

О напряжениях, возникающих при работе дефибрера в его частях.

Всем нам известно, что в дефибрерных камнях в их работе возникают самые разнообразные напряжения, которые иной раз бывают настолько значительны, что приводят к разрушению камня. Разрушение это обычно ограничивается трещинами в камне, иногда едва видимыми; во время замеченное появление их и смена камня предупреждают катастрофу. Но иногда это разрушение камня кончается разламыванием его на части во время работы и тогда авария почти неизбежно кончается поломкой других частей дефибрера.

Такое же разрушение дефибрера влечет за собой поломка хотя бы одной из боковых шайб, применяемых при распространенном способе укрепления камня на валу дефибрера зажимом его между двумя большими чугунными или стальными шайбами, навинчиваемыми на вал дефибрера в противоположных направлениях.

Ниже мы попытаемся на частном примере из практики осветить несколько вопросов о напряжениях, возникающих при работе дефибрера в его частях, а именно, примерно подсчитать те внутренние напряжения, какие могут возникнуть, как в самом камне, так и, главным образом, в указанных выше боковых шайбах. Считаем необходимым оговориться, что все подсчеты не могут претендовать на точность; в некоторых случаях допущены предположения, далеко не соответствующие действительности; оправданием служит то, что целью данной статьи является только выяснение порядка величины возникающих внутренних напряжений в некоторых частях дефибрера, зависимости их от способа укрепления камня на валу и тщательности и точности работы посадки камня на вал, и указание способа подсчета надежности существующей конструкции укрепления камня на валу.

Четырехпрессовой гидравлический дефибрер имел камень диаметром 1.600 мм. и шириной 760 мм., при скорости 200 оборотов в минуту.

Окружная скорость камня

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} = \frac{3,14 \cdot 1,6 \cdot 200}{60} = 16,75 \text{ метр/сек.}$$

По формуле проф. Грюблера напряжение в камне от центробежной силы определится из уравнения

$$S_{max} = 0,0076 \cdot \gamma \cdot V^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right]$$

где γ — удельный вес камня, равный 2,3.

Следовательно, в нашем случае

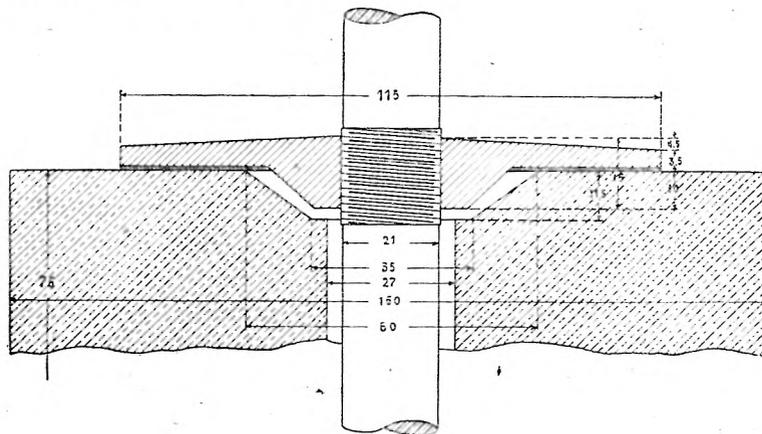
$$S_{max} = 0,0076 \cdot 2,3 \cdot 16,75^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{0,27}{1,6} \right)^2 \right] = 4,95 \text{ кгр./см.}^2$$

Полученные за последнее время Центробумтрестом заграничные камни, ломок близ Пирна (Саксония), — песчаники светлосерого цвета с желтоватыми прослойками, мелкозернистого неоднородного строения, слабые на излом. По данным проф. Кирхнера, докт. Гартига и проф. Грюблера разрывное усилие для таких камней, вероятно, не более 20 кгр/кв. см и мы имеем, следовательно, не более, чем $\frac{20}{4,95}$ или четырехкратную прочность.

При такой степени прочности имеют особое значение осторожная и целесообразная обработка сырого камня, правильная форма его после обработки, правильная посадка его на вал и самая установка вала с камнем в дефибрере.

Понятно также, насколько понижают эту степень надежности и как часто вызывают поломку камня, сейчас же после пуска его в работу, те незначительные, незаметные на глаз, трещины, которые почти неизбежны в естественных камнях вышеуказанной структуры, даже при самой тщательной отборке камня и осторожной обработке его.

Скрепление камня с валом и размеры боковых шайб видны из нижеследующих эскизов. (фиг. 1 и 2).



Фиг. 1.

Шайбы навинчиванием на вал должны прижиматься к камню с такой силой, чтобы возникающие от этого силы трения между шайбами и камнем (через посредство упругих прокладок) не только

уравновешивали действие веса камня и соответствующих слагающих сил давлений, производимых поршнями гидравлических прессов, но и давали еще движущий момент, больший сопротивляющегося вращению камня момента касательных сил, возникающих на наружной цилиндрической поверхности камня от давления на него скалок.

Вес камня будет приблизительно

$$G = \frac{3,14 \cdot (1,6^2 - 0,27^2)}{4} \cdot 0,76 \cdot 2,300 = \sim 3.500 \text{ кгр.}$$

Сумма вертикальных слагающих давлений от прессов будет, при диаметре поршней 300 мм и давлении воды $3\frac{1}{2}$ атм.,

$$P = \frac{3,14 \cdot 30^2 \cdot 1,03 \cdot 3,5}{4} (2 \sin 22,5^\circ + 2 \sin 67,5^\circ) = \sim 7.500 \text{ кгр.}$$

При полной нагрузке дефибрер расходует до 450 лошадин. сил, следовательно, движущий момент

$$M = \frac{71.620 \times N}{n} = \frac{71.620 \times 450}{200} = 161.145 \text{ кгр. см.}$$

Сила Q , с которой шайба должна прижиматься к камню, определится из выражения

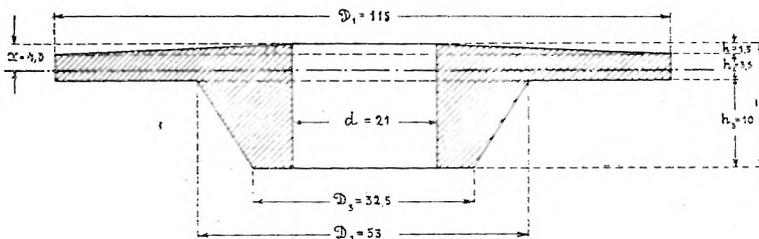
$$\mu \cdot Q - \frac{G + P}{2} \geq \frac{M}{X},$$

где $\mu = 0,46$ — общий коэффициент трения между шайбой и камнем и X — расстояние точки приложения равнодействующей этих сил трения от оси шайбы.

Следовательно,

$$Q \geq \frac{\frac{3500 + 7500}{2} + \frac{161.145}{X}}{\mu} \geq \left(12000 + \frac{350.000}{X} \right)$$

Определим моменты сопротивлений поперечных сечений шайбы: среднего и *mitt*.



Фиг. 2.

Расстояние x нейтрального слоя определится из уравнения:

$$\left[\frac{D_1 - d}{2} \cdot h_1 + (D_1 - d) \cdot h_2 + \frac{D_2 + D_3}{2} \cdot h_3 - d \cdot h_3 \right] \cdot x = \frac{D_1 - d}{3} \cdot h_1^2 + (D_1 - d) \cdot \left(\frac{h_2}{2} + h_1 \right) \cdot h_2 + \left(\frac{D_2 + D_3}{2} \cdot h_3 - d \cdot h_3 \right) \cdot \left(\frac{h_3}{3} \cdot \frac{D_2 + 2D_3 - 3d}{D_2 + D_3 - 2d} + h_2 + h_1 \right)$$

откуда

$$x = \frac{(115 - 21) \cdot (2 \cdot 1,5^2 + 3 \cdot 3,5^2) + (53 + 2 \cdot 32,5 - 3 \cdot 21) \cdot 10^2}{3[(115 - 21) \cdot (1,5 + 2 \cdot 3,5) + (53 + 32,5 - 2 \cdot 21) \cdot 10]} +$$

$$+ \frac{3 \cdot (53 + 32,5 - 2 \cdot 21) \cdot (1,5 + 3,5) \cdot 10}{3[(115 - 21) \cdot (1,5 + 2 \cdot 3,5) + (53 + 32,5 - 2 \cdot 21) \cdot 10]} = 4,3 \text{ см.}$$

Момент инерции сечения будет:

$$W = \frac{D_1 - d}{3} \cdot x^3 - \left[\frac{D_1 - d}{36} \cdot h_1^3 + \frac{D_1 - d}{2} \cdot h_1 \cdot \left(x - \frac{h_1}{3}\right)^2 \right] + \frac{(D_1 - d) \cdot (h_1 + h_2 - x)^3}{3} +$$

$$+ \frac{D_2 - d}{12} \cdot h_3^3 + (D_2 - d) \cdot h_3 \cdot \left(\frac{h_3}{2} + h_1 + h_2 - x\right)^2 - \left[\frac{1}{36} \cdot \frac{D_2 - D_3}{2} \cdot h_3^3 \cdot 2 + \right.$$

$$\left. + \frac{D_2 - D_3}{2} \cdot \frac{h_3}{2} \cdot \left(\frac{2}{3} h_3 + h_1 + h_2 - x\right)^2 \right]$$

или

$$W = \frac{94 \cdot 4,3^3}{3} - \left[\frac{94 \cdot 1,5^3}{36} + \frac{94 \cdot 1,5}{2} \cdot 3,8^2 \right] + \frac{94 \cdot 0,7^3}{3} + \frac{32 \cdot 10^3}{12} + 32 \cdot 10 \cdot 5,7^2 -$$

$$- \left[\frac{20,5 \cdot 10^3}{36} + \frac{20,5 \cdot 10}{2} \cdot 7,37^2 \right]$$

или $W = 8.400.$

и момент сопротивления

$$J = \frac{8.400}{15 - x} = \frac{8.400}{10,7} = \sim 785.$$

Для сечения „тп“

$$J' = \frac{102 \cdot 4}{6} = 272.$$

Для упрощения подсчетов мы будем предполагать, что давление от шайб на камень распределяется симметрично и равномерно по площади соприкосновения шайб с камнем.

Рассмотрим некоторые из возможных случаев соприкосновения шайбы с камнем, показанные на фиг. 3, 4, 5 и 6.

(На фигурах площади соприкосновения шайбы с камнем заштрихованы).

Фиг. 3.—Расстояние центра тяжести площади полукольца

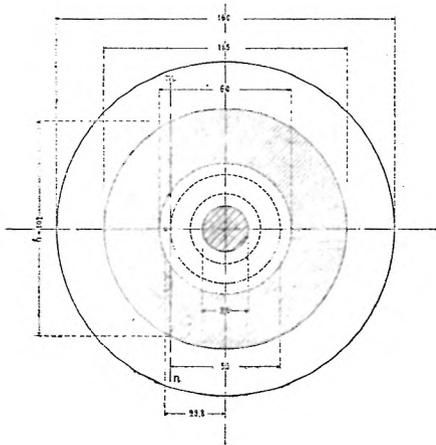
$$X = \frac{4}{3} \cdot \frac{57,5^3 - 30^3}{57,5^2 - 30^2} = 23,8 \text{ см.}$$

Следовательно,

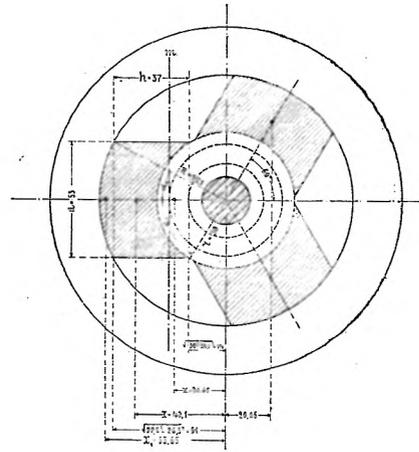
$$Q \geq 12.000 + \frac{350.000}{28,8} = 24.000 \text{ кгр.}$$

Момент внешних сил, изгибающих шайбу, относительно среднего сечения ее будет:

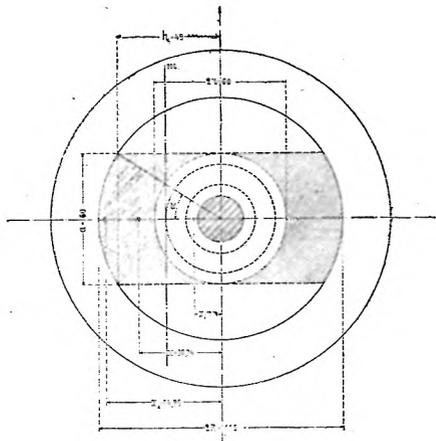
$$M = \frac{24.000}{2} \cdot \left[28,8 - \frac{21}{3,14} \right] = 265.200$$



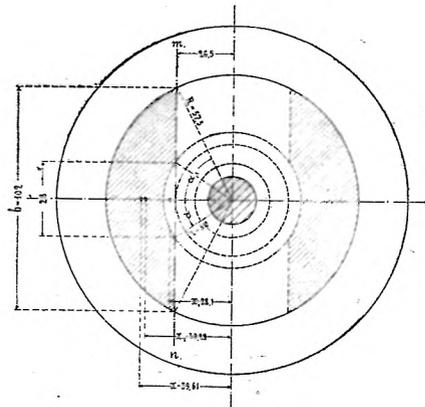
Фиг. 3.



Фиг. 4.



Фиг. 5.



Фиг. 6.

и относительно сечения mn^a

$$M = \frac{24.000}{2} \cdot [28,8 - 26,5] = 27.600$$

и внутренние напряжения от изгиба растянутых слоев

$$K = \frac{M}{J} = \frac{265.200}{785} = 338 \text{ кгр/см}^2 \text{ и } K' = \frac{27.600}{272} = 102 \text{ кгр/см}^2$$

Фиг. 4.—Расстояние центра тяжести площади наружного сегмента

$$X = \frac{4}{3} \cdot \frac{R \cdot \sin^3 \alpha_2}{2 \cdot \frac{\alpha_2^\circ}{180} \cdot \pi - \sin 2\alpha_2},$$

где

$$\sin \alpha_2 = \frac{26,5}{57,5} = 0,461 \text{ и } \alpha_2 = 27^\circ 27'$$

$$\sin 2\alpha_2 = \sin 54^\circ 54' = 0,818$$

следовательно,

$$X_2 = \frac{4}{3} \cdot \frac{57,5 \cdot 0,461^3}{2 \cdot \frac{27,45}{180} \cdot 3,14 - 0,818} = 53,65 \text{ см.}$$

Расстояние центра тяжести площади внутреннего сегмента

$$X_1 = \frac{4}{3} \cdot \frac{r \cdot \sin^3 \alpha_1}{2 \cdot \frac{\alpha_1^\circ}{180} \cdot \pi - \sin 2\alpha_1},$$

где

$$\sin \alpha_1 = \frac{26,5}{30} = 0,883 \text{ и } \alpha_1 = 62^\circ 3'$$

$$\sin 2\alpha_1 = \sin 124^\circ 6' = 0,828$$

следовательно,

$$X_1 = \frac{4}{3} \cdot \frac{30 \cdot 0,883^3}{2 \cdot \frac{62,05}{180} \cdot 3,14 - 828} = 20,65 \text{ см.}$$

Площадь наружного сегмента

$$F_2 = \frac{1}{2} \cdot 57,5^2 \cdot \left(2 \cdot \frac{27,45}{180} \cdot 3,14 - 0,818 \right) = 231 \text{ см}^2$$

Площадь внутреннего сегмента

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot 30^2 \cdot \left(2 \cdot \frac{62,05}{180} \cdot 3,14 - 828 \right) = 602 \text{ см}^2$$

Следовательно

$$X = \frac{231 \cdot 53,65 + 37 \cdot 53 \cdot \left(\frac{37}{2} + 14 \right) - 602 \cdot 20,65}{231 + 37 \cdot 53 - 602} = 40,1 \text{ см.}$$

$$\text{и } Q = 12 \cdot 000 + \frac{350 \cdot 000}{40,1} = 21 \cdot 000 \text{ кгр.}$$

— 437 —

$$M = \frac{21.000}{3} \cdot 40,1 - \frac{21.000}{2} \cdot \frac{21}{3,14} = 210.350$$

$$M' = \frac{21.000}{3} \cdot (40,1 - 26,5) = 95.200$$

и $K = \frac{210.350}{785} = 268 \text{ кгр/см}^2$ и $K' = \frac{95.200}{272} = 350 \text{ кгр/см}^2$.

Фиг. 5. $\sin \alpha = \frac{60}{115} = 0,552$ и $\alpha = 31^\circ 27'$

$$\sin 2\alpha = \sin 62^\circ 54' = 0,890$$

Следовательно,

$$X_2 = \frac{4}{3} \cdot \frac{57,5 \cdot 0,522^3}{2 \cdot \frac{31,45}{180} \cdot 3,14 - 0,890} = 54,25 \text{ см.}$$

Расстояние центра тяжести площади полукруга диаметром 60 см.

$$X_1 = \frac{4}{3} \cdot \frac{r}{\pi} = \frac{4}{3} \cdot \frac{30}{3,14} = 12,74 \text{ см.}$$

Площадь сегмента радиуса R :

$$F_2 = \frac{1}{2} \cdot 57,5^2 \cdot \left[2 \cdot \frac{31,45}{180} \cdot 3,14 - 0,890 \right] = 331 \text{ см}^2$$

Площадь полукруга радиуса r :

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot 3,14 \cdot 30^2 = 1413 \text{ см}^2$$

кроме того

$$h = \sqrt{57,5^2 - 30^2} = 49 \text{ и}$$

расстояние центра тяжести заштрихованной левой площади

$$X = \frac{331 \cdot 54,25 + 60 \cdot 49 \cdot 24,5 - 1413 \cdot 12,74}{331 + 60 \cdot 49 - 1413} = 38,74 \text{ см.}$$

Следовательно,

$$Q = 12.000 + \frac{350.000}{38,74} = 21.000 \text{ кгр.}$$

$$M = \frac{21.000}{2} \cdot [38,74 - 6,7] = 336.000 \text{ кгр. см.}$$

$$M' = \frac{21.000}{2} \cdot [38,74 - 26,5] = 128.520 \text{ кгр. см.}$$

$$K = \frac{336.000}{785} = 428 \text{ кгр/см}^2 \text{ и } K' = \frac{128.520}{272} = 473 \text{ кгр/см}^2$$

Фиг. 6. $\sin \alpha_2 = \frac{51}{57,5} = 0,887$ и $\alpha_2 = 62^\circ 30'$

$$\sin 2\alpha_2 = \sin 125^\circ = 0,819$$

Расстояние центра тяжести площади наружного сегмента

$$X_2 = \frac{4}{3} \cdot \frac{57,5 \cdot 0,887^3}{2 \cdot \frac{62,5}{180} \cdot 3,14 - 0,819} = 39,29 \text{ см.}$$

затем

$$\sin \alpha_1 = \frac{14}{30} = 0,467 \text{ и } \alpha_1 = 27^\circ 51' \text{ и } \sin 55^\circ 42' = 0,826$$

следовательно

$$X_1 = \frac{4}{3} \cdot \frac{30 \cdot 0,467^3}{2 \cdot \frac{27,85}{180} \cdot 3,14 - 0,826} = 28,1 \text{ см.}$$

Площади сегментов:

$$F_2 = \frac{1}{2} \cdot 57,5^2 \cdot \left[2 \cdot \frac{65,5}{180} \cdot 3,14 - 0,819 \right] = 2251 \text{ см.}^2$$

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot 30^2 \cdot \left[2 \cdot \frac{27,85}{180} \cdot 3,14 - 0,826 \right] = 65 \text{ см.}^2$$

Следовательно

$$X = \frac{2251 \cdot 39,28 - 65 \cdot 28,1}{2251 - 65} = 39,61 \text{ см.}$$

$$\text{и } Q = 12 \cdot 000 + \frac{350 \cdot 000}{39,61} = 21 \cdot 000 \text{ кгр.}$$

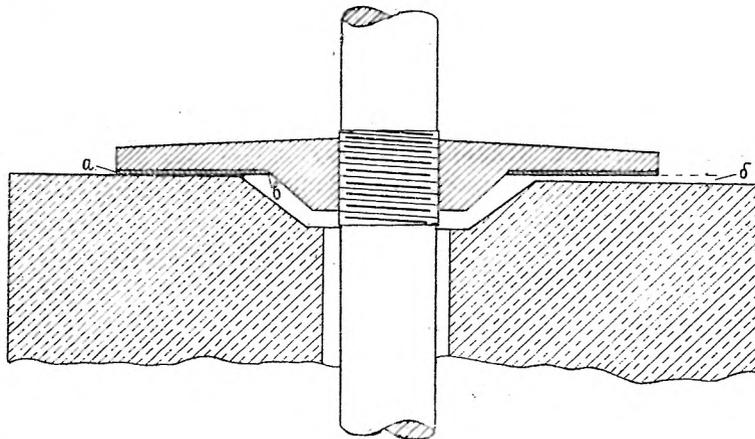
$$M = \frac{21 \cdot 000}{2} \cdot [39,61 - 6,7] = 345 \cdot 550 \text{ кгр. см.}$$

$$M' = \frac{21 \cdot 000}{2} \cdot [39,61 - 26,5] = 137 \cdot 655 \text{ кгр. см.}$$

$$\text{и } K = 440 \text{ кгр/см.}^2 \text{ и } K' = 506 \text{ кгр/см.}^2$$

Возможны случаи, что при посадке камня на вал, шайба (или обе шайбы) в первый момент прикоснется к камню односторонне; это может произойти или оттого, что ось вала не перпендикулярна к боковой поверхности камня, или шайба сидит на валу не перпендикулярно к его оси, или упругая прокладка между шайбой и камнем клиновидна; во всяком случае такое, хотя бы незначительное, одностороннее прилегание шайбы к камню при посадке его на вал вполне возможно, а такая даже незначительная неправильность прилегания

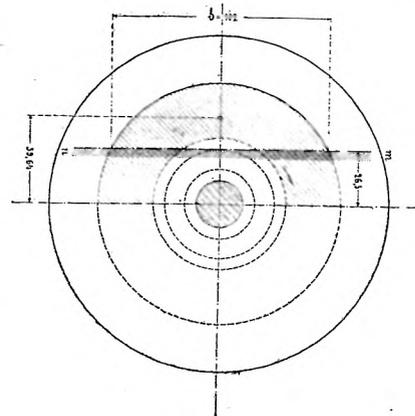
шайбы к камню, незаметная даже для глаза, кроме изгиба вала вызовет, вследствие неравномерного распределения давления, также значительно большее внутреннее напряжение в шайбе. Допустим, что одна из шайб, по той или другой причине, при начале завинчивания имела положение, указанное в преувеличенном виде на фиг. 7.



Фиг. 7.

Шайба касается камня только одним краем „а“; по мере дальнейшего завинчивания шайбы часть ее „ав“ будет отгибаться кверху и площадь соприкосновения ее с камнем будет увеличиваться и, наконец, шайба ляжет на камень всей своей левой частью, касаясь камня кольцевой поверхностью.

Часть этой левой половины шайбы, а именно до сечения „mn“, можно рассматривать с достаточной для нас точностью, как балку, закрепленную одним своим концом (по хорде „mn“) и подверженную действию силы A (реакция от камня), равномерно распределенной по наружной кольцевой части ее, заштрихованной на фиг. 8.



Фиг. 8.

Величина этой реакции камня A , иначе говоря, величина той силы, с которой при таком положении шайба прижимается к камню, может быть достаточно точно определена для данной шайбы и для каждого ее такого положения путем сложных вычислений на основании свойств упругой линии в зависимости от первоначальной величины δ , профиля шайбы и свойств материала шайбы.

Для нашей цели достаточно знать ее вероятную минимальную величину. Допустим, что эта сила A менее вычисленной ранее силы

Q ; в таком случае камень при работе начнет скользить и шайба будет навинчиваться далее, площадь соприкосновения шайбы с камнем перейдет на правую часть кольцевой поверхности и, наконец, вследствие изгиба вала и самой шайбы, последняя прикоснется к камню всей своей кольцевой поверхностью. Если и в этом положении шайба прижималась бы к камню с силой, меньшей Q , то навинчивание шайбы продолжалось бы далее, до тех пор, пока сила нажатия шайбы к камню не достигла бы величины Q . Очевидно, что в таком случае это давление распределялось бы по кольцевой поверхности соприкосновения шайбы уже неравномерно, и левая ее часть прижималась бы к камню с силой значительно большей, чем $Q/2$ и, следовательно, определенные по этому давлению внутренние напряжения в шайбе наверно будут меньше действительных.

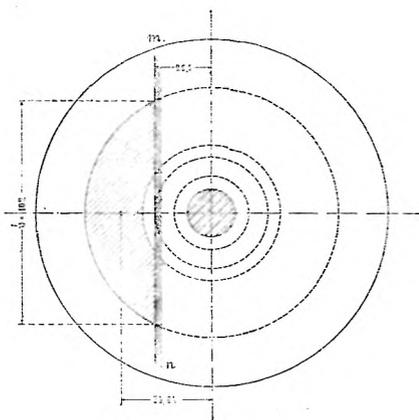
Итак, примем, что $A = 12.000$ кгр. и что давление это распределяется равномерно по всей поверхности полукольца; тогда на часть этого полукольца до сечения „ mn “ придется давление

$$A' = 12.000 \cdot \frac{2249 - 69}{3,14 \frac{(115^2 - 60^2)}{4}} \cdot \frac{1}{2} = 7000 \text{ кгр. и для сечения „}mn\text{“}$$

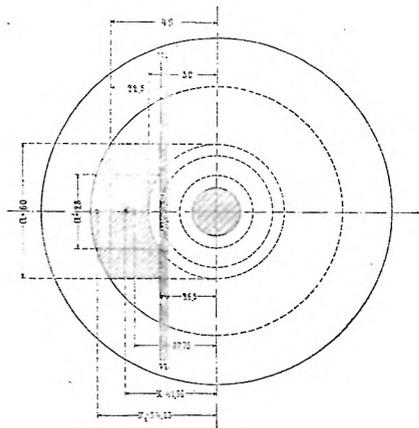
$$M' = 7000 \cdot [39,64 - 26,5] = 91.980 \text{ и } K' = 338 \text{ кгр/см.}^2$$

Если шайба, как мы допускали выше, прикасается к камню и в этом случае не всей кольцевой поверхностью, а только местами, например, как показано на фиг. 9, то для того же сечения „ mn “ в этом случае

$$M' = 12.000 \cdot [39,64 - 26,5] = 157.680 \text{ и } K' = 580 \text{ кгр/см.}^2$$



Фиг. 9.



Фиг. 10.

В случае соприкосновения шайбы с камнем по фиг. 10 площадь соприкосновения будет

$$F = 331 + 22,5 \cdot 60 - 69 = 1612 \text{ см. и}$$

$$X = \frac{331 \cdot 54,25 + 22,5 \cdot 60 \cdot 37,75 - 69 \cdot 27,87}{331 + 22,5 \cdot 60 - 69} = 41,56$$

и, следовательно,

$$A = \frac{12 \cdot 000 \cdot 1612}{1858} = 10 \cdot 410 \text{ кгр. и}$$

$$M' = 10 \cdot 410 \cdot [41,56 - 26,5] = 156 \cdot 600 \text{ и } K' = 576 \text{ кгр/см.}^2$$

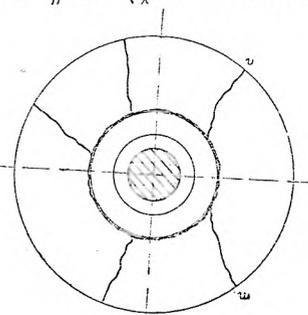
Величина A зависит от первоначальной величины δ и упругости материала шайбы; возможны случаи, что она достигнет значения Q уже при том положении шайбы, когда последняя соприкасается с камнем еще только левой своей половиной; в этом случае внутренние напряжения получатся значительно больше определенных выше и даже близкие к разрушающим.

В нижеследующей таблице (фиг. 11) сведены полученные напряжения.

Напряжения в кг/см. ²	Схема нагрузки.	3	4	5	6	8	9	10
K		338	268	428	440	—	—	—
K'		102	350	473	506	338	580	576

Фиг. 11.

Сопоставляя полученные величины внутренних напряжений, мы видим, что наиболее опасным является сечение „*mn*“ (фиг. 12 показывает вероятный излом шайбы) и насколько эти напряжения зависят от правильности прилегания шайб к камню; они наименьшие в случае соприкасания шайбы с камнем по всей кольцевой поверхности и резко увеличиваются, особенно для сечения „*mn*“, в случае соприкасания шайбы местами или односторонне; отсюда понятно, какое значение имеет способ укрепления камня на валу, с запасом взятые размеры шайб и тщательная, умелая и правильная посадка камня на вал.



Фиг. 12.

Если мы примем временное сопротивление на растяжение (разрушающий груз) для стальной отливки в 3500 кгр/см.^2 , то для шайб нашего дефибрера степень надежности против излома можно считать от 3-х до $10\frac{1}{2}$ кратной.

Р. Э.