С. К. Конюхов, проф. СТИ.

Расчет металлических резервуаров по Штиглицу.

Резервуары большой емкости встречаются чаще всего в химической технике. Ими пользуемся мы для хранения весьма многих ценных химических жидкостей и газов: керосин, нефть, мазут, бензин, смазочные масла, растительные масла, ворвань, жиры, аммиачная вода, щелочи, патока, серная кислота, вода и т. д. Наиболее излюбленным типом резервуаров является открытый или закрытый цилиндр с плоским или вогнутым дном. Ось цилиндра обычно располагается вертикально. Чаще все же встречаются резервуары с плоским дном, вероятно, потому, что их изготовление дешевле и весом они легче.

Хорошим примером распространения резервуаров для нужд общественного пользования могут служить водонапорные баки городских водопроводных и железнодорожных станций, газовые заводы.

Резервуары строятся и небольших размеров, меньше 100 куб. метров емкостью, и очень солидные свыше 15.000 куб. метров.

Каковы бы ни были основные размеры таких резервуаров, в основу их построения должен быть положен принцип наименьшего расхода строительного материала при заданной емкости.

Сначала рассмотрим резервуары, емкость которых не превышает 700 куб. метров.

Пусть кубатура боковых стенок и дна такого резервуара будет H куб. метров, а емкость J куб. метров. Надобно так спроектировать этот резервуар, чтобы $\frac{H}{J}$ достигало наименьшей величины.

Если высоту резервуара обозначить через h, диаметр основания через D, толщину стенки боковой поверхности через S_1, а толщину дна через S_2, то можно будет написать два основных геометрических уравнения.

$$H = \pi D h S_1 + \frac{\pi D^2}{4} S_2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

$$J = \frac{\pi D^2}{4} h \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

Из этих уравнений легко получается, путем исключения h, следующее

$$H = \frac{4 J S_1}{D} + \frac{\pi D_2}{4} S_2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

Исследуем функцию H в зависимости от D для нахождения ее минимума.

$$\frac{dH}{dD} = -\frac{4 J S_1}{D^2} + \frac{\pi D S_2}{2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

$$D = 2 \sqrt[3]{\frac{J S_1}{\pi S_2}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

Здесь предполагается, что резервуар не имеет ни рантовых уголков, ни накладок, ни нахлесток, ни заклепок, т. е. как будто он сварен из одного куска. Однако такие большие резервуары не везде могут изготовить сваркой,

а по старинке клепают их. При заклепочном соединении вес резервуара увеличится примерно на 8%. Это и будем иметь в виду.

Пример 1. Найти диаметр и высоту открытого цилиндрического железного резервуара с емкостью $J = 700$ куб. метров. Резервуар предназначен для воды и имеет толщину стенок $S_1 = 6$ мм., а толщину плоского дна $S_2 = 5$ мм. Сейчас же можно будет написать, пользуясь уравнением (5)

$$D = 2\sqrt[3]{\frac{700\,6}{\pi \cdot 5}} = 12{,}886 = 12{,}9 \text{ метра;}$$

$$h = \frac{4\,J}{\pi\,D^2} = \frac{4 \cdot 700}{3{,}14 \cdot 12{,}9^2} = 5{,}36 \text{ метра} = 5{,}4 \text{ метра.}$$

Если в уравнении (5) заменить J через $\frac{\pi D^2 h}{4}$, то получим легко такое соотношение

$$D/_2 : h = S_1 : S_2 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (6)$$

Таким образом, у открытого резервуара цилиндрической формы с наивыгоднейшими размерами радиус основания так относится к высоте резервуара, как толщина боковой стенки относится к толщине дна. Если $S_1 = S_2$, то $D = 2\,h$. Резервуар должен быть приземистый, не высокий.

Если у сосуда или резервуара основанием служит квадрат со стороною a, то вывод остается таким же

$$a/_2 : h = S_2 : S_2 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (5)$$

Пусть теперь сосуд будет закрытым и опять цилиндрической формы. Введем в расчет крышку, пользуясь тем же уравнением (5). Так как по крышке производится не редко перемещение людей, то ее делают обычно выпуклой с высотой стрелы от $^1/_{10}$ до $^1/_{12}$ диаметра основания. Толщину железа для крышки обозначим через S_3. Тогда на нее пойдет материала

$$\left(\frac{D^2}{4} + f^2\right)\pi S_3 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (8),$$

где f стрела свода.

Если $f = \frac{D}{10}$, то на квадратный метр основной площади резервуара придется толщина

$$S_3' = 1{,}04\,S_3 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (9)$$

Если $f = \frac{D}{12}$, то

$$S_3' = 1{,}028\,S_3 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (10)$$

У крышки снизу делается стяжка на подобие стропил Шведлера. Вес этой стяжки зависит от величины диаметра резервуара и колеблется в пределах от 12 до 35 килограммов на квадратный метр основной площади. Если представить, что вес этой стропильной стяжки заменен весом фиктивного круга с диаметром D и толщиною S_4, то практически вес стяжки находится так. Пусть, напр., вес стропильной фермы под крышку резервуара выбран в 16 кгр./кв. метр основной площади. Принимая кругло удельный вес железа равным 8, получаем толщину

$$S_4 = \frac{16}{8} = 2 \text{ мм.}$$

Пример. Рассчитать диаметр и высоту резервуара для хранения керосина с емкостью $J = 600$ куб. метров. Толщина стенок $S_1 = 5$ мм. дна $S_2 = 6$ мм., крыши 2,5 мм. $= S_3$ и вес стропил 16 кгр./квадратный метр основной площади.

Итак, имеем

$$S_1 - = 5 \text{ мм.}; \; S_2 = 6 \text{ мм.}, \; S_3' = 1{,}04\, S_3 = 1{,}04 \times 2.5 = 2{,}6$$

$$\text{и } S_4 = \frac{16}{8} = 2 \text{ мм.}$$

Следовательно,

$$S_2 + S_3' + S_4 = 6 + 2{,}6 + 2 = 10{,}6 \text{ мм.}$$

А тогда

$$D = 2\sqrt[3]{\frac{600.5}{\pi.10.6}} = 2\sqrt[3]{90} = 8{,}963 = 9 \text{ мтр.}$$

$$h = \frac{9.10{,}6}{2.5} = 9.54 \text{ мтр.} = 9{,}5 \text{ мтр.}$$

Для определения толщины стенок резервуара вырежем из стенки сосуда дугу, соответствующую центральному углу $d\varphi$. Из черт. 1 видно, что на эту полоску вышиною dh будут действовать силы: dP и $\sigma.s.dh$, направление которых указано стрелками. Так как эти три силы находятся в равновесии, то они должны образовать замкнутый треугольник (черт. 2).
Не трудно усмотреть, что

$$dP = \gamma h \frac{D}{2} dh\, d\varphi \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (11)$$

С другой стороны,

$$dP = \sigma.s.dh\, d\varphi \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (12)$$

Значит,

$$\sigma s = \gamma \frac{D}{2} h. \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (13)$$

Здесь σ—среднее напряжение, γ—плотность жидкости и h глубина жидкости.

Из этого уравнения и имеем

$$S = \frac{D\gamma\lambda}{2\sigma} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (14)$$

Если принять во внимание, что заклепочные отверстия ослабляют листы в местах соединения, то придется ввести поправочный коэффициент в расчеты.

Называя шаг заклепочного соединения через t, а диаметр стебля заклепки через d, получим поправочный коэффициент φ в виде отношения

$$\varphi = \frac{t - d}{d} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (15)$$

Если заклепки располагаются в два ряда и соединение произведено в нахлестку, то $\varphi = 0{,}74$; при накладках $\varphi = 0{,}80$, при иакладках сверху и снизу $\varphi = 0{,}90$.

Уравнение (14) получает теперь такой вид:

$$S = \frac{D\gamma h}{2\varphi\sigma_z} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (16)$$

где σ_z — допускаемое напряжение на единицу площади. Пусть, например, $D = 12$ мтр., $h = 8$ мтр., $\varphi = 0{,}74$ и $\gamma = 800$ кг. (куб. метр. для керосина) и $\sigma_z = 1000$ кг./см.^{2} или 10^7 кг./мтр.^{2}. Тогда

$$S = \frac{12 . 8 . 800}{2 . 0{,}74 . 10^7} = 0{,}0052 \text{ мтр.} = 5{,}2 \text{ мм.}$$

Очень часто у-ние (16) пишут в таком виде

$$S = \frac{D \gamma h}{20 \varphi \sigma_z} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (17)$$

где S получается в миллиметрах, D и h берутся в метрах, γ в килограммах (куб. мтр.), а σ_z — в килограммах на кв. сантиметр.

Для получения прочного и плотного заклепочного шва необходимо подчеканка. Но листы тоньше 5 мм. трудно держат подчеканку. Поэтому для резервуаров емкостью до 700 метров берется для дна и для стенок резервуаров железо в 5 мм. толщиною.

Уравнение (14) дает основание к выводу, что для идеального сосуда толщина стенок резервуара должна изменяться по закону у-ния прямой линии, так как S является линейной функцией от h. Уравнение (14) не имеет постоянного члена, и, значит, прямая проходит через начало координат. Предельными значениями для S будут, с одной стороны, нуль, а с другой для точек около дна

$$S = \frac{D \gamma h}{2 \varphi \sigma} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (18)$$

или

$$S = \frac{D \gamma h}{20 \varphi \sigma_z} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (19)$$

Если представить, что вес крышки резервуара с стропильной затяжкой равномерно распределен по дну, и обозначим идеальную толщину дна при этом условии через S_{11}, то получим

$$H = \frac{\pi D^2}{4} S_{11} + \pi D h . \frac{D \gamma h}{2 . 20 \varphi \sigma_z} \quad . . \quad (20)$$

или так

$$H = \frac{J S_{11}}{h} + \frac{J h \gamma}{10 \varphi \sigma_z} \quad \ldots \ldots \quad (21)$$

Здесь 2 в знаменателе получается оттого, что средняя толщина стенки будет $S/_2$.

Если проанализировать H для нахождения минимума, то получим

$$\frac{dH}{dh} = - \frac{J S_{11}}{h^2} + \frac{J \gamma}{10 \varphi \sigma_z} \quad \ldots \ldots \quad (22)$$

Откуда следует, что

$$h = \sqrt{\frac{10 \varphi \sigma_z \cdot S_{11}}{\gamma}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (23)$$

Практически резервуар с толщиною стенки, сводящейся на нет, трудно выполним, а потому толшину стенок делают ступенчатой, поясами с увеличением толщины пояса книзу от 0.5 мм. до 3,5 мм., а для верхней части берут одну толщину $S_0 = (5 - 6)$ мм. на высоте h_0. Для определения высоты h_0 воспользуемся уравнением

$$h_o = \frac{20\,\varphi\,\sigma_z\,S_o}{D\,\gamma} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (24)$$

Теперь можно будет приступить к расчету резервуара, у которого стенки будут представлять ступеньки.

Согласно черт. 3 к верхней части сечения стенки присоединится площадь $\frac{S_o h_o}{2}$. Объем этого дополнительного кольца будет

$$R_o = \pi D \frac{S_o h_o}{2} = \frac{10\,\pi\,\varphi\,\sigma_z\,S_o^2}{\gamma} \quad . \; . \; . \; . \quad (25)$$

Анализируя уравнение (25), не трудно видеть, что R_o не зависит ни от D ни от h_o. Это значит, что R_o будет одинаковым для резервуаров различных диаметров и различных высот. Далее нужно будет исследовать дополнительные кольца с высотами Δh_1 Δh_2 . . . . (черт. 3), сечения которых будут

$$\frac{\Delta S_1\,\Delta h_1}{2}, \frac{\Delta S_2\,\Delta h_2}{2}, \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; .$$

Суммируя объемы этих колец, получаем

$$R_1 + R_2 + R_3 + = \frac{10\,\pi\,\varphi\,\sigma_z}{\gamma}\,(\Delta S_1^2 + \Delta S_2^2 +) \quad . \; . \quad (26)$$

Эта масса железа при переменных высотах и диаметрах все же близка к постоянной величине, а потому при дифференцировании роли не играет. Таким образом, при определении диаметра и высоты резервуара можно пользоваться прежними уравнениями.

Пример. Расчитать резервуар для бензина емкостью

$$J = 1500 \text{ куб. мтр., если } \gamma = 700 \text{ клг./мтр.}^3.$$

Берем $\varphi = 0{,}74$ и $\sigma_z = 1000$ клг./см.^{2}.

Пусть стропильная ферма дает вес 27 клг./кв. мтр. основной поверхности. Тогда

$$S_4 = \frac{27}{8} = \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 3{,}4 \text{ мм.}$$

Крышка $S_3 = 2{,}5$ или $1{,}04 \cdot 2{,}5$ . . 2,6

Дно $S_2 =$ 7

$S_{11} =$ . . 13 мм.

Итак, получаем

$$h = \sqrt{\frac{10 \cdot 0{,}74 \cdot 1000 \cdot 13}{700}} = 11{,}7 \text{ мтр.}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 1500}{\pi \cdot 11{,}7}} = 12{,}8 \text{ мтр.}$$

Толщина стенок резервуара внизу будет

$$S = \frac{12{,}8 \cdot 11{,}7 \cdot 700}{2 \cdot 0{,}74 \cdot 1000} = 9 \text{ мм.}$$

Обычно делят боковую поверхность на пояса, так чтобы вышина каждого пояса была между 1 и 2 метрами.

Если остановиться на высоте пояса в 1,3 метра, то начиная снизу, получим пояса с толщиной стенок 9 мм., 8 мм. 7 мм., 6 мм., и последний пояс с толщиной стенок в 5 мм. Высота этого последнего пояса будет

$$h = 11{,}7 - 1{,}3 \cdot 4 = 6{,}5 \text{ мтр.}$$

Эта картина дается на черт. 4.

Пример 2. Определить главные размеры для резервуара, предназначенного под керосин. Емкость резервуара $J = 2500$ куб. метр. $\gamma = 960$ клг. мтр. Берем $\varphi = 0{,}78$ и $\sigma_z = 1200$ клг./см.^{2}

Если крышку взять толщиною $S_3 =$ . . .	3	мм., то
$S_3' = 1{,}04 \cdot 3 =$ . . .	3,12	мм.
толщина дна $S_2 =$	8	мм.
Стропилы 30 клг./мтр^2	3,75	мм.
$S_{11} =$ . . .	14,87	мм.

Следовательно,

$$h = \sqrt{\frac{10 \cdot 0{,}78 \cdot 1200 \cdot 14{,}87}{960}} = 12 \text{ мтр.}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 2500}{\pi \cdot 12}} = 16{,}3 \text{ мтр.}$$

Толщина стенки в нижнем поясе

$$S = \frac{16{,}3 \cdot 12 \cdot 960}{2 \cdot 0{,}78 \cdot 1200} = 10 \text{ мм.}$$

Черт. 5 показывает, что нижний пояс имеет толщину стенок 10 мм. и вышину 1,8 мтр.; следующий пояс с толщиной 8,5 мм. и высотою 1,8 мтр.; третий пояс имеет толщину стенок 7 мм. и высоту 1,8 мтр.; наконец, у последнего пояса толщина стенок 5,5 мм. и высота 6,6 мтр.

Пример 3. Резервуар для бензола с емкостью $J = 850$ куб. метр. и $\gamma = 900$ клг./мтр.^{3}

Возьмем $\varphi = 0{,}77$ и $\sigma_z = 1200$ клг./см.^{2}

Крышка толщиною 2,5 мм. дает $1{,}04 \times 2{,}5 =$ . . .	2,6	мм.
Стропила 16 клг./мтр.^{2}	2	мм.
Дно в 5 мм.	5	мм.
$S_{11} =$ . . .	9,6	мм.

Значит,

$$h = \sqrt{\frac{10 \cdot 0{,}77 \cdot 1000 \cdot 9{,}6}{900}} = 9{,}1 \text{ мтр.}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 900}{\pi \cdot 9{,}1}} = 6 \text{ мтр.}$$

Толщина нижнего пояса

$$S = \frac{11{,}3 \cdot 9 \cdot 1 \cdot 900}{2 \cdot 0{,}77 \cdot 1000} = 6 \text{ мм.}$$

Толщина S получилась небольшая, а потому можно ее взять однообразной по всей высоте резервуара, а тогда по у-нию (6)

$$D/_2 : h = S_1 : S_2 = 6 : 9{,}6 = 5{,}65 : 9.1$$

Основное уравнение для подсчета главных размеров показывает, что в нем не фигурирует J. Действительно, размеры резервуара зависят от толщины дна, крышки, стропил и φ.

Если перейти к резервуарам большим с диаметром 15—35 мтр. и емкостью $J = 1500 - 12000$ куб. мтр., то в них вес стропил на кв. метр основной поверхности приблизительно постоянен. Если взять для всех больших резервуаров одинаковую толщину дна и крышки, то у-ние (23) дает указание, что все резервуары должны быть одной высоты. Здесь обнаруживается интересное явление, что для резервуаров, емкостью от 2000 куб. мтр. влияние веса R_0 все больше и больше стушевывается, по мере возрастания J, а наименьшая единица веса в килограммах, приходящаяся на один куб. метр жидкости, с возрастанием J падает медленно, так что может быть принята за постоянную.

Таким образом, одинаково выгодно строить резервуар емкостью в 12000 куб. метров, или три резервуара емкостью по 4000 куб. метров.

Если пренебречь всеми дополнительными кольцами R, то получим

$$H = \frac{J S_{11}}{h} + \frac{J h \gamma}{10 \varphi \sigma_z} \;;\; \frac{H}{J} = \text{Const} \quad \ldots\ldots \quad (27)$$

Решим вопрос о наименьшем весе железного резервуара, емкостью выше 1500 куб. метров.

Практика показывает, что наивыгоднейшая высота резервуаров большой емкости колеблется в пределах между 10 и 13 метрами, а высота поясов примерно равна 1,5 метра.

Если провести такое разделение на пояса по всей высоте, то получится 8 поясов (черт. 6). Сумма площадок, заштрихованных горизонтально и горизонтально и вертикально, составляет 12,5% от площади $\frac{hS}{2}$. На уголки идет около 6,5%. На накладки, перекрытие в лапу и заклепочные головки идет в среднем 10%. Обозначим через R_0' величину ступенчатой площадки, заштрихованной вертикально. Тогда получим:

$$H = 1{,}1 \cdot 7{,}85 \left(\frac{J S_{11}}{h} + J h \frac{\gamma}{10 \varphi \sigma_z} \cdot \frac{100 + 12{,}5 + 6{,}5}{100} + R_0' \right) \quad \ldots\ldots \quad (28)$$

или

$$H = 8{,}635 \left(2{,}19 \, J h \frac{\gamma}{10 \varphi \sigma_z} + R_0' \right) \quad \ldots\ldots \quad (29)$$

Но величина R_0' примерно равна R_0 т. е.

$$R_0' = R_0 = \frac{10 \pi \varphi \sigma_z}{\gamma} S_0^2 \quad \ldots\ldots \quad (30)$$

Итак,

$$H = 8{,}635 \left(2{,}19 \, J h \frac{\gamma}{10 \varphi \sigma_z} + \frac{10 \pi \varphi \sigma_z}{\gamma} S_0^2 \right) \quad \ldots\ldots \quad (31)$$

или

$$\frac{H}{J} = \frac{1{,}9 \, h}{k} + \frac{270 \, S_0^2 \, k}{J} \quad \ldots\ldots \quad (32)$$

где $K = \frac{\varphi \sigma_z}{\gamma}$

Пример. Как велик должен быть вес резервуара емкостью $J = 3000$ куб. метров.

Возьмем $S_0 = 6$ мм. Для дна, крышки и стропила берем $S_{11} = 14,9$ мм. Если $\gamma = 1000$ клг./мтр^3, $\varphi = 0,75$ и $\sigma = 1200$ кгр./см^2, то

$$K = \frac{\varphi \sigma_z}{\gamma} = \frac{0,75 \cdot 1200}{1000} = 0,9$$

Теперь имеем

$$h = \sqrt{\frac{10 \varphi \sigma_z S_{11}}{\gamma}} = \sqrt{\frac{10 \cdot 0,75 \cdot 1200 \cdot 14,9}{1000}} = 11,6 \text{ мтр.}$$

$$\frac{H}{J} = \frac{1,9 \cdot 11,6}{0,9} + \frac{270 \cdot 36 \cdot 0,9}{3000} = 24,5 + 2,916 = 27,416 \text{ клг./куб. мтр.}$$

Следовательно, весит резервуар

$$27,416 \times 3000 = 82248 \text{ клгр.} \cong 82 \text{ тонны.}$$

Изменение единицы веса с увеличивающейся высотой резервуара можно видеть на черт. 7, где даны отношения $\frac{H}{J}$ в кгр./мтр.^{2} для резервуара емкостью 6000 куб. мтр.

При построении одного резервуара на 6000 куб. метров взяты были

$$S_2 = 7 \text{ мм.}, \; S_3 = 2,5 \text{ мм.} \; S_4 = 30 \text{ кгр./кв. мтр.}, \; S_0 = 5 \text{ мм.}$$

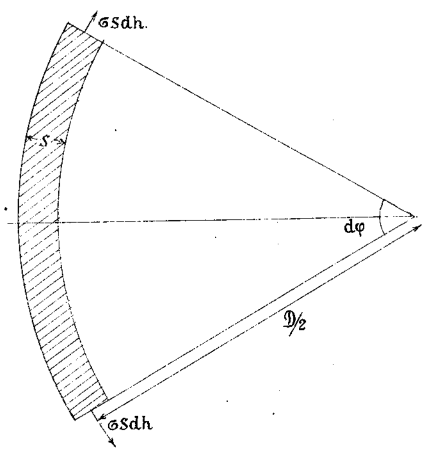
Уголки сверху $90 \times 90 \times 11$, а снизу $120 \times 120 \times 13$. Далее взято было $\varphi = 0,76$, $\sigma_z = 1200$ кгр./см.^{2} и $\gamma = 1000$ кгр./мтр.^{3} Наименьшая единица веса по диаграмме 7 получается равной 23,5 кгр./мтр.^{3} при высоте резервуара $h = 11$ метров. Но резервуар для воды выстроен был высотою всего 7 метров. Таким образом, излишне израсходовано было железа

$$6000\,(25,7 - 23,5) = 13200 \text{ кгр.}$$

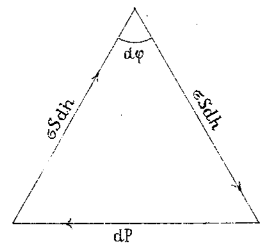
Это составляет около 13% общего веса.

Расчет металлических резервуаров по Штиглицу.

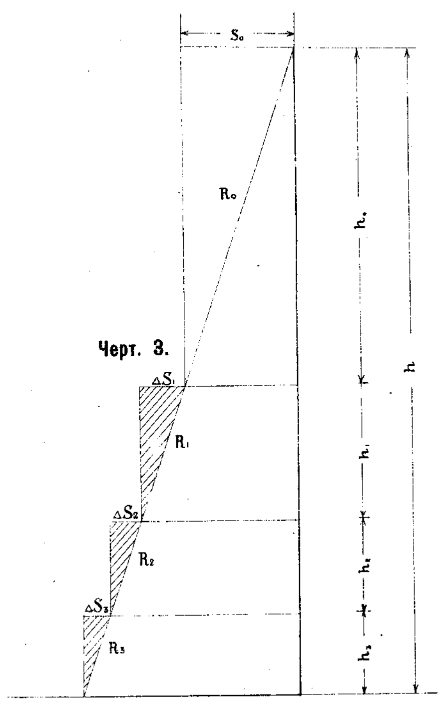
К статье проф. С. К. Конюхова



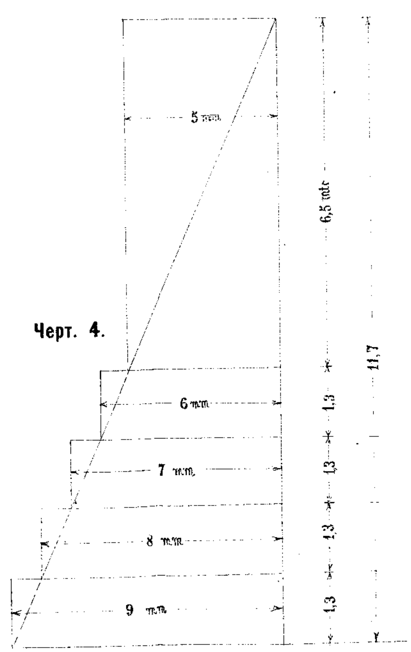
Черт. 1.



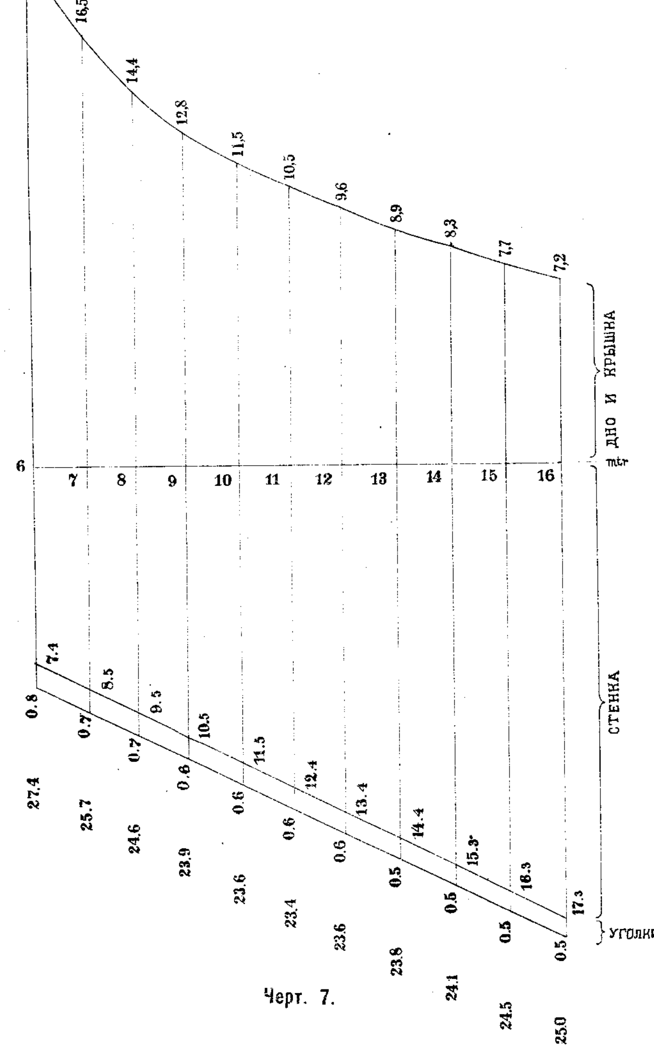
Черт. 2.



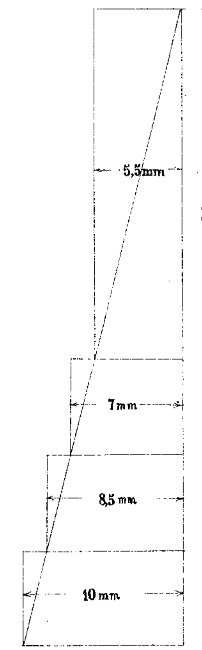
Черт. 3.



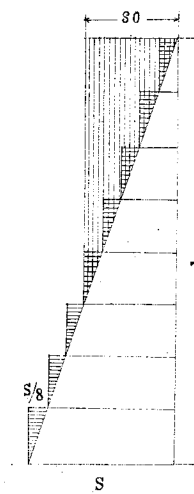
Черт. 4.



Черт. 7.



Черт. 5.



Черт. 6.