)} + t_2\sigma_1 y_2^{(4)} + t_1 t_2 y_2 = 0,$$

или

$$y_2^{(8)} + \frac{t_1\sigma_2 + t_2\sigma_1}{\sigma_1\sigma_2 - C^2}\cdot y_2^{(4)} + \frac{t_1 t_2}{\sigma_1\sigma_2 - C^2}\, y_2 = 0. \quad . \quad . \quad . \quad (63)$$

Точно также изъ уравненій (62) найдемъ:

$$y_1^{(8)} + \frac{t_1\sigma_2 + t_2\sigma_1}{\sigma_1\sigma_2 - C^2}\cdot y_1^{(4)} + \frac{t_1 t_2}{\sigma_1\sigma_2 - C^2}\, y_1 = 0. \quad . \quad . \quad (64)$$

Тождественность уравненій (63) и (64) приводитъ къ заключенію, что уравненія кривыхъ $y_1 = f_1(z)$ и $y_2 = f_2(z)$ или совершенно тождественны, или разнятся только постоянными коэффиціентами; но какъ полная тождественность ихъ невозможна, ибо невозможно представить двухъ ригелей (въ одномъ полотнѣ), имѣющихъ, при каждомъ z, совершенно одинаковыя величины прогибовъ, то уравненія искомыхъ кривыхъ должны быть вида: $y_1 = A_1\mathit{\Phi}(z)$ и $y_2 = A_2\mathit{\Phi}(z)$, гдѣ A_1 и A_2 постоянные коэффиціенты, слѣдовательно, вмѣсто уравненій (62), будемъ имѣть:

$$(\sigma_1 A_1 + C A_2)\, \mathit{\Phi}^{(4)}(z) + t_1 A_1 \mathit{\Phi}(z) = 0$$

$$(\sigma_2 A_2 + C A_1)\, \mathit{\Phi}^{(4)}(z) + t_2 A_2 \mathit{\Phi}(z) = 0,$$

что даетъ:

$$\frac{t_1 A_1}{\sigma_1 A_1 + C A_2} = \frac{t_2 A_2}{\sigma_2 A_2 + C A_1} = \nu \quad . \quad . \quad . \quad (65)$$

и приводитъ насъ къ уравненію, найденному выше (43), для полотна съ однимъ ригелемъ:

$$\varphi^{(4)}(z) + \nu\varphi(z) = 0$$

или, что все равно, къ уравненіямъ:

$$A_1\varphi^{(4)}(z) + \nu A_1\varphi(z) = 0$$

и

$$A_2\varphi^{(4)}(z) + \nu A_2\varphi(z) = 0$$

т. е.

$$y_1^{(4)} + \nu y_1 = 0$$

$$y_2^{(4)} + \nu y_2 = 0,$$

а эти уравненія даютъ рѣшенія по (46), т. е. согласно сдѣланному выше обозначенію:

$$y_1 = P_1\varphi(z) \text{ и } y_2 = P_2\varphi(z),$$

слѣдовательно

$$A_1 = P_1 \quad \text{и} \quad A_2 = P_2,$$

гдѣ, подобно 1-му случаю съ однимъ ригелемъ, P_1 и P_2—величины силъ, вызывающихъ такіе же прогибы въ точкахъ ихъ приложенія, какъ и напоръ воды; но формулы, по которымъ они могутъ быть исчислены, болѣе сложны, чѣмъ въ 1-омъ случаѣ, а именно, приравнивая формулы (34) и (38):

$$\left.\begin{aligned} P_1 &= \frac{\gamma_1\sigma_2 - \gamma_2 C}{\sigma_1\sigma_2 - C^2}\cdot\frac{H^2}{2}\cdot\delta = q_1\cdot\frac{H^2}{2}\delta \\ &\text{и} \\ P_2 &= \frac{\gamma_2\sigma_1 - \gamma_1 C}{\sigma_1\sigma_2 - C^2}\cdot\frac{H^2}{2}\cdot\delta = q_2\cdot\frac{H^2}{2}\delta \end{aligned}\right\}\quad \ldots\ldots (63)$$

гдѣ значенія C, σ_1 и σ_2 даны по (59), а γ_1 и γ_2 тѣ же величины γ § 17 (34), относящіяся: γ_1 — до мѣста приложенія нижняго ригеля, а γ_2—до верхняго, наконецъ:

$$q_1 = \frac{\gamma_1\sigma_2 - \gamma_2 C}{\sigma_1\sigma_2 - C^2} \text{ и } q_2 = \frac{\gamma_2\sigma_1 - \gamma_1 C}{\sigma_1\sigma_2 - C^2}.$$

Итакъ, по (65) имѣемъ:

$$\frac{t_1 P_1}{\sigma_1 P_1 + CP_2} = \frac{t_2 P_2}{\sigma_2 P_2 + CP_1};$$

подставляя вмѣсто P_1 и P_2 ихъ значенія (66), получимъ:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{I_{02}}{I_{01}} = \frac{P_2}{P_1}\cdot\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{q_2}{q_1}\cdot\frac{\gamma_1}{\gamma_2} \quad \ldots\ldots (67)$$

Это есть условіе, при которомъ полотно съ двумя ригелями можетъ изгибаться согласно заданію; причемъ, какъ видно, разсчетъ такого полотна сводится къ расчету полотна съ однимъ ригелемъ, по выше выведенному уравненію:

$$\phi^{(4)}(z) + \nu\phi(z) = 0$$

или

$$y^{(4)} + \nu . y = 0,$$

гдѣ

$$\nu = \frac{t_1 P_1}{\sigma_1 P_1 + C P_2} = \frac{t_2 P_2}{\sigma_2 P_2 + C P_1}$$

или, для нижняго ригеля (см. форм. 62 и 65):

$$\left.\begin{array}{l} \nu_1 = \frac{3}{H^3} \cdot \frac{I_1}{I_{01}} \cdot \frac{q_1}{\gamma_1} \text{ и } y_1^{(4)} + \nu_1 y_1 = 0 \\ \text{а для верхняго:} \\ \nu_2 = \frac{3}{H^3} \cdot \frac{I_1}{I_{02}} \cdot \frac{q_2}{\gamma_2} \text{ и } y_2^{(4)} + \nu_2 y_2 = 0, \end{array}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (68)$$

причемъ $\nu_1 = \nu_2$ и видъ ихъ тождественъ съ μ формулы (43), такъ что для срединной стойки будемъ имѣть подобно формулѣ (47):

$$y_1 = \omega' P_1 \text{ и } y_2 = \omega' P_2$$

или

$$y_1 = q_1 \frac{H^2}{2} \delta . \omega' \text{ и } y_2 = q_2 \frac{H^2}{2} . \delta . \omega',$$

гдѣ

$$\omega' = \frac{2 \cos an\, (e^{an} + e^{-an})}{2 \cos 2an + e^{2an} + e^{-2an}}$$

и

$$an = \sqrt[4]{\frac{3}{4} . c^2 . m \frac{q_1}{\gamma_1} \cdot \frac{I_1}{I_{01}}} = \sqrt[4]{\frac{3}{4} . c^3 . m \frac{q_2}{\gamma_2} \cdot \frac{I_1}{I_{02}}}.$$

§ 24. Наибольшія напряженія въ ригеляхъ и стойкахъ полотенъ § 23.

Изъ всего сказаннаго заключаемъ, что, въ полотнахъ съ двумя ригелями, опредѣленіе наибольшихъ напряженій въ ригеляхъ приводятъ насъ къ 1-му случаю, т. е. къ полотну съ однимъ ригилемъ.

Затѣмъ, для опредѣленія наибольшихъ напряженій въ срединной стойкѣ слѣдуетъ вывести формулы наибольшихъ моментовъ, которыхъ будетъ три.

Моменты отъ сосредоточенныхъ грузовъ Q_1 и Q_2 въ I, II и III частяхъ ребра (черт. 8) будутъ, вводя принятыя раньше обозначенія $\frac{h_1}{H} = \eta_1$, $\frac{h_2}{H} = \eta_2$, $\frac{x_1}{H} = \lambda_1, \ldots$, слѣдующіе:

$$M_{\text{I}} = H\, [\,(Q_1\eta_1 + Q_2\eta_2)\,\lambda_1 - (Q_1 + Q_2)\,\lambda_1]$$
$$M_{\text{II}} = H\, [\,(Q_1\eta_1 + Q_2\eta_2)\,\lambda_2 - Q_1\eta_1 - Q_2\lambda_2]$$
$$M_{\text{III}} = H\, [\,(Q_1\eta_1 + Q_2\eta_2)\,\lambda_3 - Q_1\eta_1 - Q_2\eta_2]$$

и такъ какъ въ разсматриваемомъ случаѣ эти грузы или силы приравниваются, какъ и въ полотнѣ съ однимъ ригелемъ, ординатамъ кривой $f(z)$, т. е. въ срединной стойкѣ

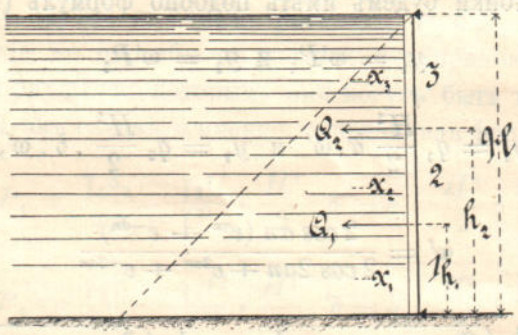
$$Q_1 = y_1 = q_1 \frac{H^2}{2} \cdot \delta\omega' \quad \text{и} \quad Q_2 = y_2 = q_2 \frac{H^2}{2} \cdot \delta\omega',$$

то выраженія моментовъ будутъ.

$$M_{\text{I}} = \omega' \frac{H^3}{6} \delta [3(q_1\eta_1 + q_2\eta_2)\lambda_1 - 3(q_1 + q_2)\lambda_1]$$

$$M_{\text{II}} = \omega' \frac{H^3}{6} \delta [3(q_1\eta_1 + q_2\eta_2)\lambda_2 - 3q_1\eta_1 - 3q_2\lambda_2]$$

$$M_{\text{III}} = \omega' \frac{H^3}{6} \delta [3(q_1\eta_1 + q_2\eta_2)\lambda_3 - 3q_1\eta_1 - 3q_2\eta_2].$$



Черт. 8.

Совокупное дѣйствіе напора и противоположныхъ силъ Q_1 и Q_2, полагая $q_1\omega' = \Omega_1$ и $q_2\omega' = \Omega_2$, даетъ моменты:

$$\left.\begin{aligned}
M_1 &= \frac{H^3}{6} \delta [\lambda^3{}_1 - 3\lambda^2{}_1 + 2\lambda_1 + \\
&\quad + 3(\Omega_1\eta_1 + \Omega_2\eta_2)\lambda_1 - 3(\Omega_1 + \Omega_2)\lambda_1] \\
M_2 &= \frac{H^3}{6} \delta [\lambda^3{}_2 - 3\lambda^2{}_2 + 2\lambda_2 + \\
&\quad + 3(\Omega_1\eta_1 + \Omega_2\eta_2)\lambda_2 - 3\Omega_1\eta_1 - 3\Omega_2\lambda_2] \\
M_3 &= \frac{H^3}{6} \delta [\lambda^3{}_3 - 3\lambda^2{}_3 + 2\lambda_3 + \\
&\quad + 3(\Omega_1\eta_1 + \Omega_2\eta_2)\lambda_3 - 3\Omega_1\eta_1 - 3\Omega_2\eta_2]
\end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad (69)$$

Для *max.* моментовъ должно быть:

$$\left.\begin{aligned} 3\lambda^2_1 - 6\lambda_1 + 2 + 3\,(\Omega_1\eta_1 + \Omega_2\eta_2) - 3\,(\Omega_1 + \Omega_2) = 0 \\ 3\lambda^2_2 - 6\lambda_2 + 2 + 3\,(\Omega_1\eta_1 + \Omega_2\eta_2) - 3\Omega_2 = 0 \\ 3\lambda^2_3 - 6\lambda_3 + 2 + 3\,(\Omega_1\eta_1 + \Omega_2\eta_2) = 0 \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad (70)$$

Соединяя (69) и (70), получимъ:

$$max.\ M_3 = \frac{H^3}{6}\,\delta\,.\,2\,(1-\lambda_3)^3$$

$$max.\ M_2 = \frac{H^3}{6}\,.\,\delta\,(3\lambda^2_2 - 2\lambda^3_2 - 3\Omega\eta_1)$$

$$max.\ M_1 = \frac{H^3}{6}\,\delta\,(3\lambda^2_1 - 2\lambda^3_1).$$

Для того, чтобы $max.\ M_1 = max.\ M_2 = max.\ M_3$ должно быть:

$$3\lambda_1^{\,2} - 2\lambda_1^{\,3} = 2\,(1-\lambda_3)^3$$

$$2\,(1-\lambda_3)^3 = 3\lambda_2^{\,2} - 2\lambda_2^{\,3} - \Omega\eta_1$$

Въ общемъ, вмѣстѣ съ тремя уравненіями (70) имѣемъ пять уравненій связывающихъ шесть величинъ, а именно:

$$\lambda_1,\ \lambda_2,\ \lambda_3,\ \eta_1,\ \eta_2 \text{ и } \omega$$

(Ω_1 и Ω_2 равны $q_1\omega$ и $q_2\omega$, а q_1 и q_2 суть функціи η_1 и η_2).

Задаваясь одною величиною, напр. λ_1, можемъ вычислить остальныя, удовлетворяющія требуемымъ условіямъ и, по формуламъ однороднымъ съ выведенными для полотенъ съ однимъ ригелемъ, — отыскать размѣры.

Главное при этомъ, конечно, чтобы при правильности изгиба, напряженія частей были по возможности одинаковы.

Для разсчета напряженій имѣемъ:

$$\left.\begin{aligned} &\text{для стоекъ:} && max.\ M_h = a\,\frac{H^3}{6}\,\delta\,.\,\mathfrak{M}_h = mR_1\frac{I_1}{z_1} \\ &\text{для нижняго ригеля:} && max.\ M_{01} = a^2\,\frac{H^2}{2}\,\delta\,\mathfrak{M}_{01} = \rho R_0\,\frac{I_{01}}{z_{01}} \\ &\text{„ верхняго ригеля:} && max.\ M_{02} = a^2\,.\,\frac{H^2}{2}\,.\,\delta\,\mathfrak{M}_{02} = \rho R_0\,\frac{I_{02}}{z_{02}} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad (71)$$

Для того, чтобы напряженіе было одинаково, должно быть

$$\frac{H}{3a}\cdot\frac{\mathfrak{M}_h}{\mathfrak{M}_{01}} = m\,.\,\frac{R_1}{\rho R_0}\cdot\frac{I_1}{I_{01}}\cdot\frac{z_{01}}{z_1}$$

$$\frac{H}{3a}\cdot\frac{\mathfrak{M}_h}{\mathfrak{M}_{02}} = m\,.\,\frac{R_1}{\rho R_0}\cdot\frac{I_1}{I_{02}}\cdot\frac{z_{02}}{z_1}.$$

Но какъ

$$(an)^4 = \frac{3}{4} \cdot c^3 \cdot m \frac{q_1}{\gamma_1} \cdot \frac{I_1}{I_{01}} = \frac{3}{4} \cdot c \cdot {}^3 m \frac{q_2}{\gamma_2} \cdot \frac{I_1}{I_{02}}$$

то обозначая

$$B_1 = \frac{4}{3} (an)^4 \frac{q_1}{\gamma_1} \text{ и } B_2 = \frac{4}{3} (an)^4 \frac{q_2}{\gamma_2}$$

находимъ

$$\frac{I_1}{I_{01}} = \frac{B_1}{c^3 m} \text{ и } \frac{I_1}{I_{02}} = \frac{B_2}{c^3 m}$$

и затѣмъ

$$\left.\begin{aligned} \frac{z_{01}}{z_1} &= \alpha_1 = \frac{\rho R_0}{R_1} \cdot \frac{c^2}{3 B_1} \cdot \frac{\mathfrak{M}_h}{\mathfrak{M}_{01}} = \rho \frac{R_0}{R_1} \cdot \varphi_1 c^2 \\ \text{и} \quad \frac{z_{02}}{z_1} &= \alpha_2 = \frac{\rho R_0}{R_1} \cdot \frac{c^2}{3 B_2} \cdot \frac{\mathfrak{M}_h}{\mathfrak{M}_{02}} = \rho \frac{R_0}{R_1} \cdot \varphi_2 c^2 \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad (72)$$

гдѣ φ_1 и φ_2 тѣ же, какъ и въ формулѣ (57).

Въ числѣ примѣровъ, подъ № 16, помѣщенъ разсчетъ такихъ полотенъ. Разсчетъ представляется довольно сложнымъ, потому что сдѣланъ безъ таблицы. Еслибы же таковая была, то разсчетъ оказался бы настолько же простымъ, какъ и для полотенъ съ однимъ ригелемъ.

ГЛАВА III.

Численные примѣры.

Въ видѣ примѣровъ помѣщаемъ разсчеты деревянныхъ шлюзныхъ полотенъ одностворчатыхъ и двустворчатыхъ.

Ширина одностворчатыхъ или двустворчатыхъ, при $\theta = 14^\circ$, равна 320 дюйм. $= 2a$.

Высота $H = 250$ дюйм.

Для простоты не будемъ принимать во вниманіе врубокъ и отверстій для болтовъ; толщину полотенъ s полагаемъ въ 0,1 пролета $= 32$ дюйм.

1) Одностворчатое полотно ($\rho = 1$) ригели и стойки одиночныя.

$$c = \frac{a}{H} = \frac{160}{250} = 0{,}64,$$

а

$$c^2 = 0{,}4096.$$

Изъ таблицы 4-ой видимъ, что наивыгоднѣйшее (при $c^2 = 0{,}4$) $k^4 = 2{,}6$, причемъ $q_I = 0{,}788$, $q_{II} = 0{,}0308$, $\varphi = 3{,}5779$ и $\alpha = \frac{z_0}{z_1} = 0{,}4096 \times 3{,}5779 = 1{,}46551$, кругло 1,47.

Полагая толщину полонтна въ 0,1 пролета, т. е. $s = 32$ дюйма, имѣемъ

$$2z_0 = s \cdot \frac{\alpha}{1 + \alpha} = 19''$$

и

$$2z_1 = s\,\frac{1}{1 + \alpha} = 13''.$$

Изъ формулы 5-ой находимъ:

$$q_{I}\,\frac{\delta a^2 H^2}{4R} = N\,\frac{I_0}{z_0} = N\,\frac{19^2}{6}\,.\,b_0 = 0{,}788\,\frac{0{,}001.\overline{160}^2\cdot\overline{250}^2}{4.30}$$

и

$$Nb_0 = 174{,}6,$$

откуда, полагая ширину ригелей $b_0 = 17{,}5$ дюйм., число ихъ будетъ 10.

Точно также изъ формулы 6-ой находимъ

$$q_{II}\,\frac{\delta H^3.\,2a}{R} = m\,\frac{I_1}{z_1} = m\,.\,\frac{\overline{13}^2}{6}\,.\,b_1 = 0{,}0308\,\frac{0{,}001.\overline{250}^3.\,320}{30}$$

и

$$mb_1 = 182{,}25,$$

откуда, полагая ширину стоекъ $18{,}25''$ число ихъ будетъ 10.

Объемъ всѣхъ ригелей и стоекъ равенъ:

$10 \times 19 \times 17{,}5 \times 320 + 10 \times 13 \times 18{,}25 \times 250 = 1.657.125$ кб. дюйм.

По формулѣ (16) объемъ равенъ 1.653.800 куб. дюйм., что, при переводѣ на вѣсъ, составляетъ разницу противъ предыдущаго около 2 пуд.

2) Одностворчатое полотно изъ стоекъ обхваченныхъ двойными ригелями (не сплошные).

По форм. (21) слѣдуетъ для выгоднаго рѣшенія выбирать наименьшіе α; однако по конструктивнымъ соображеніямъ врядъ-ли удобно было бы брать α менѣе 2. Останавливаясь на $\alpha = 2$, находимъ $\varphi = \frac{\alpha}{c^2} = 4{,}8818$, что соотвѣтствуетъ, по таблицѣ № 1, $k^4 = 1{,}2$, $q_{I} = 0{,}936$ и $q_{II} = 0{,}0232$.

При толщинѣ полотенъ, какъ выше $s = 32''$, имѣемъ $2z_1 = 16''$ и слѣдовательно

$$q_{I}\,\frac{\delta\,a^2 H^2}{4R} = N\,\frac{\overline{32}^3 - \overline{16}^3}{6\,.\,32}\,b_0,$$

откуда

$$Nb_0 = 83{,}57.$$

Полагая ширину ригелей въ 16,72 дюйм., число ихъ будетъ 5.

Стойки опредѣлятся изъ формулы

$$q_{II}\,\frac{\delta H^3.\,2a}{R} = m\,\frac{\overline{16}^2}{6}\,b_1,$$

откуда

$$mb_1 = 90{,}625.$$

Полагая ширину стоекъ въ 18,125 дюйм., число ихъ будетъ 5.

Объемъ матеріала равенъ:

$$5 \times (32 - 16) \times 16{,}72 \times 320 + 5 \times 16 \times 18{,}125 \times 250 = 790.532 \text{ куб. дюйм.}$$

Если бы отношеніе α было взято равное принятому въ первомъ случаѣ, т. е. $\alpha = 1{,}47$, то при $2z_0 = 32''$ было бы $2z_1 = 23''$ и $Nb_0 = 96{,}4$ и $mb_1 = 58{,}2$, а объемъ матеріала 781.220 куб. дюйм., хотя и меньшій чѣмъ при $\alpha = 2$, но матеріалъ былъ бы распредѣленъ не конструктивно, какъ видно изъ сравненія Nb_0 и mb_1.

3) Одностворчатое полотно изъ ригелей, зажатыхъ между двойными стойками (не сплошными), по даннымъ размѣрамъ можетъ быть спроектировано лишь при k^4 бо́льшихъ 4,6, такъ какъ α должно быть въ этомъ случаѣ меньше единицы.

Принявъ $k^4 = 6$, находимъ $\alpha = \varphi c^2 = 1{,}95689 \times 0{,}4096 = 0{,}80154$, что при $s = 32''$ дастъ толщину ригелей $2z_0 = \alpha s = 25{,}65$ дюйм.

$$(q_I = 0{,}750 \text{ и } q_{II} = 0{,}037).$$

Подобно предыдущему находимъ:

$$Nb_0 = 93{,}325 \text{ дюйм.}$$

Полагая сдѣлать ригели шириною въ 18,67 дюйм., число ихъ будетъ 5.

Точно также изъ

$$q_{II} \frac{\delta H^3 . 2a}{R} = m \frac{\overline{32}^3 - \overline{25{,}65}^3}{6 . 32} b_1$$

имѣемъ

$$mb_1 = 74{,}493 \text{ дюйм.}$$

Дѣлая стойки шириною 14,9 дюйм., число ихъ будетъ 5.

Объемъ матеріала равенъ:

$$5 \times 25{,}65 \times 18{,}67 \times 320 + 5\,(32 - 25{,}65)\,14{,}9 \times 250 = 884.620 \text{ куб. д.}$$

4) Одностворчатое полотно изъ сплошныхъ одиночныхъ ригелей и стоекъ ($\rho = 1$).

По таблицѣ № 6 находимъ, что наивыгоднѣйшее рѣшеніе для $c = 0{,}64$ получается при $k^4 = 3$ (около) и тогда по формуламъ (24) находимъ

$$2z_0 = 15{,}7 \text{ дюйм.} \qquad 2z_1 = 10 \text{ дюйм.}$$

и толщина полотна 25,7 дюйма, а объемъ $2aHs = 320 \times 250 \times 25{,}7 =$ $= 2.056.000$ куб. дюйм.

(Для сравненія этого объема съ объемомъ заданія № 1, вычтемъ отсюда объемъ замѣняющій обшивку толщиною въ 3 дюйма, что составитъ 240.000 куб. дюйм.; остается объемъ 1.816.000 куб. дюйм.).

5) Одностворчатое полотно изъ сплошныхъ стоекъ съ двойными ригелями (сплошными тоже).

По табл. 1 и 5 находимъ, что выраженіе (27) обращается почти въ тождество при $\alpha = 1{,}7$ и $k^4 = 4$; поэтому, по формулѣ (26), находимъ:

$$2z_1 = 10{,}37 \text{ дюйм. и } 2z_0 = 1{,}7 \times 10{,}37 = 17{,}63 \text{ дюйм.}$$

и объемъ

$$320 \times 250 \times 17{,}63 = 1.410.400 \text{ куб. дюйм.}$$

(Полагая на обшивку, какъ выше 240.000 куб. д., остается объемъ 1.170.000 куб. дюйм.).

6) Одностворчатое полотно изъ сплошныхъ ригелей, съ двойными стойками — сплошными не можетъ быть спроектировано съ ригелями и стойками одинаково напряженными, такъ какъ по формулѣ (28) (при $\rho = 1$) нельзя отыскать соотвѣтственные α и k^4.

7) Двустворчатое полотно изъ одиночныхъ стоекъ и ригелей—не сплошныхъ ($\theta = 14°$).

По таблицѣ № 5 находимъ, что произведенія $\frac{\alpha}{\rho} \times \frac{1}{c^2} = \varphi$, начиная съ $\alpha = 0{,}4$ до $\alpha = 5$ могутъ соотвѣтствовать всѣмъ k^4, такъ какъ всѣ полученныя φ находятся въ табл. 1-ой. Вычисляя по формулѣ (20) нѣкоторыя значенія $\left(\frac{q_1}{\varphi} \cdot \frac{1}{c^2} + 4q_{II}\right)(1 + \alpha) = w$, находимъ, что

при $\alpha = 0{,}8$	$\varphi = 2{,}1853$	$k^4 = 5{,}4$	и	$w = 1{,}0229$
» $\alpha = 1{,}0$	$\varphi = 2{,}7678$	$k^4 = 4$	»	$w = 0{,}9616$
» $\alpha = 1{,}2$	$\varphi = 3{,}3569$	$k^4 = 2{,}9$	»	$w = 0{,}9453$
» $\alpha = 1{,}4$	$\varphi = 3{,}9512$	$k^4 = 2{,}1$	»	$w = 0{,}9463$
» $\alpha = 1{,}6$	$\varphi = 4{,}5491$	$k^4 = 1{,}48$	»	$w = 0{,}9568$
» $\alpha = 1{,}8$	$\varphi = 5{,}1499$	$k^4 = 1{,}04$	»	$w = 0{,}9652$

Останавливаясь на $\alpha = 1{,}2$ имѣемъ, при $s = 32$ д., $2z_1 = 14{,}54$ д., $2z_0 = 17{,}46$ дюйм.

$$\rho = 0{,}87271;\ k^4 = 2{,}9;\ q_I = 0{,}775;\ q_{II} = 0{,}0317.$$

Тогда по форм. (5) и (6)

$$q_I \frac{\delta a^2 H^2}{4\rho R} = N \frac{I_0}{z_0}$$

и

$$q_{II} \frac{\delta H^3 2a}{R} = m \frac{I_1}{z_1},$$

откуда получаемъ

$$Nb_0 = 233{,}04 \text{ и } mb_1 = 149{,}94.$$

Дѣлая ригели шириною 23,3 дюйма и стойки шириною 15 д., число тѣхъ и другихъ будетъ по 10.

Объемъ матеріала:

$$10 \times 17{,}46 \times 23{,}3 \times 320 + 10 \times 14{,}54 \times 15 \times 250 = 1.845.250 \text{ куб. д.}$$

Почти тоже число получается по формулѣ

$$W + V = 2aH \,.\, G, \text{ гдѣ } G = \frac{3}{2}\,\delta\,\frac{H^3}{Rs} \times 0{,}9453.$$

Если проектировать ворота не на 14° къ поперечной оси шлюза, а на 18°20′, то ширина полотенъ была бы не 320 дюйм., а 327,1 дюйм. отношеніе $\frac{a}{H} = c = 0{,}6542$, а $c^2 = 0{,}428$.

Подобно предыдущему находимъ въ этомъ случаѣ

$$w = \left(\frac{q_I}{\varphi} \cdot \frac{1}{\rho^2} + 4q_{II}\right)(1 + \alpha)$$

при	$\alpha = 1$	$\varphi = 2{,}5717$	$k^4 = 4{,}4$	и	$w = 0{,}9704$
»	$\alpha = 1{,}2$	$\varphi = 3{,}0619$	$k^4 = 3{,}4$	»	$w = 0{,}9605$
»	$\alpha = 1{,}4$	$\varphi = 3{,}6552$	$k^4 = 2{,}47$	»	$w = 0{,}9429$
»	$\alpha = 1{,}6$	$\varphi = 4{,}2015$	$k^4 = 1{,}8$	»	$w = 0{,}9506$
»	$\alpha = 1{,}8$	$\varphi = 4{,}7499$	$k^4 = 1{,}3$	»	$w = 0{,}9593$

Останавливаясь на $\alpha = 1{,}4$, находимъ по форм. (5) и (6) при $\rho = 0{,}895$; $q_I = 0{,}797$; $q_{II} = 0{,}0303$.

$$Nb_0 = 213{,}56 \text{ и } mb_1 = 174{,}30$$

и объемъ матеріала 1.885.070 куб. дюйм.

8) Двустворчатое полотно изъ стоекъ обхваченныхъ двойными ригелями (не сплошныя).

Полагая $\alpha = 2$, находимъ по формулѣ (22) $\rho = 0{,}681$, а затѣмъ $\varphi = \frac{\alpha}{\rho} \cdot \frac{1}{c^2} = 7{,}1675$, что соотвѣтствуетъ $k^4 = 0{,}48$, при которомъ $q_I = 1{,}125$ и $q_{II} = 0{,}0159$.

$$Nb_0 = \frac{1{,}125 \,.\, \overline{160}^2 \,.\, \overline{250}^2}{1000 \,.\, 4 \,.\, 0{,}681 \,.\, 30} \cdot \frac{6 \,.\, 32}{\overline{32}^3 - \overline{16}^3} = 147{,}5$$

$$mb_I = \frac{0{,}0159 \,.\, \delta \,.\, H^3 \,.\, 2a}{R} \cdot \frac{6}{16^2} = 62{,}11.$$

Дѣлая 10 ригелей и 5 стоекъ, ширины ихъ будутъ: ригелей 14,75 дюйм. и стоекъ 12,42 дюйм. и объемъ матеріала

$$W + V = 147{,}5\,(32 - 16)\,320 + 62{,}11 \times 16 \times 250 = 1.003.632 \text{ куб. д.}$$

9) Двустворчатое полотно, изъ ригелей обхваченныхъ двойными стойками (не сплошными).

Полагая $\alpha = \frac{1}{2}$ находимъ $\varphi = \frac{\alpha}{\rho} \cdot \frac{1}{c^2} = 1{,}3334$, что соотвѣтствуетъ $k^4 = 8{,}45$, при которомъ $q_{\prime} = 0{,}819$ и $q_{\prime\prime} = 0{,}0386$, причемъ $\rho = 0{,}91792$

$$Nb_0 = 0{,}819 \,.\, \frac{\delta\, a^2 H^2}{0{,}91792 \,.\, R} \cdot \frac{6}{16^2} = 278{,}82,$$

число это, большее чѣмъ высота $H = 250$, показываетъ, что полотно такого типа при условіи одинаковаго напряженія матеріала въ ригеляхъ и стойкахъ устроено быть не можетъ.

10) Двустворчатое полотно изъ сплошныхъ рядовъ ригелей и стоекъ— одиночныхъ.

Для даннаго c наименьшая сумма $\frac{c}{2}\sqrt{q_{\prime}} + \sqrt{q_{\prime\prime}}$ получается при $k^4 = 2{,}6$, поэтому вычислимъ по форм. (25) ρ для $k^4 = 2{,}40 - 2{,}60 - 2{,}80 - 3{,}00$

$k^4 = 2{,}40 \quad \rho = 0{,}87496 \quad 2z_0 = 17{,}17'' \quad 2z_1 = 9{,}68''$ и $s = 26{,}85''$

$k^4 = 2{,}60 \quad \rho = 0{,}87585 \quad 2z_0 = 16{,}97'' \quad 2z_1 = 9{,}81''$ и $s = 26{,}78''$

$k^4 = 2{,}80 \quad \rho = 0{,}87650 \quad 2z_0 = 16{,}86'' \quad 2z_1 = 9{,}91''$ и $s = 26{,}77''$

Останавливаясь на $k^4 = 2{,}8$ находимъ объемъ матеріала:

$$2aHs = 320 \times 250 \times 26{,}77 = 2.141.600 \text{ куб. д.}$$

11) Двустворчатое полотно изъ сплошныхъ стоекъ съ двойными таковыми же ригелями.

Изъ формулы (27) при $\rho = 1$ находимъ,

что для $\alpha = 2 \quad \frac{q_{\prime}}{4q_{\prime\prime}} = 8{,}5449$

» » $\alpha = 1{,}8 \quad \frac{q_{\prime}}{4q_{\prime\prime}} = 6{,}5540$

» » $\alpha = 1{,}6 \quad \frac{q_{\prime}}{4q_{\prime\prime}} = 4{,}7241$

» » $\alpha = 1{,}7 \quad \frac{q_{\prime}}{4q_{\prime\prime}} = 5{,}6390$

Слѣдовательно, какъ видно изъ табл. № 1 величинъ $\frac{q_{\prime}}{4q_{\prime\prime}}$, α не можетъ быть меньше 1,7 и для опредѣленія s имѣемъ сообразно значеніямъ $\frac{q_{\prime}}{4q_{\prime\prime}}$ слѣдующія предѣльныя величины:

при $\alpha = 2$ $q_{II} = 0{,}0261$ — до $0{,}0404$

» $\alpha = 1{,}8$ $q_{II} = 0{,}0308$ — » $0{,}0404$

» $\alpha = 1{,}7$ $q_{II} = 0{,}0336$ — » $0{,}0404$

Соотвѣтственно этому находимъ:

при $\alpha = 2$ s отъ $18{,}06$ до $22{,}47$

» $\alpha = 1{,}8$ s » $17{,}66$ » $20{,}22$

» $\alpha = 1{,}7$ s » $17{,}46$ » $19{,}10$

Для опредѣленія ρ подставляемъ найденные предѣлы въ формулу (22)

$$\frac{1}{\rho} - 1 = s \cdot \frac{\alpha^3 - 1}{\alpha^2 (\alpha - 1)} \cdot \frac{\cot \theta}{3a}$$

при $\alpha = 2$ ρ равно отъ $0{,}79109$ до $0{,}75269$

» $\alpha = 1{,}8$ ρ » » $0{,}78426$ » $0{,}76047$

» $\alpha = 1{,}7$ ρ » » $0{,}77992$ » $0{,}76412$

Теперь, зная ρ, можно по форм. (27) опредѣлить какимъ $\frac{q_I}{4q_{II}}$ соотвѣтствуютъ выбранныя α.

при $\alpha = 2$ $\frac{q_I}{4q_{II}}$ равно отъ $6{,}7598$ до $6{,}2853$

» $\alpha = 1{,}8$ $\frac{q_I}{4q_{II}}$ » » $5{,}1400$ » $4{,}9841$

Останавливаясь на $\alpha = 2$ и $\frac{q_I}{4q_{II}}$ близкомъ къ среднему между $6{,}7598$ и $6{,}2853$ или на $\frac{q_I}{4q_{II}} = 6{,}3961$, находимъ по табл. № 1 $q_{II} = 0{,}0308$ и $q_I = 0{,}788$, при которыхъ по q_{II} получаемъ $s = 19{,}62$ дюйм.

Для повѣрки находимъ по формулѣ (17) $\rho = 0{,}77707$ и по первой формулѣ изъ (26) $s = 19{,}23$ дюйма, слѣд. принятая толщина $s = 19{,}62$ дюйма удовлетворительна, причемъ стойки имѣютъ толщину $9{,}81$ дюйм.

При $s = 19{,}62$, объемъ матеріала $= 1.569.600$ куб. д.

12) Двустворчатое полотно изъ сплошныхъ ригелей, съ двойными, таковыми же стойками.

Изъ формулы (30) при $\rho = 1$ находимъ:

при $\beta = 3$ $\frac{4q_{II}}{q_I} = 3{,}46668$ — такого $\frac{4q_{II}}{q_I}$ въ табл. № 1 нѣтъ

» $\beta = 2$ $\frac{4q_{II}}{q_I} = 1{,}4000$ — » $\frac{4q_{II}}{q_I}$ » № 1 »

» $\beta = 1{,}2$ $\frac{4q_{II}}{q_I} = 0.2485$ — » $\frac{4q_{II}}{q_I}$ » № 1 » (наибольшій изъ табличныхъ $\frac{4q_{II}}{q_I} = \frac{1}{5,0456} = 0,19819$), слѣд. невозможно спроектировать полотно этого типа съ одинаково напряженными ригелями и стойками.

13) Разсчетъ желѣзнаго двустворчатаго полотна, шириною $2a = 582$ сант. и высотою $H = 682$ сант., при $\theta = 14^0$.

$$c = \frac{a}{H} = \frac{291}{682} = 0,4267 \quad c^2 = 0,1821.$$

Полотно проектируемъ изъ стоекъ составленныхъ изъ двухъ паръ уголковъ, соединенныхъ рѣшеткою, въ видѣ рѣшетчатыхъ балокъ съ обыкновенными тавровыми поясами и ригелей, составленныхъ тоже изъ двухъ паръ уголковъ, соединенныхъ рѣшетками въ видѣ рѣшетчатыхъ балокъ съ поясами изъ тавровъ, обращенныхъ ребрами наружу. Послѣдніе тавры, обхватывая стойки, основаніями своими касаются основаній тавровъ стоекъ. Такимъ образомъ полотно состоитъ изъ стоекъ обхваченныхъ какъ бы двойными ригелями.

Полагая толщину полотна сдѣлать въ $\frac{1}{10}$ пролета, т. е. въ 58 сант. и взять для поясовъ ригелей равнобокіе уголки 12×12 сант., имѣемъ

$$2z_0 = 58 \text{ сант.} \quad \text{и} \quad 2z_1 = 58 - 2.12 = 34 \text{ сант.}$$

и

$$\alpha = \frac{z_0}{z_1} = \frac{58}{34} = 1.706 = \rho\varphi c^2 \text{ (формула 7).}$$

Для перваго приближенія полагаемъ

$$\rho = 0,7,$$

тогда

$$\varphi = \frac{\alpha}{\rho c^2} = 13,385,$$

что близко къ табличному φ для $k^4 = 0,15$. Задаваясь поэтому $k^4 = 0,15$ и слѣд. табличнымъ $\varphi = 13,729$, находимъ соотвѣтственное

$$\rho = \frac{\alpha}{\varphi c^2} = 0,6825.$$

При $\quad k^4 = 0,15, \quad q_I = 1,2885 \quad$ и $\quad q_{II} = 0,01035$

Далѣе, находимъ по форм. 5 и 6:

$$N\frac{I_0}{z_0} = q_I\frac{\delta a^2 H^2}{4\rho R} \quad \text{и} \quad m\frac{I_1}{z_1} = q_{II}\frac{\delta \,.\, 2a \,.\, H^3}{R}$$

равные, при $R = 700$ килогр. на квад. сант.,

$$N\frac{I_0}{z_0} = 26558 \quad \text{и} \quad m\frac{I_1}{z_1} = 2729,7.$$

Выбирая изъ русскаго нормальнаго сортамента уголки 12×12 сант., при толщинѣ полокъ въ 1,6 сант., моментѣ инерціи относительно нейтральной оси $I_x = 470$, площади профиля $\omega = 36{,}02$ квадр. сант., разстояніи центра тяжести отъ подошвы полки 3,55 сант., находимъ разстояніе этого центра отъ нейтральной оси ригеля $\frac{34}{2} + 3{,}55 = 20{,}55$ сант., почему

$$\frac{1}{4} I_0 = 470 + 36{,}02 . \overline{20{,}55}^2 = 15681.$$

(отверстія заклепокъ, для упрощенія, не высчитаны)

и
$$\frac{I_0}{z_0} = \frac{4.15681}{29} = 2163.$$

Слѣдовательно число ригелей $N = \frac{26558}{2163}$ можетъ быть взято 12 или 13.

Принявъ пока $N = 12$, повѣримъ напряженіе ригелей по формулѣ (2). Таковое получается въ нашемъ заданіи

$$R = 705{,}6 \text{ килогр. на кв. сант.},$$

т. е. почти въ обрѣзъ допускаемое.

Если-бы, при такой повѣркѣ, R получилось значительно разнящимся отъ допускаемаго, то надлежало бы или увеличить число ригелей или измѣнить на столько процентовъ принятое для разсчета ρ, на сколько полученное R разнится отъ допускаемаго—и сдѣлать весь разсчетъ снова.

Для проектированія стоекъ слѣдуетъ подобрать соотвѣтственные уголки и, вычисливъ $\frac{I_1}{z_1}$, раздѣлить на эту величину найденное выше значеніе $m \frac{I_1}{z_1} = 2729{,}7$, откуда и получится необходимое число стоекъ m.

14) Разсчетъ подможнаго бруса для плотины отверстіемъ 3 саж., при подпорѣ 2 саж.

$$2a = 3^\circ = 252 \text{ дюйм.} \qquad H = 2^\circ = 168 \text{ дюйм}$$

Предполагая закрыть плотину щитами шириною 0,5 саж., поддержанными стойками, число пролетовъ (принимаемъ—стоекъ) будетъ $6 = 2m$.

Помѣщая подможный брусъ на $\eta = 0{,}400$, т. е. на высотѣ 67,2 дюйма отъ порога находимъ по форм. (57)

$$\alpha = \frac{z_0}{z_1} = c^2 \varphi = 2{,}2837$$

max. **M** въ стойкѣ вычисляемъ по формулѣ $\frac{a}{m} . \frac{H^3}{6} . \delta . \mathfrak{M}_h = 5971{,}5 = R \frac{I_1}{z_1}$, что при табличномъ $\mathfrak{M}_h = 0{,}17991$, $R = 30$ пуд. и $\frac{I_1}{z_1} = \frac{x^3}{6}$ даетъ $x = 10{,}6$ дюйма (стойка квадрат. сѣченія).

Подможный брусъ долженъ имѣть высоту (въ плоскости изгиба) $\alpha \cdot 10{,}6 = 24{,}2$ дюйма; опредѣляя по моменту силъ $\frac{a^2 H^2}{2} \cdot \delta \cdot \mathfrak{M}_o$, при табличномъ $\mathfrak{M}_o = 0.19589$, моментъ сопротивленія $= 43887$, находимъ размѣры подможнаго бруса, составленнаго изъ двухъ брусьевъ, сѣченіемъ, напр., $8 \times 16{,}07$ дюйм. со вставками толщиною 8,2 дюйма, противъ которыхъ могутъ быть помѣщены стойки (вся высота бруса будетъ $8 + 8{,}2 + 8 = 24{,}2$ дюйма).

Желая сдѣлать подможный брусъ изъ желѣза и полагая помѣстить его на той же высотѣ 67,2 дюйма отъ порога, вычисляемъ изъ графы 9—таблицы № 7 и по формулѣ (57)

$$\alpha = \varphi c^2 \frac{R_0}{R_1} \cdot \frac{E_1}{E_0},$$

положивъ для деревянныхъ стоекъ $R_1 = 30$ пуд. и $E_1 = 45.000$ и для желѣзнаго бруса $R_0 = 250$ и $E_0 = 780.000$,

$$\alpha = 1{,}098$$

слѣд. высота подможнаго бруса должна быть $1{,}098 \times 10{,}6 = 11{,}6$. Моментъ же сопротивленія долженъ быть $\frac{I_0}{z_0} = 175{,}55$. Балку такого момента сопротивленія высотою 11,6 дюйма, нетрудно построить изъ двойного тавра съ накладками или составить изъ уголковъ и листовъ.

Вѣсъ такой балки длиною 3 саж. будетъ около 90 пуд. Желая сдѣлать подможный брусъ большей высоты, т. е. взять α большее противу исчисленнаго выше, надо принять для стоекъ другой коэффиціентъ R,—меньшій, напр. если взять $R_1 = 24$ пуда, то стойки при квадратномъ сѣченіи будутъ въ 11,4 дюйма $\left(\frac{5971{,}5}{24} = \frac{x^3}{6}\right.$, откуда $\left.x = 11{,}4\right)$.

Отношеніе α будетъ тогда $\alpha = \varphi c^2 \frac{R'}{R} \cdot \frac{E_1}{E_0} = 1{,}372$ и высота подможнаго бруса $1{,}372 \times 11{,}4 = 15{,}5$ дюйм., при каковой высотѣ цѣльный двутавровый брусъ моментомъ сопротивленія 175,55 будетъ много легче предыдущаго составного.

15) Одностворчатое полотно, состоящее изъ жесткой рамы 200×320 дюймовъ, которая поддерживаетъ стойки высотою 200 дюйм., подпертыя однимъ ригелемъ.

Помѣстимъ ригель на $\eta = 0{,}405$ высоты, т. е. на $0{,}405 \times 200 = 81{,}5$ дюйма.

Тогда по форм. (57)

$$\alpha = \varphi c^2 = \left(\frac{160}{200}\right)^2 \cdot 4{,}0483 = 2{,}591.$$

Толщину полотенъ принимаемъ, какъ и выше, въ 0,1 пролета, т. е.

въ 32 дюйма, тогда дѣлая ригель двойной въ обхватъ стоекъ, толщина стоекъ будетъ 12,35 дюйм.

По форм. (56) имѣемъ для стоекъ:

$$max.\, M = a\,\frac{H^3}{6}\,\delta\ .\ 0{,}21775 = mR\,\frac{I_1}{z_1} = 30\,.\,\frac{\overline{12{,}35}^2}{6}\,m\,.\,b_1,$$

откуда $mb_1 = 60{,}9$.

Полагая число стоекъ $2m = 8$, находимъ ширину ихъ $b_1 = 15{,}225$ д. Для ригеля имѣемъ:

$$max.\, M = a^2\,\frac{H^2}{2}\ .\ \delta\ .\ 0{,}16676 = R\,\frac{I_0}{z_0} = 30\,\frac{32^3 - \overline{12{,}35}^3}{6.32}\,b_0$$

откуда $b_0 = 17{,}7$ дюйм.

Объемъ матеріала равенъ:

$$8 \times 12{,}35 \times 15{,}225 \times 200 + (32 - 12{,}35)\ 17{,}7 \times 320 = 412.100 \text{ кб. д.}$$

Для отысканія наивыгоднѣйшихъ размѣровъ надо сдѣлать такіе же расчеты для разныхъ η.

16) Такого же размѣра полотно съ жесткою рамою, стойками и двумя ригелями.

Задаваясь $\lambda_1 = 0{,}18$, находимъ слѣдующія величины почти точно удовлетворяющія формуламъ для полотенъ съ двумя ригелями

$\lambda_1 = 0{,}18$	$\lambda_2 = 0{,}396$	$\lambda_3 = 0{,}6481$
$\eta_1 = 0{,}28254\,.\,H$	$\eta_2 = 0{,}50916\,.\,H$	$\omega = 0{,}75824$
$= 56{,}51$ дюйм.	$= 101{,}83$ дюйм.	
$q_1 = 0{,}40551$	$q_2 = 0{,}31882$	$(an)^4 = 0{,}3588$
$\mathfrak{M}_{01} = 0{,}16286$	$\mathfrak{M}_{01} = 0{,}12779$	$\mathfrak{M}_h = 0{,}085536$
$\varphi_1 = 4{,}6687$	$\varphi_2 = 3{,}8071$	

Отсюда находимъ при $R_{01} = R_{02} = R_1$,

$$\alpha_1 = \frac{z_{01}}{z_1} = \varphi_1 c^2 = 3{,}0001 \qquad \alpha_2 = \frac{z_{02}}{z_1} = \varphi_2 c^2 = 2{,}4365.$$

Полагая сдѣлать полотна толщиною въ 0,1 пролета, т. е. $z_{01} = 32$ дюйма, находимъ $z_1 = \alpha_1\,.\,z_{01} = 10{,}66$ дюйм.

Примемъ для удобства конструкціи $z_1 = 10$ дюйм., при $z_{01} = 32$ дюйм., т. е. $\alpha_1 = 3{,}2$ вмѣсто 3,0001,—тогда надо по формулѣ $\alpha_1 = \varphi_1 c^2\,\frac{R_{01}}{R_1}$ найти R_1;—оно будетъ меньше принятаго прежде, а именно при $R_{01} = 30$ пуд., R_1 будетъ всего 28,126 пуд.

Для стоекъ имѣемъ формулу, при

$$max. M = a \cdot \frac{H^3}{6} \cdot \delta \cdot \mathfrak{M}_h = mR_1 \frac{I_1}{z_1} = mR_1 \frac{\overline{10}^2}{6} b_1$$

откуда $mb_1 = 38,926$.

Положивъ $m = 6$ получаемъ ширину стоекъ $b_1 = 6,5$ дюйм. (всѣхъ стоекъ должно быть $2m = 12$).

Затѣмъ ширину нижняго ригеля, состоящаго изъ двухъ брусьевъ толщиною въ 11 дюймовъ обхватывающихъ стойки, при $R_{01} = 30$ пудовъ, найдемъ изъ формулы

$$\frac{a^2 H^2}{2} \cdot \delta \mathfrak{M}_{01} = R_{01} \cdot \frac{I_{01}}{z_{01}} = 30 \cdot \frac{\overline{32}^3 - \overline{10}^3}{6 \cdot 32} \cdot b_1.$$

По подстановкѣ выходитъ $b_1 = 19,75$ дюйм.

Наконецъ для верхняго ригеля надо вычислить новое α_2, такъ какъ съ измѣненіемъ R_1 измѣнится и оно. При $R_{02} = 30$ пуд. будетъ:

$$\alpha_2 = \frac{z_{02}}{z_1} = \varphi_2 c^2 \frac{R_{02}}{R_1} = 2,5869,$$

т. е.

$$z_{02} = 25,869 \text{ дюйм.}$$

Примемъ $z_{02} = 26$ дюйм., т. е. $\alpha_2 = 2,6$, тогда $R_{02} = 30,014$ пуд., тогда по формулѣ

$$\frac{a^2 H^2}{2} \cdot \delta \mathfrak{M}_{02} = R_{02} \cdot \frac{I_{02}}{z_2} = R_{02} \cdot \frac{\overline{26}^3 - \overline{10}^3}{6 \cdot 26} \; b_2$$

находимъ $b_2 = 24,125$ дюйм.

Объемъ матеріала такихъ полотенъ:

$$2 \times 6 \times 10 \times 6,5 \times 200 + (32 - 10) . 19,75 \times 320 + (26 - 10) . 24.125 \times 320 =$$

$$= 418.560 \text{ куб. дюйм.}$$

Таблица № 1.

k^4	q_I	q_{II}	$\varphi=\frac{238}{k^4}\frac{q_{II}}{q_I}$	$\frac{q_I}{\varphi}$	$4q_{II}\varphi$	$4\frac{q_{II}}{q_I}\varphi$	$\frac{q_I}{\varphi}+4q_{II}$	$q_I+4\varphi q_{II}$	$\frac{q_I}{4q_{II}}$
0,10	1,319	0,0092	16,60046	0,07945	0,61090	0,46316	0,10625	1,92990	35,7600
0,20	1,258	0,0115	10,87838	0,11564	0,50040	0,39778	0,16164	1,75840	27,3478
0,40	1,156	0,0149	7,66912	0,15073	0,45708	0,39540	0,21033	1,61308	19,3960
0,60	1,079	0,0175	6,43343	0,16771	0,45034	0,41737	0,23771	1,52934	15,4143
0,80	1,016	0,0195	5,70989	0,17794	0,44537	0,43836	0,25594	1,46137	13,0156
1,00	0,972	0,0214	5,23992	0,18550	0,44867	0,46145	0,27110	1,42067	11,3551
1,20	0,936	0,0232	4,91595	0,19040	0,45620	0,48738	0,28320	1,39220	10,0862
1,40	0,907	0,0248	4,64830	0,19513	0,46110	0,50838	0,29433	1,36810	9,1431
1,60	0,881	0,0261	4,40678	0,19992	0,46006	0,52220	0,30432	1,34106	8,4387
1,80	0,856	0,0273	4,21690	0,20299	0,46048	0,53795	0,31219	1,31648	7,8388
2,00	0,835	0,0283	4,03317	0,20703	0,45655	0,54677	0,32023	1,29155	7,3763
2,20	0,817	0,0292	3,86648	0,21130	0,45160	0,55275	0,32810	1,26860	6,9949
2,40	0,802	0,0300	3,70950	0,21620	0,44513	0,55504	0,33620	1,24713	6,6833
2,60	0,788	0,0308	3,57790	0,22024	0,44080	0,55938	0,34344	1,22880	6,3961
2,80	0,779	0,0314	3,42620	0,22737	0,43033	0,55241	0,35296	1,20933	6,2022
3,00	0,771	0,0320	3,29269	0,23415	0,42146	0,54665	0,36215	1,19246	6,0234
3,20	0,764	0,0326	3,17359	0,24073	0,41384	0,54168	0,37113	1,17784	5,8589
3,40	0,756	0,0331	3,06481	0,24667	0,40578	0,53675	0,37907	1,16178	5,6968
3,60	0,750	0,0336	2,96178	0,25322	0,39807	0,53076	0,38762	1,14807	5,5803
3,80	0,744	0,0340	2,86220	0,25993	0,38924	0,52317	0,39593	1,13324	5,4706
4,00	0,739	0,0344	2,76969	0,26681	0,38112	0,51573	0,40441	1,12012	5,3706
4,20	0,737	0,0347	2,66802	0,27624	0,37033	0,50247	0,41504	1,10733	5,3098
4,40	0,735	0,0350	2,57576	0,28535	0,36060	0,49062	0,42535	1,09560	5,2500
4,60	0,734	0,0353	2,48830	0,29498	0,35134	0,47866	0,43618	1,08534	5,1983
4,80	0,733	0,0356	2,40811	0,30438	0,34292	0,46784	0,44678	1,07592	5,1475
5,00	0,732	0,0359	2,33448	0,31356	0,33523	0,45796	0,45716	1,06723	5,0975
5,50	0,737	0,0365	2,14309	0,34389	0,31288	0,42454	0,48989	1,04988	5,0456
6,00	0,750	0,0370	1,95689	0,38326	0,28962	0,38616	0,53126	1,03962	5,0676
6,50	0,767	0,0374	1,78542	0,42959	0,26710	0,34823	0,57919	1,03410	5,1270
7,00	0,785	0,0378	1,63722	0,47947	0,24755	0,31534	0,63067	1,03255	5,1918
7,50	0,798	0,0381	1,51509	0,52670	0,23090	0,28934	0,67910	1,02890	5,2362
8,00	0,810	0,0384	1,41037	0,57433	0,21663	0,26744	0,72793	1,02663	5,2734
9,00	0,831	0,0389	1,23789	0,67129	0,19262	0,23179	0,82689	1,02362	5,3406
10,00	0,851	0,0393	1,09910	0,77426	0,17278	0,20303	0,93146	1,02378	5,4127
11,00	0,864	0,0396	0,99167	0,87123	0,15708	0,18180	1,02963	1,02108	5,4545
12,00	0,877	0,0399	0,90234	0,97192	0,14401	0,16421	1,13152	1,02101	5,4950
13,00	0,887	0,0401	0,82766	1,07167	0,13276	0,14967	1,23207	1,01976	5,5172
14,00	0,897	0,0403	0,76377	1,17442	0,12312	0,13725	1,33562	1,02012	5,5645
15,00	0,907	0,0404	0,70674	1,28336	0,11421	0,12592	1,44496	1,02121	5,6136

Таблица № 2.

k^4	$\frac{q_I}{q_{II}}$	Значенія формулы: $\frac{1}{2}\cdot 4\varphi\frac{q_{II}}{q_I}\left[1+\varphi c^2+\sqrt{(1+\varphi c^2)^2+\frac{q_I}{q_{II}}c^2}\right]=L$ при								
		$c^2=0{,}2$	$c^2=0{,}3$	$c^2=0{,}4$	$c^2=0{,}5$	$c^2=0{,}6$	$c^2=0{,}7$	$c^2=0{,}8$	$c^2=0{,}9$	$c^2=1$
4,2	21,24	1,022								
4,4	21,00	0,9969								
4,6	20,79	0,9639								
4,8	20,59	0,9343	1,147							
5	20,39	0,9073	1,0766							
5,5	20,19	0,8266	0,9769							
6	20,27	0,7412	0,8726	0,9928						
6,5	20,51	0,6608	0,7753	0,8797	0,9782					
7	20,77	0,5924	0,6935	0,7850	0,8702	0,9509				
7,5	20,95	0,5395	0,6297	0,7113	0,7871	0,8583	0,9272	0,9931		
8	21,09	0,4952	0,5767	0,6503	0,7185	0,7828	0,8442	0,9032	0,9603	
9	21,36	0,4240	0,4926	0,5538	0,6103	0,6634	0,7139	0,7624	0,8092	0,8545
10	21,65	0,3687	0,4269	0,4787	0,5265	0,5713	0,6137	0,6543	0,6934	0,7313
11	21,82	0,3279	0,3787	0,4240	0,4656	0,5044	0,5412	0,5763	0,6101	0,6427
12	21,98	0,2945	0,3396	0,3796	0,4163	0,4505	0,4828	0,5135	0,5431	0,5716
13	22,12	0,2672	0,3076	0,3435	0,3762	0,4067	0,4355	0,4629	0,4891	0,5144
14	22,26	0,2441	0,2807	0,3131	0,3427	0,3701	0,3960	0,4206	0,4441	0,4667
15	22,45	0,2234	0,2566	0,2860	0,3127	0,3375	0,3608	0,3830	0,4042	0,4245

Таблица № 3.

Значенія формулы: $t=\sqrt[3]{4\frac{q_{II}}{q_I}\varphi}\left[\sqrt[3]{\varphi c^2+\sqrt{\varphi^2 c^4-\frac{1}{27}.\,4\frac{q_{II}}{q_I}\varphi}}+\sqrt[3]{\varphi c^2-\sqrt{\varphi^2 c^4-\frac{1}{27}.\,4\frac{q_{II}}{q_I}\varphi}}\right]$

при

4,4										
4,6	—	0,9818								
4,8	—	0,9665								
5	—	0,9524								
5,5	—	0,9084	0,9884							
6	—	0,8605	0,9337	0,9965						
6,5	—	0,8097	0,8790	0,9374	0,9886					
7	—	0,7650	0,8299	0,8845	0,9323	0,9751				
7,5	—	0,7281	0,7891	0,8407	0,8856	0,9262	0,9627	0,9965		
8	—	0,6959	0,7529	0,8023	0,8449	0,8831	0,9181	0,9524	0,9799	
9	—	0,6410	0,6930	0,7370	0,7756	0,8104	0,8420	0,8712	0,8982	0,9239
10	—	0,5943	0,6416	0,6818	0,7172	0,7488	0,7784	0,8044	0,8287	0,8524
11	—	0,5578	0,6015	0,6388	0,6714	0,7009	0,7278	0,7526	0,7759	0,7974
12	—	0,5261	0,5666	0,6012	0,6315	0,6589	0,6838	0,7068	0,7282	0,7485
13	—	0,4990	0,5368	0,5690	0,5975	0,6231	0,6464	0,6681	0,6882	0,7072
14	—	0,4749	0,5104	0,5407	0,5675	0,5916	0,6135	0,6340	0,6529	0,6707
15	—	0,4523	0,4856	0,5138	0,5393	0,5621	0,5828	0,6020	0,6199	0,6403

Таблица № 4.

k^4	Значенія формулы: $\left(\frac{q_i}{\varphi} + 4\,q_{ii}\right) + c^2\,(q_i + 4\,\varphi\,q_{ii})$ при								
	$c^2 = 0{,}2$	$c^2 = 0{,}3$	$c^2 = 0{,}4$	$c^2 = 0{,}5$	$c^2 = 0{,}6$	$c^2 = 0{,}7$	$c^2 = 0{,}8$	$c^2 = 0{,}9$	$c^2 = 1$
0,10	0,49223	0,68522	0,87821	1,07120	1.26419	1,45718	1,65017	1,84316	2,03615
0,20	0,51332	0,68916	0,86500	1,04084	1,21668	1,39252	1,56836	1,74420	1,92004
0,40	0,53295	0,69425	0,85556	1,01687	1,17818	1,33949	1,50079	1,66210	1,82341
0,60	0,54358	0,69651	0,84945	1,00238	1,15531	1,30825	1.46118	1,61412	1,76705
0,80	0,54821	0,69435	0,84049	0,98663	1,13276	1,27890	1,42504	1,57117	1,71731
1,00	0,55523	0.69730	0,83937	0,98144	1,12350	1,26557	1,40764	1,54970	1,69177
1,20	0,56164	0,70086	0,84008	0,97930	1,11852	1,25774	1,39696	1,53618	1,67540
1,40	0,56795	0,70476	0,84157	0,97838	1,11519	1,25200	1,38881	1,52562	1,66243
1,60	0,57253	0,70664	0,84074	0,97485	1,10896	1,24306	1,37717	1,51127	1,64538
1,80	0,57549	0,70713	0,83878	0,97043	1,10208	1,23373	1,36537	1,49702	1,62867
2,00	0,57854	0,70769	0,83685	0,96600	1,09516	1,22431	1,35347	1,48262	1,61178
2,20	0,58182	0,70868	0.83554	0,96240	1,08926	1.21612	1,34298	1,46984	1,59670
2,40	0,58563	0,71034	0,83505	0,95976	1,08448	1,20919	1,33390	1,45862	1,58333
2,60	0,58920	0.71208	**0.83496**	0,95784	1,08072	1,20360	1,32648	1,44936	1,57224
2,80	0,59483	0,71576	0,83669	**0,95763**	1,07856	1,19949	1,32042	1,44136	1,56229
3,00	0,60064	0,71989	0,83913	0,95838	1,07763	1,19687	1,31612	1,43536	1,55461
3,20	0,60670	0,72448	0,84227	0,96005	1,07783	1,19562	1,31340	1,43119	1,54897
3,40	0,61143	0,72760	0,84378	0,95996	**1,07614**	1,19332	1,30849	1,42467	1,54085
3,60	0,61723	0,73204	0,84685	0,96166	1,07646	1,19127	1,30608	1,42088	1,53569
3,80	0,62258	0,73590	0,84923	0,96255	1,07587	1,18920	1,30252	1,41585	1,52917
4,00	0,62843	0,74045	0,85246	0,96447	1,07648	**1,18849**	**1,30051**	1,41252	1,52453
4,20	0,63651	0,74724	0,85797	0,96871	1,07944	1,19017	1,30090	1,41164	1,52337
4,40	0,64447	0,75403	0,86359	0,97315	1,08271	1,19227	1,30183	**1,41139**	**1,52095**
4,60	0,65325	0,76178	0,87032	0,97885	1,08738	1,19592	1,30445	1,41299	1,52152
4,80	0,66196	0,76956	0,87715	0,98474	1,09233	1,19992	1,30752	1,41511	1,52270
5,00	0,67061	0,77733	0,88405	0,99078	1,09750	1,20422	1,31094	1,41767	1,52439
5,50	0,69987	0,80485	0,90984	1,01483	1,11982	1,22481	1,32979	1,43478	1,53977
6,00	0,73918	0,84315	0,94711	1,05107	1,15503	1,25899	1,36296	1,46692	1,57088
6,50	0,78601	0,88942	0,99283	1,09624	1,19965	1,30306	1,40647	1,50988	1,61329
7,00	0,83718	0,94044	1,04369	1,14695	1,25020	1,35346	1,45671	1,55997	1,66322
7,50	0,88488	0,98777	1,09066	1,19355	1,26944	1,39933	1,50222	1,60511	1,70800
8,00	0,93326	1,03592	1,13858	1,24125	1,34391	1,44657	1,54923	1,65190	1,75456
9,00	1,03161	1,13398	1,23634	1,33870	1,44106	1,54342	1,64579	1,74815	1,85051
10,00	1,13622	1,23859	1,34097	1,44335	1,54573	1,64811	1,75048	1,85286	1,95524
11,00	1,23385	1,33595	1,43806	1,54017	1,64228	1,74439	1,84649	1,94860	2,05071
12,00	1,33572	1,43782	1,53992	1,64202	1,71413	1,84623	1,94833	2,05043	2,15253
13,00	1,43602	1,53800	1,63998	1,74195	1,84393	1,94590	2,04788	2,14985	2,25183
14,00	1,53964	1,64166	1,74367	1,84568	1,94769	2,04970	2.15172	2,25373	2,35574
15,00	1,64920	1 75132	1,85344	1,95557	2,05769	2,15981	2,26193	2,36405	2,46617

Тоже — значенія $\left(\frac{q_i}{\varphi}\,t + 4\,q_{ii}\cdot\frac{1}{t}\right) + c^2\left(q_i + 4\,q_{ii}\,\varphi\cdot\frac{1}{t^2}\right)$ при $t = \frac{R_i}{R_0}$ изъ таблицы № 3.

15,00	1,23080	—	—	—	—	—	—	—	2,25969

Таблица № 5 (форм. 19)

для одиночныхъ ригелей.

$\alpha = \frac{z_0}{z_1}$	$\frac{\alpha^3 - 1}{\alpha}$	$\frac{1}{1+\alpha}$	$\frac{\alpha}{1+\alpha}$	$\theta = 14^0$ и $s = 0{,}2a$			$\theta = 18^1/_3{}^0$ и $s = 0{,}2a$		
				ρ	$\frac{1}{\rho^2}$	$\frac{\alpha}{\rho}$	ρ	$\frac{1}{\rho^2}$	$\frac{\alpha}{\rho}$
0,2	—	0,8333	0,1667	0,95733	1,0911	0,2089	0,96755	1,0682	0,2067
0,4	—	0,7143	0,2857	0,92904	1,1586	0,4306	0,94564	1,1183	0,4230
0,6	—	0,6250	0,3750	0,90681	1.2161	0,6617	0,92985	1,1566	0,6453
0,8	—	0,5556	0,4444	0,89379	1,2518	0,8951	0,91785	1,1870	0,8716
1,0	—	0,5000	0,5000	0,88208	1,2853	1,1337	0,90860	1,2113	1,1006
1,2	0,6067	0,4545	0,5455	0,87271	1,3130	1,3750	0,90110	1,2315	1,3104
1,4	1,2457	0,4167	0,5833	0,86507	1,3363	1,6184	0,89497	1,2485	1,5643
1,6	1,9350	0,3846	0,6154	0,85870	1,3562	1,8633	0,88983	1,2629	1,7981
1,8	2,6845	0,3571	0,6429	0,85332	1,3734	2,1094	0,88547	1,2754	2,0328
2,0	3,5000	0,3333	0,6667	0,84871	1,3883	2,3565	0,88174	1,2862	2,2682
2,2	4,3855	0,3125	0,6875	0,84472	1,4015	2,6044	0,87856	1,2955	2,5041
2,4	5,3433	0,2941	0,7059	0,84122	1,4131	2,8530	0,87645	1,3018	2,7383
2,6	6,3754	0,2778	0,7222	0,83814	1,4235	3,1021	0,87313	1,3117	2,9778
2,8	7,4829	0,2632	0,7368	0,83542	1,4328	3 3516	0,87091	1,3187	3,2150
3,0	8,6667	0,2500	0,7500	0,83296	1,4413	3,6016	0,86889	1,3245	3,4527
3,2	9,9275	0.2381	0,7619	0,83076	1,4489	3,8519	0,86708	1,3301	3,6905
3,4	11,2659	0,2273	0,7727	0,82877	1,4559	4,1025	0,86546	1,3351	3,9286
3,6	12,6822	0,2174	0,7826	0,82695	1,4623	4,3533	0,86397	1,3397	4,1668
3,8	14,1768	0,2083	0,7917	0,82529	1,4682	4.6044	0,86260	1,3439	4,4053
4,0	15,7500	0,2000	0,8000	0,82378	1,4736	4,8536	0,86138	1,3477	4,6437
4,2	17,4019	0,1923	0,8077	0,82239	1,4786	5,1106	0,86022	1,3514	4,8825
4,4	19,1327	0,1852	0,8148	0,82111	1,4832	5,3586	0,85916	1,3547	5,1213
4,6	20,9426	0,1786	0,8214	0,81992	1,4875	5,6103	0,85818	1,3578	5,3602
4,8	22,8317	0,1724	0,8276	0,81881	1,4915	5,8612	0,85727	1,3607	5,5992
5,0	24,8000	0,1667	0,8333	0,81779	1,4953	6,1146	0,85642	1,3634	5,8383

Таблица № 6

для одиночныхъ ригелей и стоекъ — сплошныхъ.

k^4	$\sqrt{q_I}$	$\sqrt{q_{II}}$	Значенія $\frac{1}{2}c\sqrt{q_I}+\sqrt{q_{II}}$ при							
			$c=0,3$	$c=0,4$	$c=0,5$	$c=0,6$	$c=0,7$	$c=0,8$	$c=0.9$	$c=1$
0,10	1,1485	0,0959	0,2682	0,3256	0,3830	0,4405	0,4979	0,5553	0,6127	0,6702
0,20	1,1216	0,1072	0,2754	0,3315	0,3876	0,4437	0,4998	0,5558	0,6119	0,6680
0,40	1,0762	0,1221	0,2835	0,3373	0,3912	0,4450	0,4988	0,5526	0,6064	0,6602
0,60	1,0387	0,1323	0,2881	0,3400	0,3920	0,4439	0,4958	0,5479	0,5997	0,6517
0,80	1,0080	0,1396	0,2908	0,3412	0,3916	0,4420	0,4924	0,5428	0,5932	0,6436
1,00	0,9859	0,1463	0,2942	0,3435	0,3928	0,4421	0,4914	0,5407	0,5900	0,6393
1,20	0,9675	0,1523	0,2974	0,3458	0,3942	0,4425	0,4909	0,5393	0,5876	0,6361
1,40	0,9524	0,1575	0,3004	0,3480	0,3956	0,4432	0,4908	0,5385	0,5861	0,6337
1,60	0,9386	0,1616	0,3024	0,3493	0,3963	0,4432	0,4901	0,5370	0,5840	0,6309
1,80	0,9252	0,1652	0,3040	0,3502	0,3965	0,4428	0,4890	0,5353	0,5815	0,6278
2,00	0,9138	0,1682	0,3053	0,3509	0,3967	0,4423	0,4880	0,5337	0,5794	0,6251
2,20	0,9039	0,1709	0,3065	0,3517	0,3969	0,4421	0,4873	0,5325	0,5777	0,6229
2,40	0,8955	0,1732	0,3075	0,3523	0,3971	0,4419	0.4866	0,5314	0,5762	0,6210
2,60	0,8877	0,1755	0,3087	0,3530	0,3974	0,4418	0,4862	0,5306	0,5750	0,6194
2,80	0,8826	0,1772	0,3096	0,3537	0,3978	0,4420	0,4861	0,5302	0,5744	0,6185
3,00	0,8777	0,1789	0,3106	0,3544	0,3983	0,4422	0,4861	0,5300	0,5739	0,6178
3,20	0,8741	0,1806	0,3117	0,3554	0,3992	0,4428	0,4862	0,5302	0,5739	0,6177
3,40	0,8695	0,1819	0,3123	0,3558	0,3993	0,4428	0,4862	0,5297	0,5732	0,6167
3,60	0,8660	0,1833	0,3132	0,3565	0,3998	0,4431	0,4864	0,5297	0,5730	0,6163
3,80	0,8626	0,1844	0,3138	0,3569	0,4001	0,4432	0,4863	0.5294	0,5726	0,6157
4,00	0,8597	0,1855	0,3145	0,3574	0,4004	0,4434	0,4864	0,5294	0,5724	0,6154
4,20	0,8585	0,1863	0,3151	0,3580	0,4009	0,4439	0,4868	0,5297	0,5726	0,6156
4,40	0,8573	0,1871	0,3157	0,3586	0,4014	0,4443	0,4872	0,5300	0,5729	0,6158
4,60	0,8567	0,1879	0,3164	0,3592	0,4021	0,4449	0,4877	0,5306	0,5734	0,6163
4,80	0,8562	0,1887	0,3170	0,3598	0,4026	0,4454	0,4882	0,5309	0,5737	0,6165
5,00	0,8556	0,1895	0,3178	0,3606	0,4034	0,4462	0,4890	0,5317	0,5745	0,6173
5,50	0,8585	0,1910	0,3198	0,3627	0,4056	0,4486	0,4915	0,5344	0,5773	0,6203
6,00	0,8660	0,1924	0,3223	0,3656	0,4089	0,4522	0,4955	0,5388	0,5821	0,6254
6,50	0,8758	0,1934	0,3248	0,3686	0,4124	0,4561	0,4999	0,5437	0,5875	0,6313
7,00	0,8860	0,1944	0,3273	0,3716	0,4159	0,4620	0,5045	0,5488	0,5931	0,6374
7,50	0,8933	0,1952	0,3292	0,3739	0,4185	0,4632	0,5079	0,5525	0,5972	0,6419
8,00	0,9000	0,1960	0,3310	0,3760	0,4210	0,4660	0,5110	0,5560	0,6010	0,6460
9,00	0,9116	0,1972	0,3339	0,3795	0,4251	0,4707	0,5163	0,5618	0,6074	0,6530
10,00	0,9225	0,1982	0,3366	0,3827	0,4288	0,4750	0,5211	0,5672	0,6133	0,6595
11,00	0,9295	0,1990	0,3384	0,3849	0,4314	0,4779	0,5243	0,5708	0,6173	0,6637
12,00	0,9365	0,1997	0,3402	0,3870	0,4338	0,4807	0,5275	0,5743	0,6211	0,6680
13,00	0,9418	0,2002	0,3415	0,3886	0,4357	0,4827	0,5298	0,5769	0,6240	0,6711
14,00	0,9471	0,2007	0,3428	0,3901	0,4375	0,4848	0,5322	0,5795	0,6269	0,6743
15,00	0,9524	0,2010	0,3439	0,3915	0,4391	0,4867	0,5343	0,5820	0,6296	0,6772

Таблица № 7.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
η	$\Omega = \omega \frac{\gamma}{\sigma}$	ω	$(an)^4 = \frac{3}{4} \cdot \frac{B}{\sigma}$	$B = mc^3 \frac{E_1 I_1}{E_0 I_0}$	$q = \frac{\gamma}{\sigma}$	$\mathfrak{M}_h$ (стойки).	$\mathfrak{M}_o$ (ригель).	$\varphi = \frac{1}{3B} \cdot \frac{\mathfrak{M}_h}{\mathfrak{M}_o}$
0,390	0,46780	0,70490	0,4622	0,03488 (8,5425543)	0,66364 (9,8219304)	0,11722 (9,0690017)	0,25228 (9,4018232)	4,4412 (0,6475029)
0,395	0,40072	0,60656	0,6862	0,05225 (8,7180944)	0,66064 (9,8199646)	0,14648 (9,1657641)	0,22446 (9,3511308)	4,1631 (0,6194176)
0,400	0,33143	0,50386	0,9818	0,07540 (8,8773842)	0,65778 (9,8180792)	0,17991 (9,2550505)	0,19589 (9,2920154)	4,0600 (0,6085296)
0,405	0,26004	0,39698	1,3886	0,10751 (9,0314665)	0,65505 (9,8162767)	0,21775 (9,3379622)	0,16676 (9,2221035)	4,0483 (0,6072709)
0,410	0,18763	0,28758	1,9723	0,15388 (9,1871863)	0,65244 (9,8145474)	0,25966 (9,4143984)	0,13643 (9,1348906)	4,1229 (0,6152002)
0,415	0,11366	0,17487	2,8931	0,22735 (9,3567038)	0,64997 (9,8128911)	0,30617 (9,4859569)	0,10563 (9,0227970)	4,2593 (0,6293348)
0,420	0,03978	0,06143	4,5209	0,35770 (9,5535185)	0,64761 (9,8113155)	0,35633 (9,5518468)	0,07436 (8,8713259)	4,4656 (0,6498811)

Примѣчаніе: Въ графахъ 5—9 числа даны вмѣстѣ съ логариѳмами,—послѣдніе въ скобкахъ.