

Графический Расчет

ГРАФИЧЕСКІЙ РАЗСЧЕТЪ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХЪ СВОДОВЪ

НА ОСНОВАНІИ
ТЕОРИИ УПРУГОСТИ.

Инженера-капитана Н. Житковича,
штатнаго преподавателя Николаевской Инженерной Академіи и
Училища.

(Отдѣльный оттискъ изъ Инж. журн. № 1, 2—3, 4 и 5 1898 г.).

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.
Типографія и Литографія В. А. Тиханова, Садовая, № 27.
1898.

Доволено цензурою, С.-Петербургъ 9 іюля 1898 г.

76270
25

ГРАФИЧЕСКІИ РАЗСЧЕТЪ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХЪ СВОДОВЪ НА ОСНОВАНІИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ.

Цѣль предлагаемой статьи—указать по возможности простой и удобный для практики способъ расчета цилиндрическихъ сводовъ изъ разныхъ матеріаловъ.

Въ настоящее время для рѣшенія этого вопроса имѣется богатѣйшій матеріалъ, съ одной стороны, въ видѣ математическихъ изслѣдованій и сложныхъ аналитическихъ расчетовъ, основанныхъ на теоріи упругости, а съ другой—болѣе простые графическіе способы расчета, рассматривающіе матеріалы сводовъ какъ тѣла абсолютно твердыя.

Противоположность этихъ основныхъ положеній влечетъ за собою значительную разницу въ результатахъ расчетовъ.

Кромѣ того, графическіе способы расчета, основанные на законахъ статики, опредѣляютъ положеніе безчисленнаго множества кривыхъ давленій, удовлетворяющихъ условіямъ равновѣсія свода и, слѣдовательно, не даютъ полного представленія о тѣхъ внутреннихъ силахъ, которыя проявляются въ кладкѣ свода.

Естественно, что вопросъ о примѣненіи той или другой теоріи къ расчету сводовъ можетъ быть рѣшенъ удовлетворительно только на основаніи многочисленныхъ опытовъ, выясняющихъ сущность упругихъ свойствъ матеріаловъ.

Въ этомъ отношеніи изъ всѣхъ опытовъ наиболѣе цѣнными являются опыты, произведенные въ Австріи и опи-

I. Результаты опытов Баха надъ образцами изъ цементнаго раствора и бетона.

(См. «Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure», 1895 г. № 17, 1896 г. № 48 и 1897 г. № 9).

Всѣ предыдущіе опыты производились надъ образцами малыхъ размѣровъ (наибольшіе размѣры: 12 сантим.×12 сантим.×15 сантим.), и поэтому, при разнородности составныхъ частей бетона и значительной разницѣ въ размѣрахъ щебня, нельзя было рассчитывать на точность результатовъ.

Свои опыты Бахъ производилъ надъ цилиндрическими образцами діаметромъ 250 миллим. и высотой 1.000 миллим.

Въ первоначальныхъ опытахъ, описанныхъ въ Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 1895 г. № 17, составъ бетона былъ слѣдующій:

I) 1 часть цемента, 2,5 ч. песку, 5 ч. гравія.

II) 1 » » 2,5 ч. » 5 ч. известковаго щебня.

III) 1 ч. » 7 ч. песку, хряща и гравія въ той пропорціи, въ какой они были взяты изъ карьеръ.

IV) 1 ч. цемента, 3 ч. песку, 6 ч. гравія.

V) 1 ч. » 3 ч. » 6 ч. известковаго щебня.

VI) 1 ч. » 9 ч. хряща.

Для каждаго состава было сдѣлано по три образца на цементъ завода Blaubeugen, обозначенномъ для краткости буквою В, и по три образца изъ невыдержаннаго, свѣжаго цемента завода въ Lauffen'ѣ, обозначеннаго буквою L.

Впослѣдствіи (см. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 1896 г. № 48) были произведены опыты надъ 102 образцами слѣдующаго состава:

I) 2 образца изъ чистаго цемента.

II) 3 образца состава 1 ч. цемента, 1,5 ч. песку.

III) 6 » » 1 ч. цемента, 3 ч. песку.

IV) 6 » » 1 ч. цемента, 4,5 ч. песку.

V) 2 » » изъ чистаго цемента

VI) 5 образцовъ состава.			1 ч. цемента.		
			2,5 ч. песку изъ Дуная.		
			5 ч. гравія.		
VII)	{	3	»	»	1 ч. цемента.
					2,5 ч. песку изъ Egginger'a.
	{	3	»	»	5 ч. известковаго щебня.
					1 ч. цемента.
VIII) 6	{	3	»	»	2,5 ч. песку изъ Дуная.
					5 ч. известковаго щебня.
	{	3	»	»	1 ч. цемента.
					3 ч. песку изъ Дуная.
IX)	{	3	»	»	6 ч. гравія.
					1 ч. цемента.
	{	3	»	»	3 ч. песку изъ Дуная.
					6 ч. известковаго щебня.
X) 6	{	3	»	»	1 ч. цемента.
					3 ч. песку изъ Egginger'a.
	{	3	»	»	6 ч. известковаго щебня.
					1 ч. цемента.
XI) 6	{	3	»	»	3,5 ч. песку.
					7 ч. гравія.
	{	3	»	»	1 ч. цемента.
					3,5 ч. песку.
XII) 6	{	3	»	»	7 ч. известковаго щебня.
					1 ч. цемента.
	{	3	»	»	4 ч. песку.
					8 ч. гравія.
XIII)	{	3	»	»	1 ч. цемента.
					4 ч. песку изъ Дуная.
	{	3	»	»	8 ч. известковаго щебня.
					1 ч. цемента.
XIV) 6	{	3	»	»	4 ч. песку изъ Egginger a.
					8 ч. известковаго щебня.
	{	3	»	»	1 ч. цемента.
					4,5 ч. песку (Д).
				9 ч. гравія.	

XV) 6 образцовъ состава.			1 ч. цемента.
			4,5 ч. песку (Е).
			9 ч. известкового щебня.
XVI) 6	»	»	1 ч. цемента.
			5 ч. песку (Д).
			10 ч. гравія.
XVII) 6	»	»	1 ч. цемента.
			5 ч. песку (Е).
			10 ч. известкового щебня.
XVIII) 3	»	»	1 ч. цемента.
			1,5 ч. песку (Е).
			3 ч. мелкаго щебня.
XIX) 3	»	»	1 ч. цемента.
			1,5 ч. песку (Е).
			3 ч. гравія.
XX) 3	»	»	1 ч. цемента.
			2 ч. песку (Е).
			4 ч. мелкаго щебня.
XXI) 3	»	»	1 ч. цемента.
			2 ч. песку (Е).
			4 ч. гравія.

Всего 102 образца.

Цементъ (В) далъ на ситѣ 900 отверстій на 1 кв. сантим. остатокъ 1,9%; цементъ (L) — 3,3%.

Песокъ, щебень и гравій были тщательно промыты и просушены. Перемѣшиваніе смоченныхъ составныхъ частей производилось на платформахъ, послѣ чего заполняли слоями бетона деревянныя формы съ разъемными желѣзными обручами, утрамбовывая каждый слой до появленія воды. Торцы образцовъ покрывались слоемъ цементнаго раствора толщиною 1 сантим. Деревянныя формы снимались черезъ день; на бетонные цилиндры надѣвались мѣшки, которые въ теченіе 28 дней держались влажными. Къ испытаніямъ приступали черезъ 76—97 дней послѣ приготовленія образцовъ.

Исслѣдованія производились помощью машины, вкладывая которой представлены на черт. I, въ фиг. 1. Концы об-

разцовъ ограничивались параллельными плоскостями, къ которымъ прилежали зажимныя плиты, упирающіяся въ машину сферическими поверхностями, благодаря чему давленіе распредѣлялось равномерно по всему верхнему и нижнему основаніямъ испытуемыхъ цилиндровъ.

Для измѣренія деформаций служилъ приборъ, фиг. 1 и 2, состоящій изъ двухъ колецъ: верхняго *АА* и нижняго *ВВ*; кольца эти прикрѣплялись къ образцу 4-мя нажимными винтами; разстояніе *l* между кольцами принято 750 миллим.

Къ верхнему кольцу прикрѣплялись два измѣрительныхъ прибора, состоявшіе изъ дуги съ дѣленіями, фиг. 2, и стрѣлки *G*, соединенной зубчатою передачею съ рычагомъ *DEF*, вращающимся около точки *E*. Въ конецъ *D* рычага упирается вертикальный стержень *C*, установленный на нижнемъ кольцѣ. Поэтому при малѣйшемъ сжатіи образца конецъ *D* рычага поднимается и стрѣлка даетъ нѣкоторый отсчетъ по дугѣ.

Приборъ устроенъ такъ, что при укорачиваніи образца на 1 миллим. стрѣлка передвигается по дугѣ на 300 миллим.

Отсчетъ по дугѣ можно было сдѣлать съ точностью до 0,1 миллим., и поэтому деформация образца измѣрялась съ точностью до $\frac{1}{3000}$ миллим., такъ что, при первоначальномъ разстояніи между кольцами $l=750$ миллим., относительное укорачиваніе выражалось съ точностью

$$\frac{1}{3.000 \times 750} = \frac{1}{2.250.000}.$$

Измѣрительные приборы прикрѣплялись съ двухъ противоположныхъ сторонъ, какъ показано въ фиг. 1; слѣдовательно сжатіе опредѣлялось вдоль двухъ діаметрально противоположныхъ производящихъ цилиндра. Деформация опредѣлялась какъ средняя арифметическая отсчетовъ на двухъ приборахъ.

Нагрузки увеличивались постепенно отъ нуля до наибольшей величины въ теченіе 1,5 минутъ; разгрузка производилась также постепенно.

При каждомъ отдѣльномъ опытѣ послѣдовательныя на-

грузки и разгрузки производились до тѣхъ поръ, пока получалась постоянная деформация.

Результаты опытовъ выражены графически въ прилагаемыхъ діаграммахъ, черт. I и II, фиг. 3—55, въ которыхъ ордонаты представляютъ нагрузки, а абсциссы — соотвѣтственные сжатія: полныя, остающіяся и упругія.

Кромѣ того для образцовъ изъ цемента (В) состава: 1 ч. цемента, 2,5 ч. песку и 5 ч. гравія приведена таблица № 1.

Образцы эти испытывались черезъ 2,5 мѣсяца послѣ приготовления.

Средній діаметръ образца—25,4 сантим.

Поперечное сѣченіе $\frac{\pi}{4} \cdot 25,4^2 = 506,7$ кв. сантим.

Высота. 100,8 сантим.

Вѣсъ 120,6 килограм.

Удѣльный вѣсъ. . 2,33.

Температура при началѣ опытовъ 15° Ц., въ концѣ 15,7° Ц.

Таблица № 1.

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Нагрузка въ вылогр.		Отсчетъ въ $\frac{1}{300}$ сант.		Сумма отсчетовъ.	Сжатіе въ $\frac{1}{600}$ сант.		
Пол- ная.	На 1 кв. сант.	Лѣвый.	Прав- ый.		Пол- ное.	Остаю- щееся.	Исче- заю- щее.
0		5,00	5,00	10,00			
4.000	7,9	5,64	5,65	11,29	1,29	0,16	0,13
0		5,08	5,08	10,16			
4.000		5,63	5,67	11,30	1,30	0,16	0,14
0		5,06	5,10	10,16			
4.000		5,63	5,70	10,33	1,33	0,17	0,16
0		5,07	5,10	10,17			
4.000		5,64	5,69	11,33	1,33	0,17	0,16
0		5,07	5,10	10,17			
8.000	15,8	6,32	6,46	12,78	2,78	0,31	2,47
0		5,16	5,15	10,31			
8.000		6,33	6,50	12,83	2,83	0,34	2,49
0		5,15	5,19	10,34			
8.000		6,35	6,52	12,87	2,87	0,35	2,52
0		5,16	5,19	10,35			
8.000		6,39	6,51	12,90	2,90	0,35	2,55
0		5,16	5,19	10,35			
8.000		6,39	6,51	12,90	2,90	0,35	2,55
0		5,16	5,19	10,35			
12.000	23,7	6,88	7,59	14,47	4,47	0,50	3,97
0		5,20	5,30	10,50			
12.000		6,94	7,68	14,62	4,62	0,53	4,09
0		5,21	5,32	10,53			
12.000		6,95	7,69	14,64	4,64	0,55	4,09
0		5,22	5,33	10,55			
12.000		6,96	7,71	14,67	4,67	0,55	4,12
0		5,22	5,33	10,55			
12.000		6,96	7,71	14,67	4,67	0,55	4,12
0		5,22	5,33	10,55			

5) При нагрузкахъ отъ 12.000 килогр. до 16.000 килогр. (23,7—31,6 килогр. на кв. сантим.)

$$\alpha = \frac{5,80-4,12}{600.75(31,6-23,7)} = \frac{1}{212.000}.$$

6) При нагрузкахъ отъ 16.000 килогр. до 20.000 килогр. (31,6—39,5 килогр. на кв. сантим.)

$$\alpha = \frac{7,63-5,80}{600.75(39,5-31,6)} = \frac{1}{194.000}.$$

Мѣрой упругости можетъ служить въ данномъ случаѣ коэффициентъ сжатія α или величина обратная: $\varepsilon = \frac{1}{\alpha}$, называемая коэффициентомъ упругости при сжатіи.

Приведенныя вычисленія показываютъ, что коэффициентъ сжатія непостояненъ и увеличивается съ увеличеніемъ нагрузки.

Результаты опытовъ надъ образцами изъ цемента (L) приведены на діаграммахъ фиг. 15, 16, 17, 19, 20, 22, 24—32.

Всѣ первоначальныя опыты надъ образцами бетона изъ цементовъ (B) и (L) показали:

1) При постепенныхъ нагрузкахъ и разгрузкахъ отъ 0 до 20.000 килогр., или 40 килогр. на 1 кв. сантим. поперечнаго сѣченія, число послѣдовательныхъ нагрузокъ и разгрузокъ, необходимыхъ для полученія постоянного сжатія, быстро увеличивается по мѣрѣ возрастанія нагрузокъ.

2) Величина полного сжатія зависитъ отъ времени дѣйствія нагрузки.

3) Для образцовъ изъ цемента (L), не выдержаннаго въ складахъ, требовалось значительно большее число послѣдовательныхъ нагрузокъ и разгрузокъ для полученія постоянного полного сжатія. Такъ на примѣръ, для образца состава: 1 ч. цемента (L), 2,5 ч. песку и 5 ч. гравія при нагрузкѣ отъ 0 до 16.000 килогр. (31,6 килогр. на кв. сантим.) потребовалось 11 послѣдовательныхъ нагрузокъ и разгрузокъ, тогда какъ для образца того же состава изъ цемента (B)— всего только 5 нагрузокъ и разгрузокъ.

При этомъ:

4) Во всѣхъ образцахъ изъ цемента (B) сжатія полное

и остающаеся значительно меньше чѣмъ для образцовъ изъ цемента (L) того же состава и при тѣхъ же нагрузкахъ, что ясно видно изъ сравненія диаграммъ фиг. 3—14 съ диаграммами фиг. 15—20 и 24—32.

Вообще опыты показали, что на упругія свойства бетона значительное вліяніе имѣютъ:

- 1) свойства цемента;
- 2) относительное количество прочихъ составныхъ частей, и
- 3) качества ихъ.

Ниже приведена таблица № 2 коэффициента сжатія α для образцовъ бетона различного состава изъ цемента (B) при нагрузкахъ отъ 0 до 4.000 килогр.

Таблица № 2.

№№	СОСТАВЪ ОБРАЗЦА.	Среднее значеніе α .
I	Чистый цементъ	0,00000474
II	1 ч. цемента, 1,5 ч. песку изъ Дуная (D) . . .	0,00000356
III	1 ч. " 3 ч. "	0,00000431
IV	1 ч. " 4,5 ч. "	0,00000628
V	Чистый цементъ другой партіи	0,00000525
VI	1 ч. цемента, 2,5 ч. песку (D), 5 ч. гравія . . .	0,00000452
VII	1 ч. " 2,5 ч. " (E), 5 ч. "	0,00000804
VIII	1 ч. " 3 ч. " (D), 6 ч. "	0,00000474
IX	1 ч. " 3 ч. " (D), 6 ч. известк. щебня . . .	0,00000369
X	1 ч. " 3,5 ч. " (D), 7 ч. гравія	0,00000571
XI	1 ч. " 3,5 ч. " (D), 7 ч. известк. щебня . . .	0,00000397
XII	1 ч. " 4 ч. " (D), 8 ч. гравія	0,00000618
XIII	1 ч. " 4 ч. " (D), 8 ч. известк. щебня . . .	0,00000429
XIV	1 ч. " 4,5 ч. " (D), 9 ч. гравія	0,00000601
XV	1 ч. " 4,5 ч. " (E), 9 ч. известк. щебня . . .	0,00000459
XVI	1 ч. " 5 ч. " (D), 10 ч. гравія	0,00000642
XVII	1 ч. " 5 ч. " (E), 10 ч. известк. щебня . . .	0,00000419

Результаты опытовъ приведены на діаграммахъ фиг. 32а—56.

Опытъ показалъ, что значительное вліяніе на упругость бетона имѣетъ количество песку. Такъ напримѣръ, коэффициентъ сжатія при начальныхъ нагрузкахъ опредѣленъ:

1) для образца изъ чистаго цемента:

$$\alpha = 0,00000474 = \frac{1}{211.000};$$

2) для образца изъ цементнаго раствора 1 ч. цемента, 1,5 ч. песку

$$\alpha = 0,00000356 = \frac{1}{281.000};$$

3) для раствора 1 ч. цемента, 3 ч. песку

$$\alpha = 0,00000431 = \frac{1}{232.000};$$

4) для раствора 1 ч. цемента, 4,5 ч. песку

$$\alpha = 0,00000668 = \frac{1}{159.000}.$$

На черт. III, въ фиг. 57, абсцисы кривой *ABC* выражаютъ относительное количество песку, а ординаты—соотвѣтственные коэффициенты сжатія α , такъ что абсциссѣ 0 (чистый цементъ) соотвѣт. ордината 0,00000476 и т. д.

Діаграмма показываетъ, что примѣсъ песка сперва уменьшаетъ коэффициентъ сжатія, при составѣ раствора около 1:1,5 коэффициентъ сжатія получаетъ наименьшее значеніе и меньше коэффициента сжатія для раствора изъ чистаго цемента на

$$100 \cdot \frac{474-356}{474} = 25\%.$$

Съ увеличеніемъ содержанія песку коэффициентъ α увеличивается и принимаетъ то же значеніе какъ и для чистаго цемента при относительномъ количествѣ песку 1:3; съ дальнѣйшимъ увеличеніемъ содержанія песку коэффициентъ сжатія увеличивается.

Въ фиг. 58 представлены кривыя, выражающія законъ измѣненія коэффициента сжатія раствора въ зависимости отъ количества песку и постепенно возрастающихъ нагрузокъ отъ:

0 . . .	до 4.000	килогр.
0 . . .	> 8.000	>
0 . . .	> 12.000	>
0 . . .	> 16.000	>
0 . . .	> 20.000	>

При томъ же относительномъ содержаніи песку (абсциссы) коэффициенты сжатія (ордонаты) увеличиваются по мѣрѣ возрастанія нагрузокъ.

Вліяніе относительнаго количества другихъ составныхъ частей—гравія и щебня—видно изъ діаграммъ, упомянутыхъ выше. Опытъ показываетъ, что при употребленіи гравія получаютъ бетоны болѣе упругіе, чѣмъ бетоны со щебнемъ. На упругость бетона вліяютъ также качества составныхъ частей, напримѣръ песка.

Такимъ образомъ, коэффициентъ сжатія бетона не постояненъ и зависитъ:

- 1) отъ состава бетона, т. е. относительнаго количества и качествъ его составныхъ частей;
- 2) отъ величины нагрузки, и
- 3) отъ продолжительности ея дѣйствія.

II. *Опыты надъ образцами изъ гранита.*

Въ Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 1897 г. № 9, приведены результаты опытовъ Баха надъ образцами изъ синяго мелкозернистаго гранита для опредѣленія коэффициента упругости при перерѣзываніи, раздробленіи, изгибѣ, сжатіи и растяженіи.

Для опредѣленія коэффициента сжатія производились опыты надъ двумя цилиндрическими образцами діаметромъ 21,5 сантим. и высотой 105,05 сантим.; надъ каждымъ образцомъ было произведено по три опыта.

Образецъ I.

Средній діаметръ	21,5	сантим.
Поперечное сѣченіе	363,1	кв. сантим.
Высота	105,05	сантим.
Вѣсъ	100,83	килогр.
Удѣльный вѣсъ	2,64.	

Первый опыт был произведенъ 13-го іюня 1896 г.

Длина цилиндра между кольцами измѣрительнаго прибора $l = 75$ сантим. Постепенныя нагрузки производились отъ 0 до $P = 5.000, 10.000, 15.000, 20.000, 25.000, 30.000, 35.000, 40.000, 50.000, 60.000$ килогр.

и повторялись до тѣхъ поръ, пока деформация дѣлалась постоянной.

При нагрузкѣ 5.000 килогр., для получения постоянныхъ сжатій: полного, остающагося и исчезающаго, требовалось произвести три послѣдовательныя нагрузки и разгрузки.

При нагрузкѣ 10.000 килогр. . . . 6

» » 25.000 » . . . 9

» » 50.000 » . . . 11

Въ прилагаемой таблицѣ приведены величины полного, остающагося и исчезающаго сжатій при различныхъ напряженіяхъ.

При возрастаніи напряженія отъ 0 до δ.	Сжатія цилиндра длиною 75 сантим., выраженныя въ $\frac{1}{600}$ сантим.		
	Полное.	Остающееся.	Исчезающее.
0 до 13,8 килогр.	3,98	0,48	3,50
0 " 27,5 "	9,17	1,41	7,76
0 " 41,3 "	14,40	2,31	12,09
0 " 55,1 "	19,62	3,16	16,46
0 " 68,9 "	25,02	4,21	20,81
0 " 82,6 "	29,89	4,98	24,91
0 " 110,2 "	39,74	6,88	32,86
0 " 137,7 "	48,39	8,36	40,03
0 " 165,2 "	57,12	10,03	47,09

Результаты опытовъ выражены графически на діаграммѣ фиг. 59, причемъ ордонаты представляютъ нагрузки, абсциссы—соотвѣтственные сжатія.

Второй и третій опытъ были произведены 16-го и 26-го іюня 1896 года надъ тѣмъ же образцомъ.

Результаты 3-го опыта выражены графически на діаграммѣ фиг. 60.

Изъ разсмотрѣнія этихъ данныхъ видно, что первоначально сжатія возрастаютъ быстрѣе чѣмъ соотвѣтственные нагрузки, а послѣ нѣкоторой точки перелома абсциссы кривой, т. е. сжатія, увеличиваются меньше чѣмъ ордонаты.

Значительная разность между остающимися сжатіями третьяго опыта и тѣми же величинами при первомъ опытѣ можетъ быть объяснена тѣмъ обстоятельствомъ, что промежутокъ времени между опытами былъ различенъ: первый опытъ былъ произведенъ 13-го іюня, а третій 26-го іюня 1896 г.

Образецъ II.

Средній діаметръ.	20,7	сантим.
Среднее поперечное сѣченіе	336,5	кв. сантим.
Высота	105,00	сантим.
Вѣсъ.	93,9	килогр.
Удѣльный вѣсъ	2,66.	

Надъ образцомъ произведены 3 опыта и при первыхъ двухъ допущена наибольшая нагрузка 100.000 килогр. или

$$\delta = \frac{100.000}{336,5} = 297,2 \text{ килогр. на 1 кв. сантим.}$$

Разстояніе между кольцами измѣрительныхъ приборовъ, т. е. длина сжимаемаго цилиндра въ 1-мъ и 2-мъ опытахъ, принята 50 сантим., а въ третьемъ опытѣ—75 сантим.

Опыты производились 18-го, 19-го и 25-го іюня 1896 г.

Результаты ихъ приведены въ діаграммахъ фиг. 61 и 62, выражающихъ зависимость между нагрузками и сжатіями: полнымъ, остающимся и исчезающимъ, при опытахъ № 1 и № 3.

Діаграммы эти показываютъ, что законъ измѣненія деформаций тотъ же какъ и при опытахъ съ образцомъ № I, т. е. при незначительныхъ нагрузкахъ деформациі возра-