

TALLINNA POLÜTEHNILISE
INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

СЕРИЯ А

№ 244

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ
И
СТРОИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА**

**СБОРНИК СТАТЕЙ
IV**

Ep. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

С Е Р И Я А

№ 244

1968

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ
И
СТРОИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА
СБОРНИК СТАТЕЙ
IУ

Таллин

1968



Ep.7651

УДК 624.072.5/6

И.И. Ааре, Л.А. Юксти

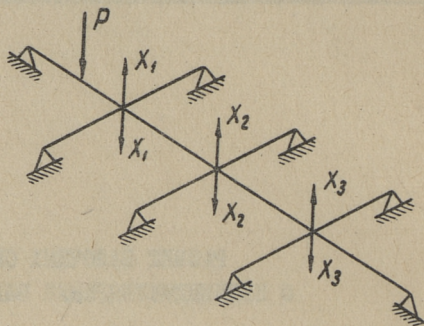
РАСЧЕТ БАЛОЧНЫХ СИСТЕМ
С ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В в е д е н и е

Как в строительном деле, так и в машиностроении часто применяются системы с перпендикулярными элементами, нагруженные сосредоточенными силами или распределенной нагрузкой. Ввиду статической неопределимости расчет подобной системы представляет собой довольно трудоемкий процесс. В случае применения тонкостенных профилей, жесткость балок на кручение мала по сравнению с жесткостью изгиба и может не учитываться. В результате этого расчет значительно упрощается. По общепринятому методу деформаций в качестве исходной схемы выбирают статически определимые простые балки, приняв за неизвестные контактные усилия между перпендикулярными элементами. Дополнительные уравнения для определения неизвестных получаются из условия совместности деформаций. Таким путем составляют систему линейных уравнений для определения контактных усилий.

Определив X_1 , X_2 и X_3 при помощи системы уравнений деформаций, мы можем рассматривать каждый элемент отдельно как простую балку. Конечной целью является нахождение всех опорных реакций и изгибающих моментов.

Фиг. 1



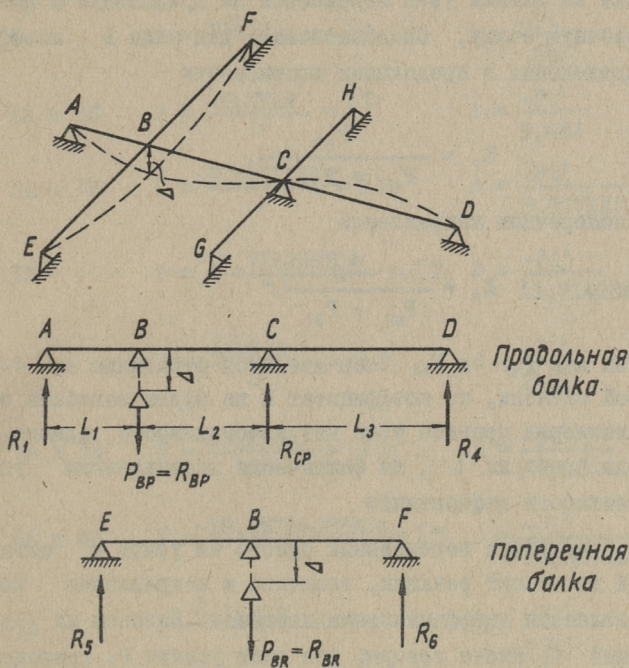
Метод распределения реакций

Ниже будет излагаться более рациональный метод расчета систем из перпендикулярных балок, позволяющий избегать составления и решения систем уравнений и нахождения контактных усилий. По данному методу кручением также пренебрегаем.

Предлагаемый метод представляет собой распространение известного метода Харди Кросса на случай балочных систем с перпендикулярно расположенными элементами.

Идея метода распределения реакций заключается в следующем. Полагаем сначала, что все узлы, которые в действительности могут перемещаться, поставлены на временные неподвижные шарнирные опоры (и их вертикальные перемещения равны нулю).

Таким образом, получим систему из неразрезных балок, опорные реакции для которых могут быть найдены из таблицы I. Эти мнимые реакции временных опор должны быть распределены между реальными опорами так, чтобы сохранилось равновесие системы, а реакции мнимых опор равнялись бы нулю.



Фиг. 2

На фиг. 2 изображена система из одной продольной и двух поперечных балок, нагруженная любой нагрузкой. Пока узлы В и С покоятся на временных опорах, перемещения узлов отсутствуют. Далее удалим опору В, и точка В получает перемещение. Удаление опоры В равносильно приложению в точке В внешней нагрузки P , которая численно равна реакции удаленной опоры R_B , но имеет противоположное направление. Усилие P_B распределяется между продольной (P_{BP}) и поперечной (P_{BR}) балками пропорционально их жесткостям, причем

$$P_B = P_{BP} + P_{BR}$$

Коэффициент распределения K показывает, какая часть нагрузки на данный узел передается на продольную и какая на поперечную балку. Следовательно, для узла B коэффициент распределения в продольном направлении

$$K_P = \frac{P_{BP}}{P_{BP} + P_{BR}},$$

а в поперечном направлении

$$K_R = \frac{P_{BR}}{P_{BP} + P_{BR}}.$$

Так как P_{BP} и P_{BR} оба являются функциями от Δ в первой степени, то коэффициент K не будет зависеть от Δ . В нахождении прогиба узла нет необходимости, однако, сократив дробь на Δ , мы фактически использовали условие совместности деформаций.

В результате перемещения одного из узлов в остальных узлах возникают реакции, величина и направление которых определяется коэффициентами переноса. Назовем их долями реакций T_i . Иначе говоря, это доли усилия P , приложенного над удаленной опорой. Перенесенными реакциями называются усилия, возникающие в жестких опорах при перемещении данного узла (R_{CP} на фиг 2). Отношение $\kappa_{BC} = \frac{R_{CP}}{R_{BP}}$ называется коэффициентом переноса с точки B на точку C . Закончив распределение одной мнимой реакции, временная опора восстанавливается, и перемещение данной точки исключается. Удалив другую временную опору C , разложим сумму усилий, приложенных или перенесенных в точку C , на продольное и поперечное направления, а затем находим распределение этих усилий по всем (включая и мнимые) опорам данной балки, пользуясь коэффициентами переноса. Если система имеет более двух мнимых опор, то аналогичным образом они все удаляются по одной, перераспределяя реакции. Закончив весь первый цикл распределения реакций мнимых опор, сумма перенесенных долей реакций над ними еще не равна нулю.

Т а б л и ц а I

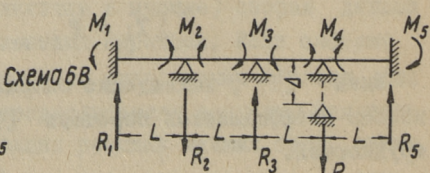
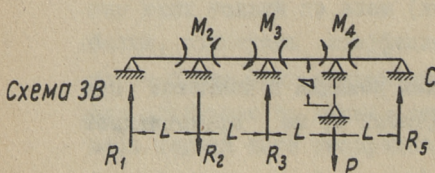
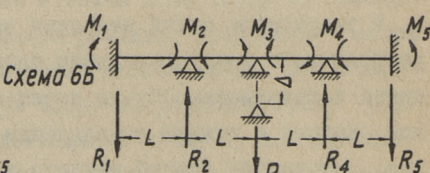
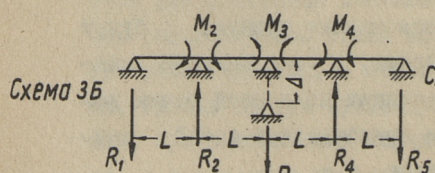
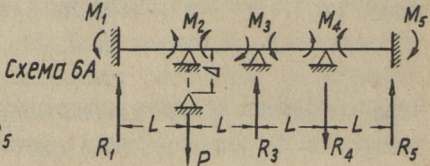
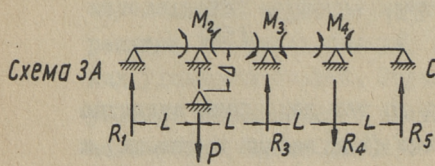
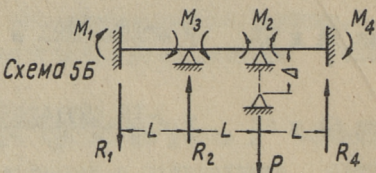
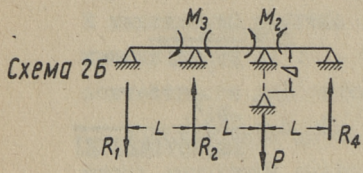
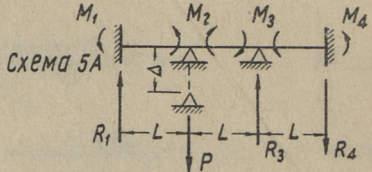
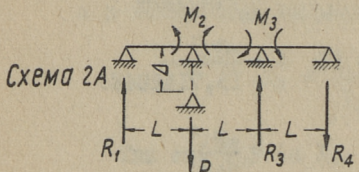
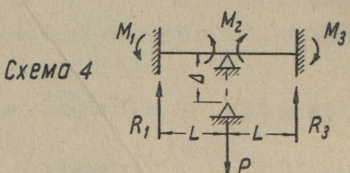
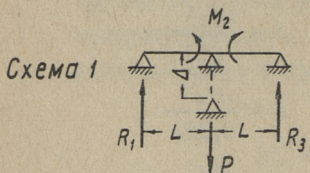
Схема I	$P = \frac{-6EJ\Delta}{L^3} = \Sigma T_i$	$\Delta = \frac{-PL^3}{6EJ}$
Схема 2А и 2Б	$P = \frac{-9,6EJ\Delta}{L^3} = \Sigma T_i$	$\Delta = \frac{-PL^3}{9,6EJ}$
Схема 3А и 3В	$P = \frac{-9,8571EJ\Delta}{L^3} = \Sigma T_i$	$\Delta = \frac{-PL^3}{9,8571EJ}$
Схема 3Б	$P = \frac{-13,714286EJ\Delta}{L^3} = \Sigma T_i$	$\Delta = \frac{-PL^3}{13,714286EJ}$
Схема 4	$P = \frac{-24EJ\Delta}{L^3} = \Sigma T_i$	$\Delta = \frac{-PL^3}{24EJ}$
Схема 5А и 5Б	$P = \frac{-19,2EJ\Delta}{L^3} = \Sigma T_i$	$\Delta = \frac{-PL^3}{19,2EJ}$
Схема 6А и 6В	$P = \frac{-18,85714285EJ\Delta}{L^3} = \Sigma T_i$	$\Delta = \frac{-PL^3}{18,85714285EJ}$
Схема 6Б	$P = \frac{-15EJ\Delta}{L^3} = \Sigma T_i$	$\Delta = \frac{-PL^3}{15EJ}$

Циклы переноса следует повторять до тех пор, пока величины переносимых сил не будут равными (или весьма близкими) к нулю.

В результате такой итерации все минимые реакции будут распределены между реальными опорами, и вся система окажется в равновесии. Сумма перенесенных из данной точки долей реакции в каждой направлении представляет собой усилие, вызывающее прогиб данного узла, т.е.

$$\Sigma T_i = P.$$

Зная ΣT_i , нахождение опорных реакций и моментов при помощи коэффициентов переноса (табл. 3) не представляет трудностей.



Фиг. 3

Опорные изгибающие моменты и коэффициенты переноса
для элементов с $EJ = const$.

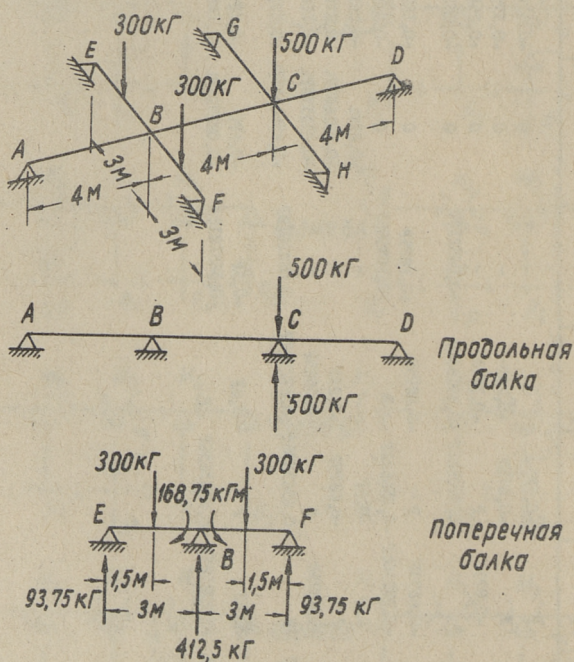
Схема по Фиг. 2	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
I	-0,5P	P	-0,5P	-	-	0	-0,5PL	0	-	-
2A	-0,375P	P	-0,875P	+0,25P	-	0	-0,375PL	+0,25PL	0	-
2B	+0,25P	-0,875P	P	-0,375P	-	0	+0,25PL	-0,375PL	0	-
3A	-0,369565P	P	-0,956522P	+0,391304P	-0,065217P	0	-0,369565PL	+0,26087PL	-0,065217PL	0
3B	+0,1875P	-0,6875P	P	-0,6875P	+0,1875P	0	+0,1875PL	-0,3125PL	+0,1875PL	0
3B	-0,065217P	+0,391304P	-0,956522P	P	-0,369565P	0	-0,65217PL	+0,26087PL	-0,369565PL	0
4	-0,5P	P	-0,5P	-	-	+0,25PL	-0,25PL	+0,25PL	-	-
5A	-0,5625P	P	-0,6875P	+0,25P	-	+0,25PL	-0,270833PL	+0,166667PL	-0,833333PL	-
5B	+0,25P	-0,6875P	P	-0,5625P	-	-0,833333PL	+0,166667PL	-0,270833PL	+0,25PL	-
6A	-0,5681818P	P	-0,6363636P	+0,272727P	-0,0681818P	+0,2954545PL	-0,272727PL	+0,1590909PL	-0,0454545PL	+0,022727PL
6B	+0,3P	-0,8P	P	-0,8P	+0,3P	-0,1PL	+0,2PL	-0,3PL	+0,2PL	-0,1PL
6B	-0,0681818P	+0,272727P	-0,6363636P	P	-0,5681818P	+0,022727PL	-0,0454545PL	+0,1590909PL	-0,272727PL	+0,2954545PL

Для наиболее часто встречающихся систем (см. фиг. 3) коэффициенты переноса и опорные моменты приведены в таблице 2, составленной И. Фейдером [2]. Формулы для определения P и Δ для каждого случая сведены в таблицу 1. В дальнейшем считаем положительными:

усилия, направленные вверх,
моменты, вызывающие растяжение нижнего волокна,
прогибы, направленные вниз.

Далее приводим пример решения балочной системы методом распределения реакций.

Пример



Фиг. 4

Рассмотрим представленную на фиг. 4 систему из одной продольной и двух поперечных балок с $EJ = \text{const}$. Все пролеты у продольной балки - 4 м, а у поперечных - 3 м.

Балки ABCD и EBF с мнимыми опорами приведены на фиг. 4; опорные реакции определены по готовым формулам [1].

Прогиб продольной балки в точке В вызывается приложенным в этой точке усилием

$$P_p = \frac{-9,6 EJ\Delta}{L_p^3} \cdot$$

То же для поперечной балки

$$P_R = \frac{-6 EJ\Delta}{L_R^3} \cdot$$

Коэффициенты распределения:

продольный

$$K_p = \frac{\frac{9,6}{4^3}}{\frac{9,6}{4^3} + \frac{6}{3^3}} = 0,4030,$$

поперечный

$$K = \frac{\frac{6}{3^3}}{\frac{9,6}{4^3} + \frac{6}{3^3}} = 0,5970.$$

Коэффициент переноса

$$\kappa_{BC} = \kappa_{CB} = -0,875.$$

Реакции мнимых опор $R_C = 500 \text{ кГ}$

и $R_B = 412,5 \text{ кГ}$

будут нами распределены между остальными опорами.

Расчет удобно вести в табличной форме. Удалив сначала опору В, находим, что $0,597(-412,5) = -246,2625 \text{ кГ}$ непосредственно воспринимается поперечной балкой (опорами Е и F), а $0,403 \cdot 412,5 = 166,2375 \text{ кГ}$ передается через продольную балку на остальные опоры. При этом в точку С переносится

$$-0,875(-166,2375) = 145,458 \text{ кГ}$$

в добавок к имеющейся там реакции $R_B = 500 \text{ кГ}$.

Первый цикл распределения окончен. Удалив опору С и восстановив опору В, находим распределение усилия 645,458 между балками ABCD и GCH, причем часть П его переносится обратно в узел В. При повторении циклов П будет стремиться к нулю, т.е. система будет уравновешена.

	Узел В		Узел С	
	продольная балка	поперечная балка	продольная балка	поперечная балка
I	2	3	4	5
К	0,4030	0,5970	0,4030	0,5970
R	+412,5			
T_i	-166,2375	-246,2625		
$x_{BC} T_{BL} + R_C$			+645,458	
T_i			-260,120	-385,338
П	+227,605			
T_i	-91,725	-135,880		
П			+80,259	
T_i			-32,344	-47,915
П	+28,301			
T_i	-11,405	-16,896		
П			+9,979	
T_i			-4,022	-5,957
П	+3,519			
T_i	-1,418	-2,101		
П			+1,241	
T_i			-0,500	-0,741
П	+0,437			
T_i	-0,176	-0,261		
П			+0,154	
T_i			-0,062	-0,092
П	+0,054			
T_i	-0,022	-0,032		
П			+0,019	
T_i			-0,008	-0,011

	1	2	3	4	5
П		+0,007			
T _i		-0,003	-0,004		
П				+0,003	
T _i				-0,001	-0,002
Σ(R _i +Π _i)	+672,423			+737,113	
ΣT _i	-270,9865	-401,4365	-297,057	-440,056	
Уравно- вешенная реакция	+401,4365	-401,4365	+440,056	-440,056	

Условие совместности деформаций дает нам возможность проверки решения.

В точке В:

$$\Delta EJ = -\frac{PL_P^3}{9,6} = \frac{270,9865 \cdot 4^3}{9,6} = +1806,58 \text{ кг м}^3$$

$$\Delta EJ = -\frac{PL_R^3}{6} = \frac{401,4365 \cdot 3^3}{6} = +1806,46 \text{ кг м}^3$$

В точке С:

$$\Delta EJ = \frac{297,057 \cdot 4^3}{9,6} = +1980,38 \text{ кг м}^3$$

$$\Delta EJ = \frac{440,056 \cdot 3^3}{6} = +1980,25 \text{ кг м}^3$$

Зная ΣT_i , находим реакции всех опор и моменты изгиба при помощи коэффициентов переноса (табл. 2).

$$R_A = (-0,375)(-270,986) + 0,25(-297,057) = +27,356 \text{ кг}$$

$$R_D = (-0,375)(-297,057) + 0,25(-270,986) = +43,650 \text{ кг}$$

$$R_E = R_F = 93,75 - 0,5(-401,436) = +294,468 \text{ кг}$$

$$R_G = R_H = -0,5(-440,056) = +220,028 \text{ кг}$$

$$M_{BP} = (-0,375)(-270,986) \cdot 4 + 0,25(-297,057) \cdot 4 = +109,422 \text{ кгм}$$

$$M_{CP} = (-0,375)(-297,057) \cdot 4 + 0,25(-270,986) \cdot 4 = +174,600 \text{ кгм}$$

$$M_{BR} = R_E L = 294,468 \cdot 3 = +883,404 \text{ кгм}$$

$$M_{CR} = R_G L = 229,028 \cdot 3 = +660,084 \text{ кгм}$$

Л и т е р а т у р а

1. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений, Том расчетно-теоретический. Госстройиздат, 1960.

2. I. F a d e r. Grid analysis by the reaction distribution method. Transactions of the American Society of Civil Engineers, volume 128, part II, New York 1963.

УДК 621.031

624.04

Х.Х. Лауль, М.Г. Вайк

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КВАДРАТНЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОБОЛОЧЕК ВИДА ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО
ПАРАБОЛОИДА С ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ АРМАТУРОЙ

В в е д е н и е

В последние годы в строительстве все больше и больше нашли применения железобетонные покрытия вида гиперболических параболоидов. Их преимуществом являются выразительная архитектурная форма, относительно простое возведение и удобное устранение дождевых вод.

Такие оболочки в настоящее время проектируются при помощи моделирования или рассчитываются по мембранной теории. Но мембранная теория слишком грубо описывает работу таких оболочек. В связи с тем во многих статьях разных авторов рассматривается моментная теория гиперболических параболоидов. Но только немногие из них доведены до цифровых результатов, при которых обычно приняты крайние условия типа Навье.

Предварительно напряженные оболочки вида гиперболического параболоида, судя по литературе, еще очень мало изучены.

В настоящей статье изложены некоторые результаты испытаний предварительно напряженной модели названного вида покрытия.

Моделирование

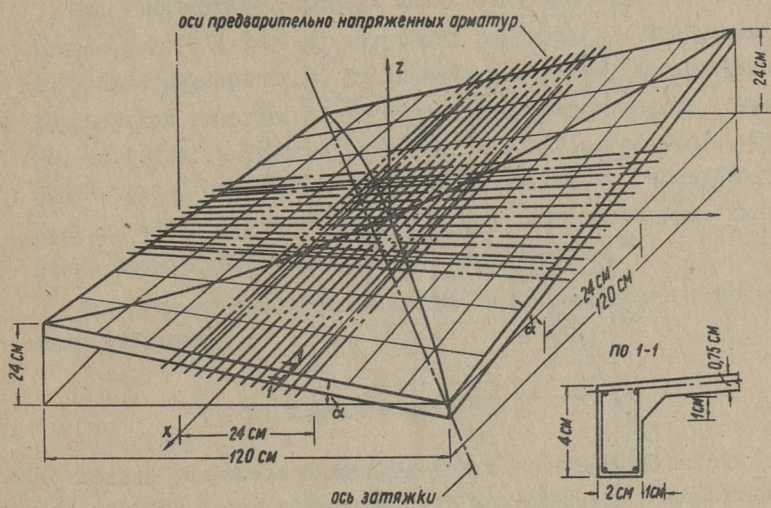
Поверхность оболочки относится к равносторонним гиперболическим параболоидам. В выбранной системе координат поверхность описывается уравнением $Z = -kxy$.

Основные размеры модели приведены на фиг. 1 и 2. При таких размерах оболочка относится к пологим оболочкам. Масштаб моделирования выбран 1:10. Испытания проведены при двух вариантах предварительного напряжения (см. фиг. 1 и 2). В дальнейшем иазваны соответственно I вариант и II вариант.

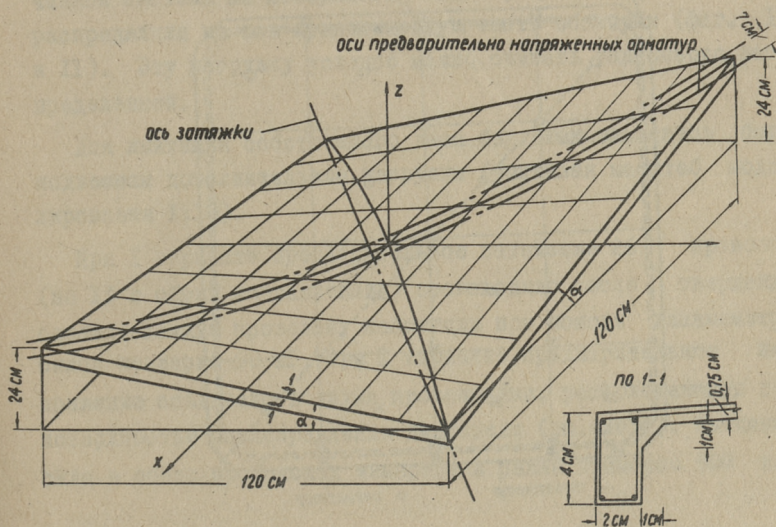
Модели изготовлены из цементного раствора 1:2,5 при I варианте и 1:2,3 при II варианте (портландцемент марки "400" и песок, не содержащий частиц диаметром более 2,5 мм). Водоцементное отношение раствора - 0,49 при I варианте и 0,41 при II варианте. Одновременно с бетонированием модели были изготовлены образцы: призмы сжатия 4x4x16 см и образцы растяжения с поперечными сечениями 2x1 см, твердение которых происходило в одинаковых условиях с оболочкой. В день испытания модели были определены модули упругости образцов. Результаты испытания приведены на фиг. 3.

Ненапрягаемая арматура в оболочке из проволоки ϕ 1 мм, в бортовых элементах продольная арматура из проволоки ϕ 2 мм и хомуты из проволоки ϕ 1 мм (ϕ 1 мм - $\sigma_p = 7650$ кг/см²; ϕ 2 мм - $\sigma_p = 8550$ кг/см²; $E = 2,12 \cdot 10^6$ кг/см²).

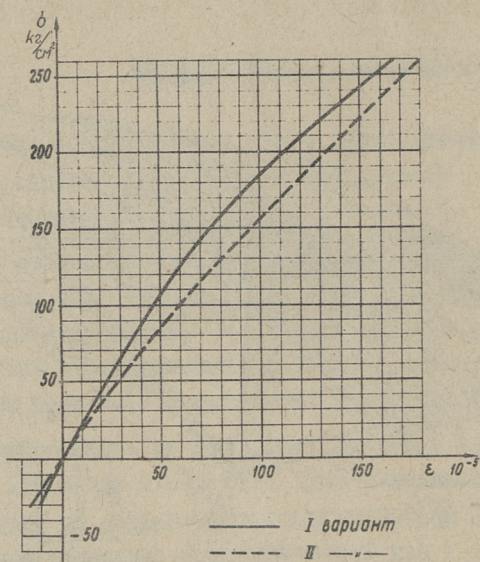
Напрягаемая арматура при I варианте ϕ 1,2 мм ($\sigma_p = 15300$ кг/см²; $E = 1,88 \cdot 10^6$ кг/см²) и при II варианте ϕ 4 мм ($\sigma_p = 17200$ кг/см²; $E = 1,89 \cdot 10^6$ кг/см²). При I варианте проволоки, подвергаемые предварительному напряжению, были покрыты слоем парафина, благодаря чему было возможно напрягать проволоку после твердения бетона. При II варианте предварительно напряженная арматура находилась под поверхностью оболочки.



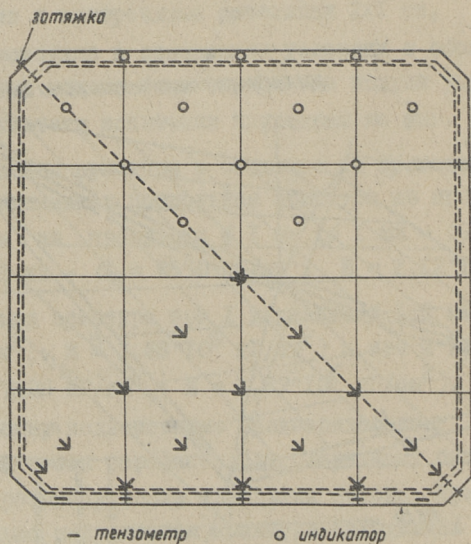
Фиг. 1. Конструктивная схема модели (I вариант)



Фиг. 2. Конструктивная схема модели (II вариант)



Фиг. 3. График сжатия и растяжения образцов



Фиг. 4. Схема расположения тензодатчиков и индикаторов

Нижние углы оболочки соединены затяжкой по главной диагонали, у которой жесткость на растяжение $E\epsilon = 2,32 \cdot 10^6$ кг.

Опалубка модели бортовых элементов деревянная, а в криволинейной части из цементного раствора. Поверхность опалубки предварительно шпаклевалась и далее неоднократно покрывалась оксолью, на которую наклеивалась тонкая бумага. Поверхность бумаги покрывалась тонким слоем масла. Это обеспечивало отсутствие схватывания бетона с опалубкой. Криволинейная часть оболочки бетонирована по маякам. Уплотнение происходило трамбовкой и заглаживанием.

Для лучшего обнаружения трещин все поверхности модели были выбелены.

Испытание модели

Модель опиралась в четырех углах и была установлена на специальный стенд испытаний, где проводилось загрузение (фиг. 7 и 8). Реакция на каждой опоре была измерена.

Общая нагрузка поверхности передавалась при помощи рычажной системы на поверхность модели, где ее 32 рейками распределили на всю криволинейную часть оболочки (фиг. I0 и II). Эту нагрузку условно можно считать равномерно распределенной.

Для имитации собственного веса бортовых элементов были подвешены дополнительные нагрузки (учитывая масштаб моделирования I:I0).

При I варианте предварительное натяжение 26 проволок (по 13 в обоих направлениях) происходило после твердения бетона. Каждую проволоку напрягали при помощи динамометра силой примерно 90 кг. При II варианте предварительное напряжение создавалось двумя проволоками, расположенными под поверхностью по направлению диагонали (см. фиг. 2). Натяжная сила в обеих проволоках измерена и равна примерно 500 кг.

Измерялись относительные удлинения поверхности и бортовых элементов. Для этого применялись электрические тензометры (тензодатчики) базой 20 мм. На фиг. 4 показана схема расположения тензодатчиков (на обозначенном месте тензодатчики располагаются на верхней и нижней поверхности оболочки). При помощи тензодатчиков измерено также относительное удлинение затяжки. Прогибы модели измерены при помощи индикаторов, расположение которых показано на фиг. 4.

Результаты испытания

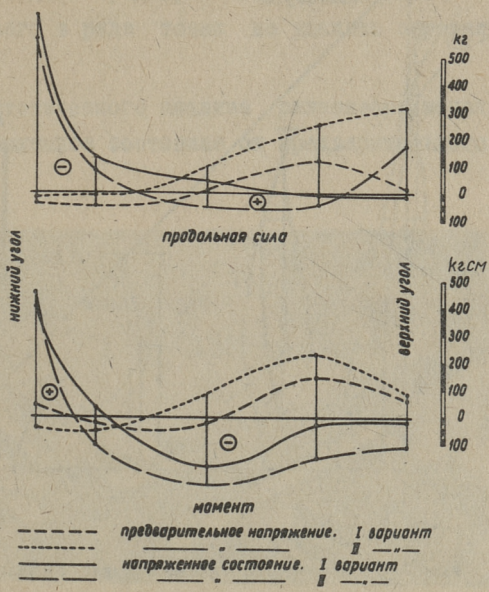
На фиг. 5, 7 и 8 показано распределение нормальных сил в модели. Напряженное состояние вызывается предварительным натяжением, нагрузкой на криволинейные части $q = 450$ кг/м² и нагрузкой на бортовые элементы $q_0 = 20,4$ кг/м.

Во время предварительного натяжения не включена в работу затяжка, так как целью натяжения является главным образом предварительное напряжение криволинейной части оболочки.

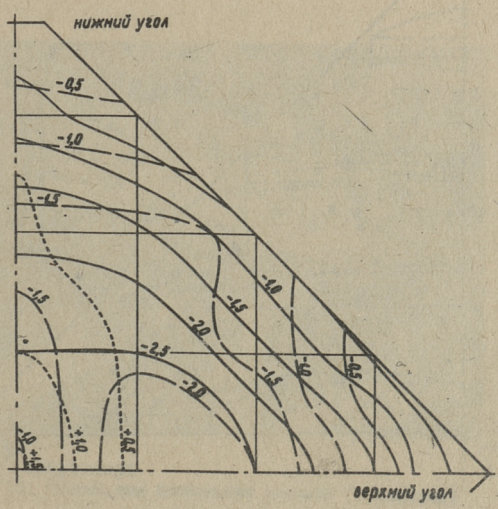
Предварительное напряжение (при I варианте) в криволинейной части оболочки вызывает сжимающие силы, за исключением узкой полосы вдоль бортовых элементов.

Из-за предварительного натяжения (при II варианте) существенная зона сжатия располагается вдоль напрягаемой арматуры. При загрузке в этой зоне возникает наибольшие растягивающие силы.

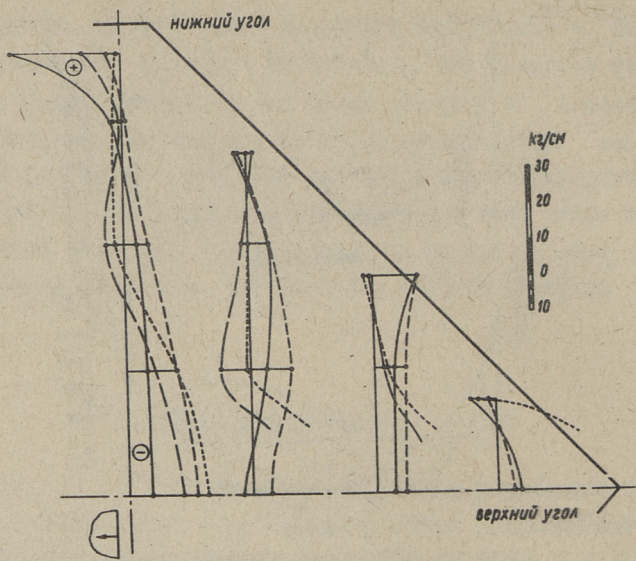
При предварительном натяжении во II варианте возникает по траектории натянутой арматуры линейная вертикальная нагрузка вследствие перенаправляющих сил. Эта нагрузка вызывает положительные изгибающие моменты по главной диагонали. От этих изгибающих моментов в средней зоне криволинейной части оболочки на верхней поверхности появляются



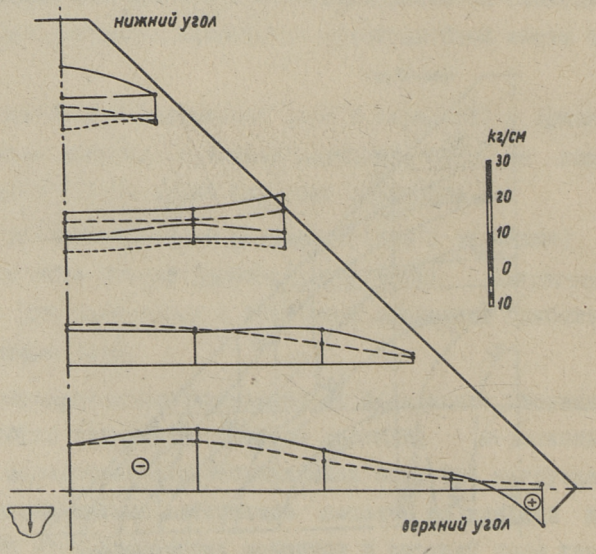
Фиг. 5. Распределение внутренних сил в портовом элементе



Фиг. 6. Прогибы, в мм



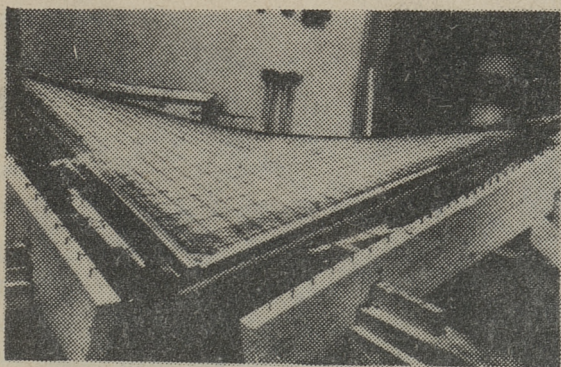
Фиг. 7. Распределение нормальных сил в оболочке (1)



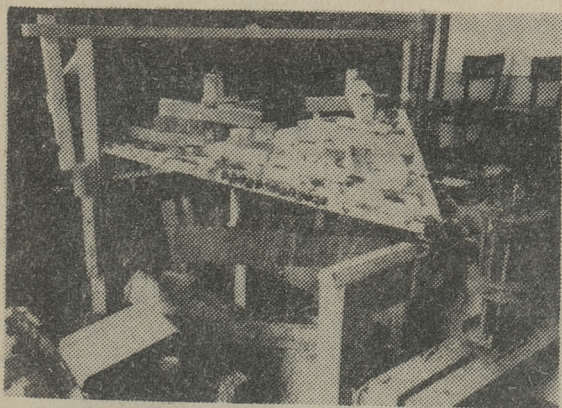
Фиг. 8. Распределение нормальных сил в оболочке (2)

микротрещины вдоль предварительно напряженной арматуры, вследствие чего в ряде точек не удалось определить усилия.

Из макростатического анализа равновесия модели следует, что напряженное состояние от предварительного напря-

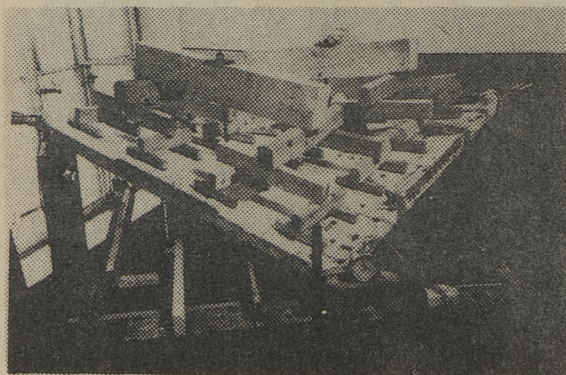


Фиг. 9. Опалубка модели

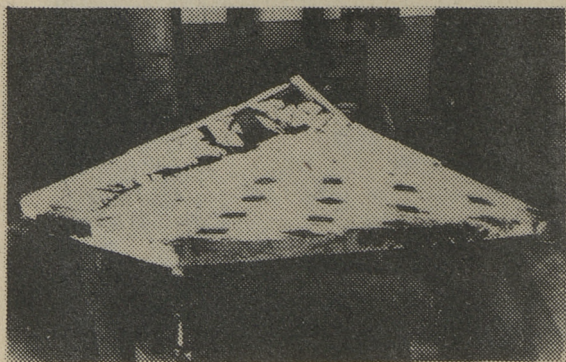


Фиг. 10. Общий вид испытания модели (1 вариант)

жения, показанное на фиг. 5, 7 и 8 (которое вызвано только предварительным напряжением незагруженной модели), в ходе загрузки изменяется. Очевидно названное явление вызвано изменением жесткости бортового элемента вследствие дополнительных микротрещин.



Фиг.11. Общий вид испытания модели (II вариант)



Фиг.12. Общий вид разрушения модели (I вариант)

На фиг. 5, 7 и 8 приведены усилия в модели. Для перехода от усилий модели (масштаба 1:10) к действительной конструкции соответствующие коэффициенты следующие: при нагрузке на единицу площади (а также при напряжении) — 1, при линейной нагрузке и при внутренних нормальных силах (на единицу длины) — 10, при сосредоточенной силе — 100 и при изгибающих моментах бортового элемента — 1000.

Из эксперимента вытекает, что суммарная вертикальная нагрузка распределяется на одну нижнюю опору 43% и на одну верхнюю опору 7% (при обоих вариантах). При данных моделях растягивающая сила затяжки равна 106% от суммарной вертикальной нагрузки.

При дальнейшем нагружении в первую очередь открываются трещины в растянутой зоне бортовых элементов. Это происходит примерно при нагрузке 720 кг/м^2 . Первые заметные трещины в криволинейной части оболочки появились при нагрузке 1230 кг/м^2 и 1160 кг/м^2 (соответственно при I и II варианте), в то время как при ненапряженной модели они возникали при нагрузке 600 кг/м^2 [I].

Обе модели разрушились при случайно одинаковой внешней нагрузке 1480 кг/м^2 . Если принять за нормативную нагрузку 316 кг/м^2 , то коэффициентом запаса будет 4,7. Момент появления первых заметных трещин в оболочке превышает нормативную нагрузку в 3,9 и 3,7 раз.

Прогибы в оболочках приведены на фиг. 6. Максимальный прогиб оболочки при рассматриваемой нагрузке ($q = 450 \text{ кг/м}^2$ и $q_0 = 20,4 \text{ кг/м}$) 2,9 и 2,5 мм и у бортового элемента — 0,6 и 1,4 мм, соответственно в I и во II вариантах.

Экспериментальное исследование моделей показывает, что предварительное натяжение таких оболочек

- а) позволяет целесообразно применять высокомарочную проволоку,
- б) увеличивает трещиностойчивость оболочек,
- в) повышает жесткость конструкции.

Л и т е р а т у р а

Г. М. Х. Л е й б у р. Экспериментальное исследование квадратных в плане железобетонных оболочек вида гиперболического параболоида. Таллин 1964.

УДК 621.031
624.04

Х.Х. Лауль, А.И. Лавров

О РАСЧЕТЕ ДИАФРАГМ КОНОИДАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК

1. В в е д е н и е

Нагрузкой для диафрагм коноидальных оболочек являются сдвигающие усилия оболочки. Таким образом распределение внутренних сил в диафрагмах совершенно иного характера по сравнению с обычной — вертикальными силами загруженной аркой.

По техническому методу расчета коноидальных оболочек [4] находят с достаточной точностью усилия в средних районах продольного пролета оболочки, предполагая, что сдвигающие силы S изменяются вдоль оболочки линейно и имеют нулевые значения в середине продольного пролета.

По этому упрощенному представлению получаются неправдоподобные величины сдвигающих сил у диафрагм. Очевидно, наличие мощного элемента (диафрагмы) вызывает и значительные изменения в распределении усилий в торцевых районах оболочки. Расчет оболочки с учетом влияния потенциальной энергии диафрагм пока не осуществим.

В связи с этим в настоящей статье предлагается определить распределение сдвигающих сил у диафрагмы из условия минимума потенциальной энергии самой диафрагмы и потенциальной энергии сдвигающих сил на протяжении некоторой зоны краевого эффекта. При этом предполагается, что

простой краевой эффект не подвергается изменению при вариации усилий в диафрагме.

Надо отметить, что, конечно, справедливо было бы требовать минимума потенциальной энергии всей конструкции. Но поскольку при неблагоприятном распределении S в диафрагме может накопиться в несколько раз больше потенциальной энергии, чем в криволинейной части оболочки, то пренебрежение потенциальной энергией поверхности оболочки не может быть связано с большой ошибкой. Это показывали и экспериментальные исследования моделей - в диафрагмах не наблюдалось значительных изгибающих моментов.

Из данной задачи получают усилия в диафрагмах, а также максимальные сдвигающие силы в оболочке у диафрагм. При помощи последних находят максимальные растягивающие главные напряжения в углах оболочки, на которые рассчитывают соответственную косую арматуру.

Ниже рассматриваются диафрагмы, очерченные по окружности.

2. Метод расчета

Оболочка передает подавляющую часть своей нагрузки диафрагмам посредством сдвигающих сил. Аппроксимируем сдвигающие силы в виде

$$S \quad a_i \frac{s}{s_0} + \sum_i a_i \sin \frac{i\pi s}{s_0}, \quad (1)$$

где геометрические величины см. фиг. 1. При данной задаче целесообразно принять $i = 1; 3; 5 \dots$

Бортовой элемент рассматривается в виде стрингера.

Общие вертикальные реакции от всей нагрузки оболочки у высокой диафрагмы

$$A_n = qL \left(\frac{s_{00}}{2} + \frac{7}{24} \Delta s_0 \right) + q_0 \frac{L}{2} \quad (2)$$

и у низкой диафрагмы

$$A_0 = qL \left(\frac{S_{00}}{2} + \frac{1}{8} \Delta s_0 \right) + q_0 \frac{L}{2}. \quad (3)$$

При помощи условия равновесия в вертикальном направлении

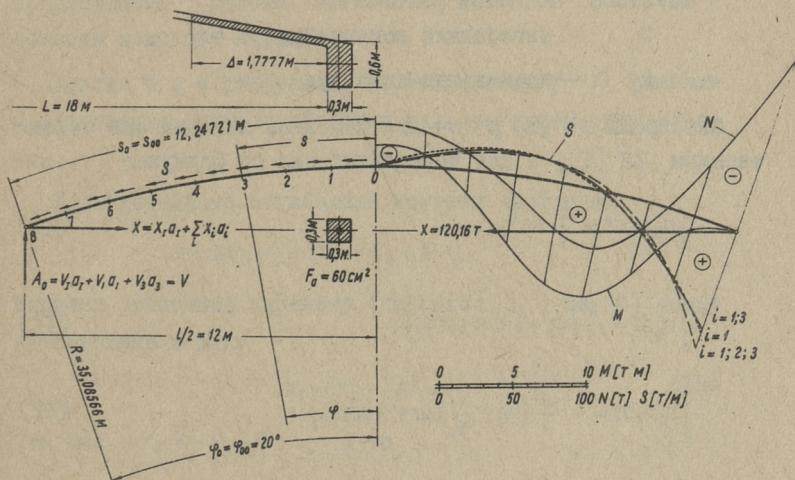
$$A = \sum V_i \sigma_i \quad (4)$$

один, т.н. зависимый параметр в (I) выражается через остальные, т.н. независимые параметры. Вертикальные составляющие сдвигающих сил V_i при $q_i = 1$ находят по формулам

$$V_i = R \left(\frac{\sin \varphi_0}{\varphi_0} - \cos \varphi_0 \right); \quad (5)$$

$$V_i = (-1)^{i+1} R \frac{\sin \varphi_0}{\frac{i\pi}{\varphi_0} - \frac{\varphi_0}{i\pi}}, \quad (6)$$

где R — радиус кривизны диафрагмы,
 φ_0 — половина центрального угла.



Фиг. 1

Статистически неопределенные усилия затяжки χ_i (см. фиг. 1) при $\alpha_T = \alpha_i = 1$ определяются из условия

$$\chi_i \delta_{11} + \delta_{10}^{(i)} = 0, \quad (7)$$

где

$$\delta_{11} = \int_0^{\varphi_0} m_b^2 ds + \frac{J_S}{F_S} \int_0^{\varphi_0} n_b^2 ds + \frac{J_S}{n F_x} \frac{l}{2}; \quad (8)$$

$$\delta_{10}^{(i)} = V_i \int_0^{\varphi_0} m_a m_b ds + \int_0^{\varphi_0} m_i m_b ds + \frac{J_S}{F_S} (V_i \int_0^{\varphi_0} n_a n_b ds + \int_0^{\varphi_0} n_i n_b ds); \quad (9)$$

$n = \frac{E_x}{E_S}$ — отношение приведенных модулей упругости материала затяжки и диафрагмы;

J_S — момент инерции диафрагмы;

F_S и F_x — приведенные площади сечений соответственно диафрагме и затяжке;

m_i — изгибающий момент при $\alpha_i = 1$;

n_i — нормальная сила при $\alpha_i = 1$.

Интегралы в (8) и (9) для моментов находим при помощи таблицы I2 [1], а для нормальных сил по формулам

$$\int n_a n_b ds = \frac{R}{2} \sin^2 \varphi_0; \quad (10)$$

$$\int n_b^2 ds = \frac{R}{2} (\varphi_0 + \sin \varphi_0 \cos \varphi_0); \quad (11)$$

$$\int n_T n_b ds = -\frac{R^2}{2} \left[\left(\varphi_0 - \frac{1}{\varphi_0} \right) \sin \varphi_0 + \cos \varphi_0 \right]; \quad (12)$$

$$\int n_i n_b ds = \frac{R^2}{2} \frac{(-1)^{i+2} \sin \varphi_0}{\frac{i\pi}{\varphi_0} - \frac{\varphi_0}{i\pi}} \left[\frac{2}{\left(\frac{i\pi}{\varphi_0} \right)^2 - 1} + \varphi_0 \operatorname{ctg} \varphi_0 + 1 \right]. \quad (13)$$

Независимые параметры определяются из условия минимума потенциальной энергии диафрагмы (учитывается работа изгибающих моментов, нормальных сил, силы затяжки) и сдвигающих сил в области краевого эффекта оболочки:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial a_i} = \int_0^{\varphi_0} M \frac{\partial M}{\partial a_i} ds + \frac{J_S}{F_S} \int_0^{\varphi_0} N \frac{\partial N}{\partial a_i} ds + \frac{J_S}{\pi F_x} \frac{l}{2} \chi \frac{\partial \chi}{\partial a_i} + \frac{E_S J_S}{G F} \int_0^{\varphi_0} S \frac{\partial S}{\partial a_i} ds = 0, \quad (I4)$$

где G — модуль сдвига,

$F = \delta \Delta$ — площадь сечения оболочки в области краевого эффекта (ширина зоны $\Delta \approx \sqrt{R\delta}$).

В выражении минимума потенциальной энергии не учтены работы поперечных сил диафрагмы и нецентренное прилагание S относительно оси диафрагмы, поскольку они не имеют существенного влияния на результаты. Также пренебрежена работа изгибающих моментов оболочки в области краевого эффекта.

Усилия M и N диафрагмы, нормальную силу χ затяжки и сдвигающие силы S оболочки находим путем суммирования.

Действительные изгибающие моменты диафрагмы

$$M = a_I m_I + \sum_i a_i m_i + V m_\sigma + \chi m_b.$$

Выразим зависимый параметр (например a_I) из (4) через независимые в виде

$$a_I = K_I + \sum_i a_i k_{Ii}. \quad (I5)$$

Так как $k_{Ii} V_I + V_i = 0$, то

$$M = K_I m_I + K_I V_I m_\sigma + K_I \chi m_b + \sum_i a_i [m_i + k_{Ii} m_I + (k_{Ii} \chi_I + \chi_i) m_b] = m'_0 + \sum_i a_i m'_i. \quad (I6)$$

Нормальные силы в сечениях n диафрагмы

$$N_n = -X \cos \varphi_n - V \sin \varphi_n + \sum_i \int_{s_0}^{s_n} a_i \delta_i \cos(\varphi_n - \varphi) ds.$$

Нормальная сила от нагрузки S (последний член)

$$\sum_i \int_{s_0}^{s_n} a_i \delta_i \cos(\varphi_n - \varphi) ds = \frac{R}{100} (a_I \varkappa_I + \sum_i a_i \varkappa_i),$$

где

$$\varkappa_I = \frac{100}{\varphi_0} \left[\sin \varphi_n (\sin \varphi_0 - \varphi_0 \cos \varphi_0) + \cos \varphi_n (\cos \varphi_0 + \varphi_0 \sin \varphi_0) - 1 \right];$$

$$\varkappa_i = \frac{100(-1)^{i+1}}{\frac{i\pi}{\varphi_0} - \frac{\varphi_0}{i\pi}} \left(\sin \varphi_n \sin \varphi_0 + \cos \varphi_n \cos \varphi_0 + (-1)^{i+1} \cos \frac{i\pi \varphi_n}{\varphi_0} \right).$$

Действительные нормальные силы диафрагм, сдвигающие силы оболочки и растягивающие силы затяжки

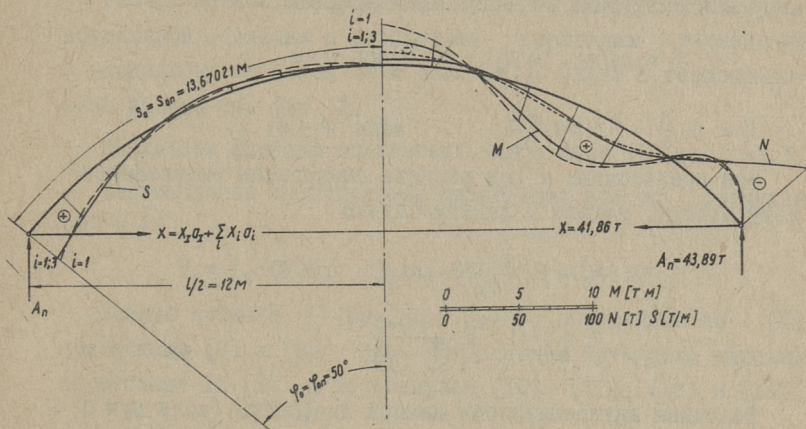
$$N = n'_0 + \sum_i a_i n'_i; \quad (I7)$$

$$S = K_I \frac{S}{S_0} + \sum_i a_i \left(k_{Ii} \frac{S}{S_0} + \sin \frac{i\pi S}{S_0} \right) = S'_0 + \sum_i a_i S'_i; \quad (I8)$$

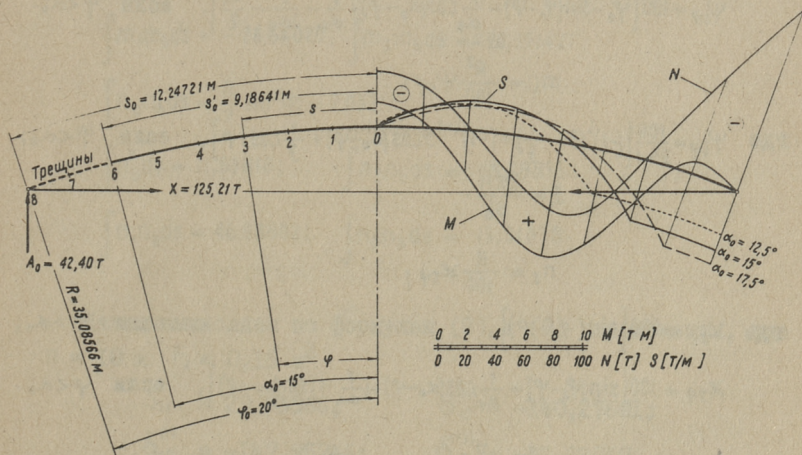
$$X = a_I X_I + \sum_i a_i X_i. \quad (I9)$$

В некоторых случаях при расчете низкой диафрагмы значения сдвигающих сил, следовательно, главных растягивающих напряжений оказываются чрезмерно большими (см. фиг. 2).

При низких диафрагмах главные растягивающие напряжения, как правило, превышают прочность бетона при растяжении и образуются трещины, вследствие чего главные растягивающие усилия будут восприниматься арматурой. Далее напряжения в арматуре могут достичь предела текучести стали и трещины будут развиваться до определенного предела и произойдет перераспределение сдвигающих сил у низких диафрагм.



Фиг. 2



Фиг. 3

На протяжении трещины предположим постоянную элпору S .
 В данном случае распределение сдвигающих сил аппроксимируется следующим образом (см. фиг. 3):

$$S = \text{const.} = \sigma_I, \quad \text{если } \varphi > \alpha_0,$$

$$S = \sigma_I \frac{S}{S_0} + \sum_i a_i \sin \frac{i\pi S}{S_0}, \quad \text{если } \varphi < \alpha_0.$$

Все предпосылки и ход расчета аналогичны вышеизложенному методу, только в данном случае

$$V_I = R \left(\frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} - \cos \varphi_0 \right);$$

$$V_i = (-1)^{i+1} R \frac{\sin \alpha_0}{\frac{i\pi}{\alpha_0} - \frac{\alpha_0}{i\pi}}.$$

Величины внутренних сил низкой диафрагмы (если $\sigma_I = \sigma_i = 1$)

$$m_I = -\frac{R^2}{100} \Psi_{I\varphi},$$

где $\Psi_{I\varphi} = 100 \left[(\varphi_0 - \alpha_0) - \sin(\varphi_0 - \varphi) \right],$ если $\varphi > \alpha_0;$

$$\Psi_{I\varphi} = 100 \left[\varphi_0 - \sin(\varphi_0 - \varphi) - \frac{1}{\alpha_0} \cos(\alpha_0 - \varphi) + \frac{1}{\alpha_0} - \frac{\varphi^2}{2\alpha_0} - \frac{\alpha_0}{2} \right], \quad \text{если } \varphi < \alpha_0.$$

$$m_i = \frac{R^2}{100} \Psi_{i\varphi},$$

где $\Psi_{i\varphi} = \frac{100}{j^2 - 1} \left[(-1)^i \left(j - \frac{1}{j} \right) + (-1)^{i+1} j \cos(\alpha_0 - \varphi) + \frac{1}{j} \cos j\varphi \right],$ если $\varphi < \alpha_0;$

$$j = \frac{i\pi R}{S_0}.$$

$$n_I = \frac{R}{100} \varkappa_{I\varphi},$$

где $\varkappa_{I\varphi} = 100 \left[\sin(\varphi_0 - \varphi) \right],$ если $\varphi > \alpha_0;$

$$\varkappa_{I\varphi} = 100 \left[\sin(\varphi_0 - \varphi) + \frac{1}{\alpha_0} \cos(\alpha_0 - \varphi) + \left(\frac{\varphi}{\alpha_0} - 1 \right) \sin(\alpha_0 - \varphi) \right], \quad \text{если } \varphi < \alpha_0.$$

$$n_i = \frac{R}{100} \varkappa_{i\varphi},$$

где $\varkappa_{i\varphi} = \frac{100}{j^2 - 1} \left[-\left(j - \frac{1}{j} \right) + j \cos(\alpha_0 - \varphi) + \frac{1}{j} \cos j\varphi \right],$ если $\varphi < \alpha_0.$

3. Численные примеры

Расчет низкой диафрагмы (очерченной по окружности) конoidalной оболочки с неопертыми бортовыми элементами с продольным пролетом 18 м (см. [4]). Схема и геометрические данные см. фиг. 1.

Назначаем функцию сдвигающих сил в виде (1), где $i=1,3$.

Вертикальные составляющие сдвигающих сил по формулам (5) и (6)

$$V_I = 1,40771; \quad V_1 = 1,35; \quad V_3 = 0,44506.$$

Усилия затяжки X (при $\sigma_I = \sigma_i = 1$) определяем из (7) при помощи (8) и (9), где встречающиеся интегралы находим по таблице I2 [1] и по формулам (10), (11), (12) и (13).

$$\int m_a m_b ds = \frac{R^3}{10^4} (-29,7169) = 128,34899;$$

$$\int m_b^2 ds = 29,15882; \quad \int m_I m_b ds = -41,77874;$$

$$\int m_1 m_b ds = -26,64020; \quad \int m_3 m_b ds = -20,35142;$$

$$\int n_a n_b ds = \frac{R}{2} \sin^2 \varphi_0 = 2,05213;$$

$$\int n_b^2 ds = 11,63816; \quad \int n_I n_b ds = 48,78836;$$

$$\int n_1 n_b ds = 46,98802; \quad \int n_3 n_b ds = 15,31678.$$

Далее вычисляем по формулам (8) и (9) перемещения, где $n = 10$ и $F_x = 0,15 \text{ м}^2$

$$\delta_{11} = 29,93966; \quad \delta_{10}^{(1)} = -140,27601;$$

$$\delta_{10}^{(1)} = -147,95746; \quad \delta_{10}^{(3)} = -37,22030.$$

Из (7) получим составляющие силы затяжки $\chi_1 = 4,68524$;
 $\chi_1 = 4,94181$; $\chi_3 = 1,24317$.

Общая вертикальная реакция $A_0 = 42,39930$ т.

Выразим зависимый параметр через независимые в виде
 (15)

$$a_1 = 30,119407 - 0,959006 a_1 - 0,316160 a_3 .$$

По формулам (16), (17) и (18) рассчитаем составляющие внутренних сил. Расчет удобно произвести в табличной форме, используя таблицы [1]. Результаты расчета см. табл. I.

Для определения независимых параметров составляются условия минимума потенциальной энергии (14) половины диафрагмы

$$\frac{\partial \Pi}{\partial a_i} = \int_0^{s_0} m'_0 m'_i ds + a_i \int_0^{s_0} (m'_i)^2 ds + a_k \int_0^{s_0} m'_i m'_k ds + \frac{J_s}{F_s} \left[\int_0^{s_0} n'_0 n'_i ds + a_i \int_0^{s_0} (n'_i)^2 ds + \right. \\ \left. + a_k \int_0^{s_0} n'_i n'_k ds \right] + \frac{J_s}{0,425 F} \left[\int_0^{s_0} S'_0 S'_i ds + a_i \int_0^{s_0} (S'_i)^2 ds + a_k \int_0^{s_0} S'_i S'_k ds \right] + \frac{J_s}{F_x} \frac{l}{2} \chi \frac{\partial \chi}{\partial a_i} = 0 ,$$

где i и k индексы независимых параметров a_1 и a_3 .

Встречающие здесь интегралы определяем численным интегрированием. В последнем члене, выражающем влияние потенциальной энергии затяжки

$$\chi \frac{\partial \chi}{\partial a_i} = (k_{1i} \chi_1 + \chi_i) \left[k_{1i} \chi_1 + a_i (k_{1i} \chi_1 + \chi_i) + a_3 (k_{13} \chi_1 + \chi_3) \right] .$$

Подставив вычисленные интегралы в условие минимума потенциальной энергии, получим систему уравнений

$$73,29736 + 1,57306 a_1 - 0,75280 a_3 = 0 ,$$

$$-36,72085 - 0,75280 a_1 + 1,08091 a_3 = 0 ,$$

откуда

$$a_1 = -45,50388 ; \quad a_3 = 2,28101 .$$

Из (15) вычисляем зависимый параметр $a_1 = 73,03675$.

Вычисления действительных изгибающих моментов M и нормальных сил N диафрагмы и сдвигающих сил S оболочки представлены в таблице 2 и на фиг. 2.

Сила затяжки

$$X = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 = 120,16 \text{ Т.}$$

Таким образом главные растягивающие напряжения в углах оболочки у низкой диафрагмы

$$\tau_0 = \frac{a_1}{\delta} = \frac{73,04}{0,09} = 812 \text{ Т/м}^2 = 81,2 \text{ кг/см}^2.$$

Как видно из численного примера, главную роль имеют параметры a_1 и a_2 , и вполне возможно отказаться от a_3 . Таким образом, задача значительно упрощается без ущерба в точности.

На фиг. 2 представлены результаты вычислений другой, высокого подъема диафрагмы ($\varphi_0 = 50^\circ$) при тех же размерах поперечных сечений. Максимальные главные растягивающие напряжения оболочки в данном случае

$$\tau_0 = \frac{24,27}{1 \cdot 0,09} = 270 \text{ Т/м}^2 = 27,0 \text{ кг/см}^2.$$

Как видно из численного примера низкой диафрагмы, для восприятия главных растягивающих напряжений постановка нужного количества кривой арматуры не всегда конструктивно возможна. Вследствие больших главных растягивающих напряжений в углах появляются трещины, которые будут развиваться до определенного предела. В связи с этим происходит перераспределение внутренних сил и главные растягивающие напряжения в углах оболочки получают значительно меньшие значения.

Приняв за предел развития трещины $\alpha_0 = 15^\circ$, при функции S в виде (I), где $a_i = 1$, получим на фиг. 3 представленные эпюры внутренних сил. На той же фигуре пред-

Таблица I

Сечение	0	1	2	3	4	5	6	7	8
m'_0	14,5452	13,1749	9,5335	4,4025	-1,5986	-6,9463	-9,9327	-8,5325	0
m'_1	0,3478	0,3024	0,1688	-0,0140	-0,1908	-0,3064	-0,3272	-0,2042	0
m'_2	-0,0706	-0,0938	-0,1231	-0,0781	0,0466	0,1677	0,1928	0,1181	0
n'_0	37,7422	34,8401	26,0638	11,5104	-8,8131	-34,8951	-66,7841	-104,1053	-147,1078
n'_1	1,5127	1,3059	0,7332	-0,0782	-0,9888	-1,6029	-1,8585	1,5076	-0,4216
n'_2	0,8847	0,1048	-1,2208	-1,3502	0,0655	1,5417	1,5936	0,5686	0,2171
S'_0	0	3,7649	7,5299	11,2948	15,0597	18,8246	22,5896	26,3545	30,1194
S'_1	0	0,2628	0,4673	0,5643	0,5205	0,3245	-0,0122	-0,4564	-0,9590
S'_2	0	0,8844	0,6281	-0,5013	-1,1581	0,5808	0,4700	0,6473	-0,3162

Таблица 2

Сечение	0	1	2	3	4	5	6	7	8
m_0	14,545	13,175	9,534	4,403	-1,560	-6,946	-9,933	-8,533	0
$a_1 m_1$	-15,826	-13,760	-7,681	0,637	8,659	13,942	14,889	9,292	0
$a_3 m_3$	-0,161	-0,214	-0,281	-0,178	0,106	0,383	0,440	0,269	0
$\Sigma = M$	-1,442	-0,799	-1,572	4,852	7,105	7,379	5,396	1,028	0
π'_0	37,742	34,840	26,064	11,510	-8,813	-34,895	-66,784	-104,105	-147,108
$a_1 \pi'_1$	-68,834	-59,424	-33,363	3,558	42,469	72,988	84,569	68,602	19,184
$a_3 \pi'_3$	2,018	0,239	2,785	-3,080	0,149	3,517	3,635	1,297	0,495
$\Sigma = N$	-29,074	-24,345	-10,084	11,988	33,805	41,560	21,420	-34,206	-127,429
S_0	0	3,765	7,530	11,295	15,060	18,825	22,590	26,355	30,119
$a_1 S_1$	0	-11,958	-21,267	-25,676	-23,685	-14,766	0,552	20,770	43,639
$a_3 S_3$	0	2,017	1,433	1,143	-2,642	-1,324	1,072	1,476	-0,721
$\Sigma = S$	0	-6,176	-12,304	-15,524	-11,227	2,735	24,214	48,601	73,037

ставлены эпюры внутренних сил при трещинах, достигающих до $\alpha_0 = 12,5^\circ$ и $\alpha_0 = 17,5^\circ$.

Из расчетов вытекает, что усилия в диафрагме почти не зависят от протяжений трещин.

Л и т е р а т у р а

1. Х.Х. Л а у л ь. Расчет цилиндрических оболочек с криволинейными частями, очерченными по окружности. Труды ТПИ, № 50, 1953.

2. Н. L a u l. Raudbetoon II. 1962.

3. Х.Х. Л а у л ь. Применение метода Кастильяно-Ритца к расчету длинных цилиндрических оболочек. Труды ТПИ, № 33, 1950.

4. Х.Х. Л а у л ь, А.И. Л а в р о в. О расчете конoidalных железобетонных оболочек. Труды ТПИ, серия А, №229, 1965.

5. Х.Х. Л а у л ь. Цилиндрические железобетонные оболочки с трещиной в растянутой зоне. Труды ТПИ, № 45, 1953.

УДК 621.031
624.04

Ю.А. Тярно

СТАТИСТИЧЕСКО-ЭМПИРИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОБОЛОЧЕК (внутренняя волна
многоволновых оболочек)

В течение последних 15-20 лет из пространственных тонкостенных конструкций много исследовано железобетонных цилиндрических оболочек. Разработаны и применены разные методы расчета (комплексные, вариационные, графические, методы элементарной балки, методы подобия и т.д.). Для получения внутренних сил эти методы очень komplицированные, чувствительные к случайным ошибкам и требуют применения расчетных машин. При этом найденное распределение внутренних сил вряд ли отвечает действительному распределению в конструкциях.

Характерные свойства железобетона (пластичность, изменяющийся модуль упругости, усадка, трещины) существенно изменяют теоретическое распределение внутренних сил.

Чтобы экономить время, можно применять статистические методы расчета. Некоторые труды уже имеются в этой области [1], [6], [7]. Следующий излагаемый метод расчета можно назвать статистическо-эмпирическим методом. Метод базируется на анализе многих расчетов разными методами, геометрическими и грузовыми параметрами.

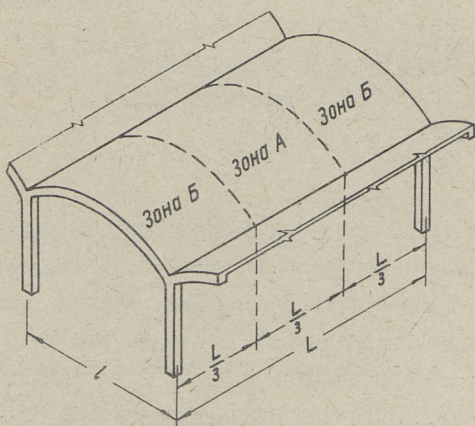
1. Расчет внутренней волны цилиндрической оболочки многоволновых покрытий

Метод расчета цилиндрических оболочек с трещинами в растянутой зоне дан проф. Х.Х. Лаулем [2], [4], [5]. В зонах диафрагмы распределение усилий существенно отличается от распределений усилий в средней зоне оболочки. Разделение оболочек на зоны, где расчет производится

разными методами, дано на фиг. 1.

В зоне А результирующей продольной силы ΣT_1 найдется из задачи оболочек с трещинами в растянутой зоне [2], Π_2 по методам [2], [4], [5] или по настоящим методам.

В зоне Б поперечный изгибающий момент найдется как и в зоне А.

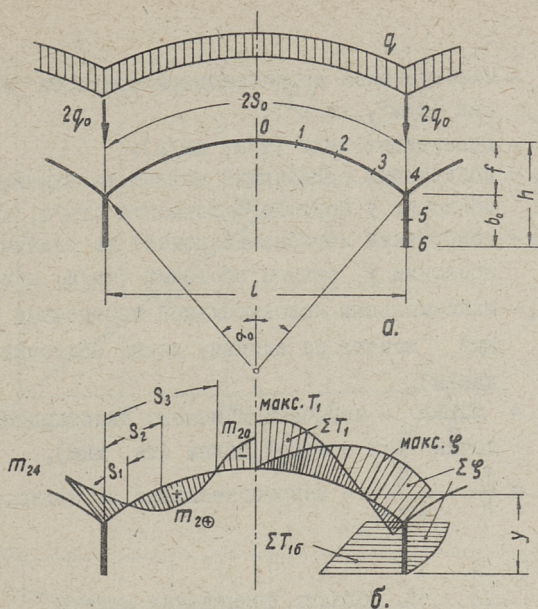


Фиг. 1

Остальные эпюры внутренних сил (для расчета главных растягивающих сил) найдутся по точным методам или по излагаемым методам.

2. Обозначения (см. фиг.2)

- L — пролет оболочки (м),
- l — длина волны оболочки (м),
- h — строительный подъем оболочки (м),
- b₀ — высота бортового элемента (м),
- f — подъем криволинейной части оболочки (м),
- S₀ — полудлина поперечного сечения оболочки (м),



Фиг. 2

- $2\alpha_0$ — угол открывания оболочки,
 y — расстояние от низа бортового элемента до нулевой линии продольных сил (м),
 $S_{1,2,3}$ — расстояния главных точек эпюры поперечных изгибающих моментов от бортового элемента (м),
 q — нагрузка на единицу кривой поверхности оболочки (т/м^2 , кн/м^2),
 $2q_0$ — нагрузка на единицу длины бортового элемента (т/м , кн/м),
 $\bar{q} = S_0 \cdot q + q_0$ (т/м , кн/м),
 T_1 — продольная сила в поперечном сечении оболочки (т/м , кн/м),
 ΣT_1 — суммарная продольная сила (растяжение или сжатие) (т, кн),
 ΣT_{16} — суммарная продольная сила в бортовом элементе (т, кн),
 $\varphi_{(s)}$ — приращение сдвигающих сил,
 $\Sigma \varphi$ — суммарное приращение сдвигающих сил,

макс ζ - максимальная ордината эпюры прироста сдвигающих сил (т/м^2 , кн/м^2),

S - сдвигающие силы (т/м , кн/м),

m_{24} - поперечный изгибающий момент на единицу длины оболочки у бортового элемента (тм/м , кнм/м),

m_{20} - поперечный изгибающий момент на единицу длины оболочки у селыги оболочки (тм/м , кнм/м),

m_{2+} - максимальный положительный поперечный изгибающий момент на единицу длины оболочки (тм/м , кнм/м),

$M = \frac{\bar{q}_y L^2}{8}$ - изгибающий момент цилиндрической оболочки как большой балки (тм , кнм),

$V = \frac{f}{h} \frac{\bar{q}_y}{\bar{q}_y - q_0}$ - вспомогательная величина.

3. Область применения метода

Метод применяется для расчета внутренней панели оболочки средней длины при наличии бортового элемента. Метод проверен разными более точными методами расчета (Лаул, Лундгрэн и т.д.) при помощи более 100 задач.

Метод употребляется для оболочек со следующими параметрами:

$\frac{L}{l} \geq 1,5$ (I) (т.е. в участке, где внутренние силы почти не зависят от изменений отношения L/l [6], [7]);

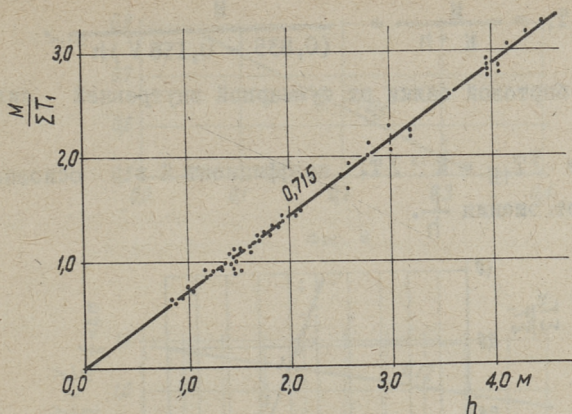
$\alpha_0 = 30^\circ + 50^\circ$ (т.е. $\frac{f}{l} = 0,130 + 0,233$),

$\frac{f}{h} = 0,425 + 0,900$,

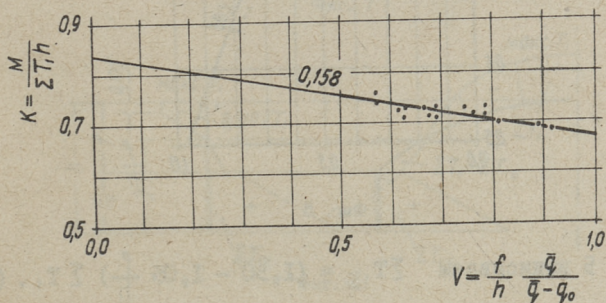
$\frac{q_0}{\bar{q}_y} = 0,100 + 0,300$,

$\frac{\delta}{\delta_0} = 1 + \frac{1}{3}$ (в этом участке внутренние силы почти не зависят от изменений отношения δ/δ_0).

В данном участке все внутренние силы находятся с погрешностью $\pm 5\%$ (поперечные изгибающие моменты $\pm 10 + 20\%$) в отношении метода Лаула, Лундгрена.



Фиг. 3



Фиг. 4

В дальнейшем область применения метода может расширяться.

4. Эпира продольной силы T_1

а) Суммарная внутренняя сила $\sum T_1$.

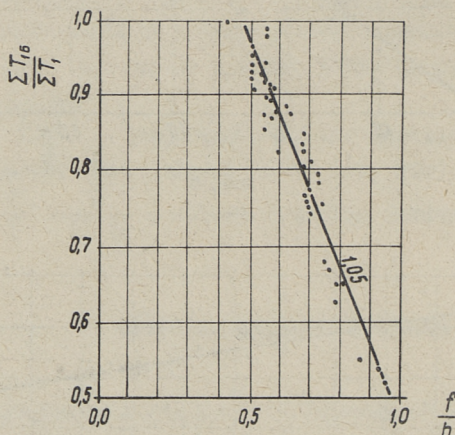
Как выясняется из фиг.3, имеется почти линейная связь между $\frac{M}{\sum T_1}$ и h . В первом приближении можно пользоваться величиной $K = \frac{M}{\sum T_1 h} = 0,715 [\pm 10\%]$. Такие же величины получены Беннеттом [1] - $K = 0,717 + 0,713 [\pm 10\%]$.

По фиг.4 составим формулу

$$\sum T_1 = \frac{M}{K \cdot h} = \frac{M}{(0,835 - 0,158 V) h} \quad (1)$$

б) Часть бортовой балки от суммарной внутренней силы - $\sum T_{1B}$.

В формуле $\sum T_{1B} = K \cdot \sum T_1$ коэффициент K в основном зависит от отношения $\frac{f}{h}$.



Фиг. 5

Из фиг. 5 выписываем $\sum T_{1B} = (1,50 - 1,05 \frac{f}{h}) \sum T_1$. (2)

в) Высота нулевой линии.

Высоту нулевой линии составим формулой

$$y = K \cdot h, \text{ где } K = K_{\frac{q_0}{q}} \cdot K_{\frac{f}{h}}.$$

По фиг. 6 и 7

$$K_{\frac{q_0}{q}} = 0,855 - 1,05 \frac{q_0}{q}, \quad (3)$$

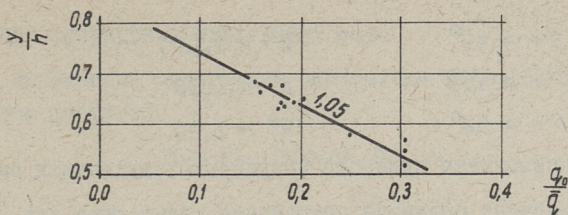
$$K_{\frac{f}{h}} = 1,090 - 0,12 \frac{f}{h}. \quad (4)$$

Окончательная формула имеет вид

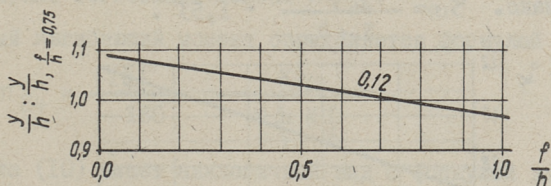
$$y = K_{\frac{q_0}{q}} \cdot K_{\frac{f}{h}} \cdot h. \quad (5)$$

г) Эпюра продольных сил T_1 .

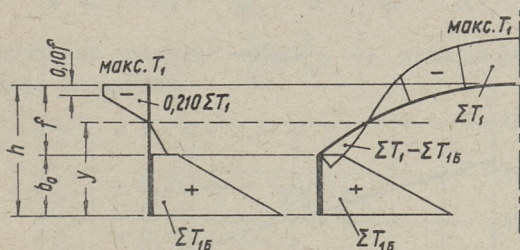
Приблизительная эпюра продольных сил (см. на фиг. 8). Все линии в левой фигуре линейные. Максимальная ордината продольных сил сжатой зоны оболочка дана формулой



Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8

$$\text{макс. } T_1 = \frac{0,42 \Sigma T_1}{h - y + 0,1f} \quad (6)$$

5. Эпюра приращения сдвигающих сил $\varphi_{(s)}$

а) Суммарные приращения сдвигающих сил $\Sigma \varphi$.

Зависимость от величины α_0 и V см. на фиг. 9 и 10.

Окончательная формула

$$\Sigma \varphi = \frac{\bar{q}}{(0,730 - 0,30 V) \cdot K^0} \quad (7)$$

при $\alpha_0 = 30^\circ$ $K^0 = 0,80$;

$\alpha_0 = 35^\circ$ $K^0 = 0,90$;

$$\alpha_0 = 40^\circ$$

$$K^0 = 1,00;$$

$$\alpha_0 = 45^\circ$$

$$K^0 = 1,10;$$

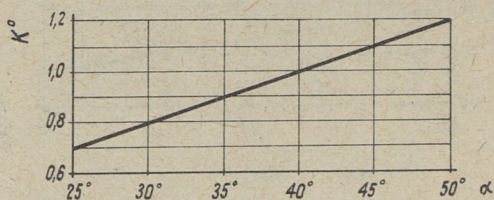
$$\alpha_0 = 50^\circ$$

$$K^0 = 1,20.$$

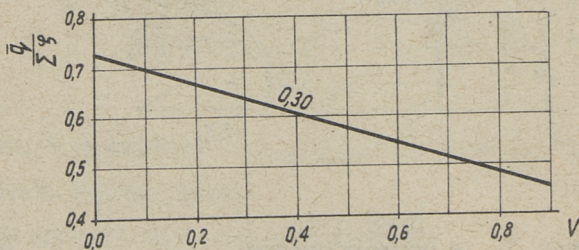
б) Максимальная ордината приращения сдвигающих сил.

Максимальная ордината приращения сдвигающих сил дана формулой (8) и местонахождением в нулевой линии.

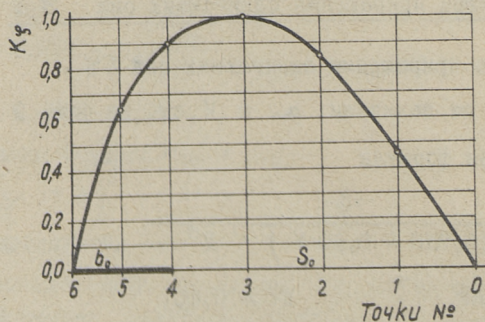
$$\text{макс. } \varphi_{(s)} = \frac{\sum \varphi}{S_0 + b_0} \cdot 1,53. \quad (8)$$



Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11

в) Эпюра приращения сдвигающих сил.

Эпюра приращения сдвигающих сил (см. на фиг. II) . Ординаты найдем формулой

$$\mathcal{Q}_{(s)} = K_{\mathcal{Q}} \cdot \text{макс. } \mathcal{Q}_{(s)} ;$$

6. Поперечные изгибающие моменты m_{20}

а) Опорный изгибающий момент m_{24} .

Опорный изгибающий момент определяется формулой

$$m_{24} = \frac{2\bar{q}_0 l}{180} \cdot \frac{K_{f/h}}{K_{\frac{q_0}{\bar{q}}} K_{\frac{f}{l}}} . \quad (10)$$

Формула (10) имеет аналогичный вид с формулой для плиты, т.е.

$$m = \frac{p l^2}{K} .$$

Зависимость от величин $\frac{q_0}{\bar{q}}$, $\frac{f}{h}$, $\frac{f}{l}$ дана на фиг. I2, I3, I4 и выражена формулами

$$K_{\frac{q_0}{\bar{q}}} = 1,10 - 0,6 \frac{q_0}{\bar{q}} ; \quad (11)$$

$$K_{\frac{f}{h}} = 2,26 \frac{f}{h} - 0,485 ; \quad (12)$$

$$K_{\frac{f}{l}} = 0,79 + \frac{f}{l} . \quad (13)$$

б) Изгибающий момент у гребня оболочки - m_{20} .

Поперечный изгибающий момент у гребня оболочки зависит в основном от отношения $\frac{f}{h}$ (см. фиг. I5, I6).

Формула для расчета

$$m_{20} = \frac{\bar{q}_0 l}{150} \cdot K_{\frac{f}{h}} , \quad (14)$$

где

$$K_{\frac{f}{h}} = 1,70 \frac{f}{h} - 0,140 . \quad (15)$$

в) Максимальный положительный изгибающий момент m_{2+} .

Максимальный положительный изгибающий момент m_{2+} выражаем формулой

$$m_{2+} = 0,5 \cdot m_{24} . \quad (16)$$

г) Основные точки эпюры поперечных изгибающих моментов.

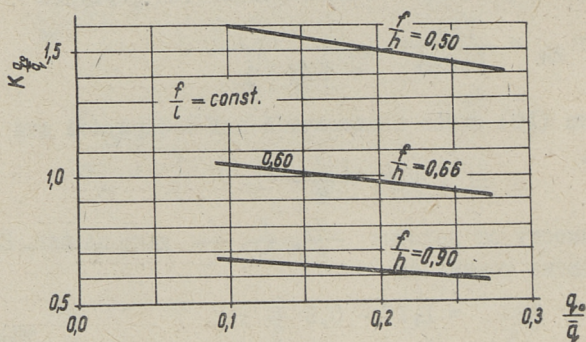
Места основных точек эпюры изгибающих моментов мало изменяются от изменений нагрузки и геометрии оболочки.

С достаточной точностью можно составить (см. фиг. 17):

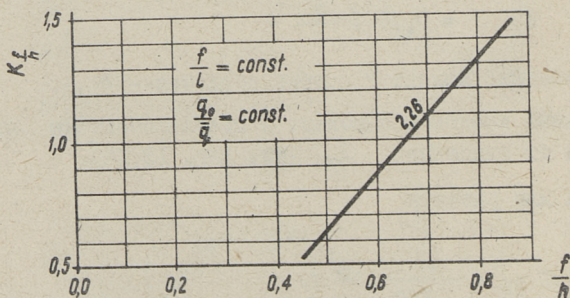
$$S_1 = 0,150 \quad (\text{промежуток } 0,110 + 0,180 S_0) \quad (17)$$

$$S_2 = 0,375 \quad (\text{промежуток } 0,350 + 0,400 S_0) \quad (18)$$

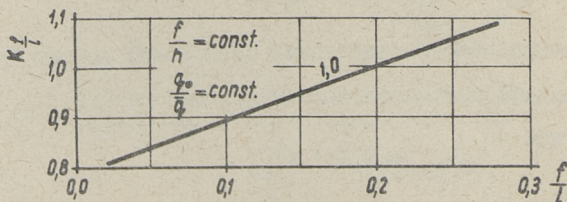
$$S_3 = 0,680 \quad (\text{промежуток } 0,650 + 0,710 S_0) \quad (19)$$



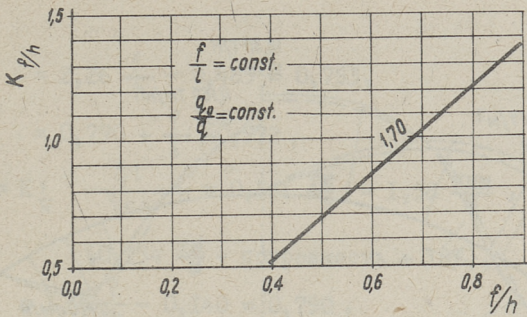
Фиг. 12



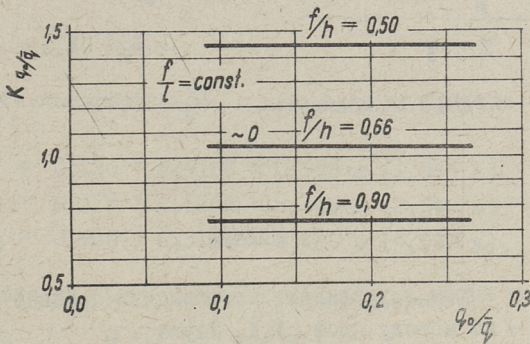
Фиг. 13



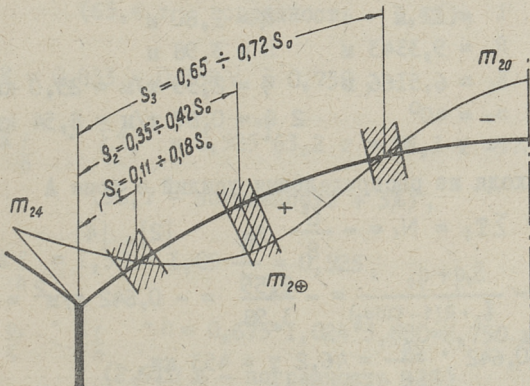
Фиг. 14



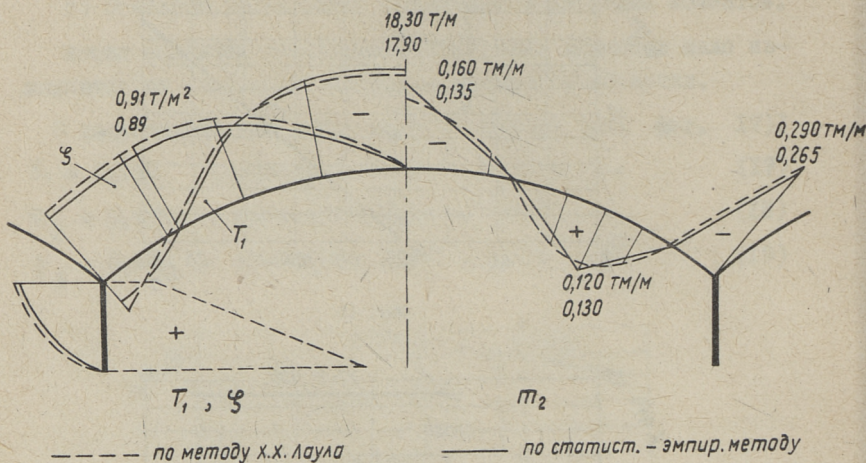
Фиг. 15



Фиг. 16



Фиг. 17



Фиг. 18

7. Пример

Найдем эпюры внутренних сил оболочки средней длины (в скобках - по методу проф. Х.Х. Лаула).

$$\begin{aligned}
 L &= 24 \text{ м} & f &= 2,18 \text{ м} \\
 l &= 12 \text{ м} & b_0 &= 1,80 \text{ м} \\
 R &= 9,3343 \text{ м} & h &= 3,98 \text{ м} \\
 S_0 &= 6,5166 \text{ м} & \bar{q} &= 2,55 \text{ т/м} = 25,0 \text{ кН/м} \\
 \alpha_0 &= 40^\circ & 2 q_0 &= 0,87 \text{ т/м} = 8,54 \text{ кН/м}
 \end{aligned}$$

а) Исходя из распределения усилий в зоне А

$$\text{макс. } \sum T_1 = N_1 = -\frac{L^2}{8} a_{II} \quad [2], [4]$$

$$a_{II} = -\frac{S_0 q_0 + q_0}{b_0 + R(1 - \cos \alpha_0)} = -\frac{2,55}{3,98} = -0,642 \text{ т/м}^2 = -6,29 \text{ кН/м}^2,$$

$$N_1 = 0,642 \cdot \frac{24^2}{8} = 46,2 \text{ т} = 453 \text{ кН},$$

$$m_{24} = \frac{K \frac{f}{h}}{K \frac{q_0}{\bar{q}}} \frac{\bar{q} l}{90} = 0,264 \frac{\text{ТМ}}{\text{М}} = 2,59 \frac{\text{кНМ}}{\text{М}} \quad (10)$$

(0,289 $\frac{\text{ТМ}}{\text{М}}$ - погрешность - 9%),

$$\text{где } K \frac{q_0}{\bar{q}} = 1,10 - 0,60 \frac{q_0}{\bar{q}} = 1, \quad (11)$$

$$K_{\frac{f}{h}} = 2,26 \frac{f}{h} - 0,485 = 0,753, \quad (12)$$

$$K_{\frac{f}{l}} = 0,790 + \frac{f}{l} = 0,972, \quad (13)$$

$$m_{20} = K_{\frac{f}{h}} \frac{\bar{q} l}{150} = 0,161 \frac{TM}{M} = 1,58 \frac{KHM}{M}, \quad (14)$$

(0,134 $\frac{TM}{M}$ - погрешность + 18%),

$$\text{где } K_{\frac{f}{h}} = 1,70 \frac{f}{h} - 0,140 = 0,790, \quad (15)$$

$$m_{2+} = 0,5 m_{24} = 0,5 \cdot 0,264 = 0,132 \frac{TM}{M} = 1,30 \frac{KHM}{M}, \quad (16)$$

(0,120 $\frac{TM}{M}$ - погрешность +10%),

$$S_1 = 0,150 \cdot 6,5166 = 0,975 \text{ м (1,045 м)},$$

$$S_2 = 0,375 \cdot 6,5166 = 2,540 \text{ м (2,540 м)},$$

$$S_3 = 0,680 \cdot 6,5166 = 4,420 \text{ м (4,520 м)}.$$

б) Исходя из распределения усилий в зоне Б

$$\text{макс. } \Sigma T_1 = \frac{M}{K \cdot h} = \frac{183,5}{0,730 \cdot 3,980} = 63,2 \text{ т} = 620 \text{ кн (1)}$$

(65,4 т - погрешность - 3,4%),

где

$$K = 0,833 - 0,158 V = 0,730,$$

$$\Sigma T_{1B} = K_{\frac{f}{h}} \cdot \Sigma T_1 = 0,925 \cdot 63,2 \text{ т} = 58,3 \text{ т} = 572 \text{ кн, (2)}$$

(56,7 - погрешность + 3%),

где

$$K_{\frac{f}{h}} = 1,50 - 1,05 \frac{f}{h} = 0,925,$$

$$y = K_{\frac{q_0}{q}} \cdot K_{\frac{f}{h}} \cdot h = 0,675 \cdot 1,024 \cdot 3,980 = 2,750 \text{ м, (5)}$$

(2,710 м - погрешность +2%).

где

$$K_{\frac{q_0}{q}} = 0,855 - 1,05 \frac{q_0}{q} = 0,675, \quad (3)$$

$$K_{\frac{f}{h}} = 1,090 - 0,12 \frac{f}{h} = 1,024. \quad (4)$$

$$\text{макс. } T_1 = \frac{0,42 \sum T_1}{h - y + 0,1f} = 18,3 \text{ т/м} = 180 \text{ кн/м}, \quad (6)$$

(17,9 т/м - + 3%)

$$\sum \varphi = \frac{\bar{q}}{K_v K^0} = 4,83 \text{ т/м} = 47,4 \text{ кн/м}, \quad (7)$$

(5,05 т/м - погрешность - 4,5%)

где

$$K_v = 0,730 - 0,300 V = 0,528,$$

$$K^0 = 1,$$

$$\text{макс. } \varphi = 1,53 \frac{\sum \varphi}{S_0 + b_0} = 0,885 \text{ т/м}^2 = 8,7 \text{ кн/м}^2,$$

(0,910 т/м² - -2%),

Поперечные изгибающие моменты см. зона А.

Все эпюры см. на фиг. 18.

Л и т е р а т у р а

1. J. D. B e n n e t t. Empirical design of symmetrical cylindrical Shells. Proceeding of the Colloquium on Simplified Calcul. Method. Brussels, Sept. 4-6, 1961.

2. H. L a u l. Raudbetoon II. Tallinn 1962.

3. X.X. Л а у л. Расчет цилиндрических оболочек с криволинейными частями, очерченными по окружности. Таллин 1953, ТПИ, Серия А, № 50, 1953.

4. X.X. Л а у л. Цилиндрические железобетонные оболочки с трещинами в растянутой зоне. Труды ТПИ, Серия А, №45, Таллин 1953.

5. АС и А СССР. Инструкция по проектированию железобетонных тонкостенных пространственных покрытий и перекрытий. Москва 1961.

6. R. R a b i s h. Schnittkräfte in Schalenträgern Bauplanung - Bautechnik 1/1958, 2/1958.

7. Р. Раби х. Внутренние усилия в круговых цилиндрических железобетонных оболочках. Второй международный конгресс по тонкостенным покрытиям - оболочкам. Москва 1960.

8. Н.В. Колкунов. Основы расчета упругих оболочек. Москва 1963.

УДК 621.031

624.04

Ю.А. Тярно

СТАТИСТИЧЕСКО-ЭМПИРИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОБОЛОЧЕК (отдельностоящая
волна)

Внутренние силы цилиндрических оболочек зависят от многих геометрических и грузовых параметров. Чтобы найти связь между различными параметрами, произведено большое количество расчетов. Параметрами являлись

$$\alpha_0, f/h, q_0/\bar{q}, L/l, \delta/R \text{ и } \delta/\delta_0.$$

Обозначения см. на фиг. I и в предыдущей статье (изменяется только величина q_0 — нагрузка на единицу длины бортового элемента). В настоящей статье даются только самые важные величины для проектирования оболочек. Сравнение влияния отдельных параметров можно найти в труде [4].

I. Определение геометрических и грузовых параметров цилиндрических оболочек

Для цилиндрических оболочек в практике применяются следующие геометрические параметры:

$$\alpha_0 = 30^\circ + 40^\circ,$$

$$L/l = 1 + 3,$$

$$f/h = 0,75 \text{ (при } L/l = 1) + 0,55 \text{ (при } L/l = 3),$$

$$\delta/\delta_0 = \frac{I}{3} + \frac{I}{4} \quad (\text{чтобы поставить продольную ар-} \\ \text{матуру, так как } \delta = 6 + 8 \text{ см}),$$

$$\delta/R = \frac{I}{100} + \frac{I}{200}.$$

Как показывают сравнительные расчеты изменения $\frac{\delta}{R}$, в пре-
делах $\frac{I}{100} + \frac{I}{200}$ величина T_1 изменяется $I + 2\%$, а по-
перечные моменты — около 10% . Отношение $\frac{\delta}{\delta_0}$ еще меньше
влияет на внутренние силы. Таким образом в сравнительных
расчетах можно пренебречь влияниями $\frac{\delta}{R}$ и $\frac{\delta}{\delta_0}$.

Грузовой параметр q_0/\bar{q} зависит от геометрии оболочек
и имеет следующие пределы:

для эксплуатационных нагрузок

$$q_0/\bar{q} = 0,15 + 0,40,$$

для монтажных нагрузок

$$q_0/\bar{q} = 0,20 + 0,50.$$

Толщина бортового элемента изменяется относительно ма-
ло. Нагрузка q_0 зависит от высоты бортового элемента,
т.е. q_0/\bar{q} зависит от f/h и имеет минимальные величины

$$\text{при } f/h = 0,73, \quad q_0/\bar{q} = 0,15,$$

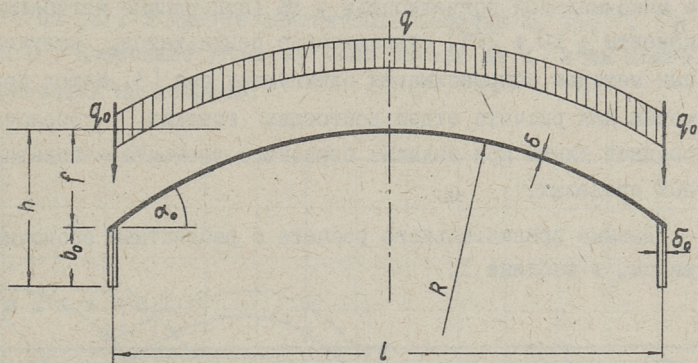
$$f/h = 0,55, \quad q_0/\bar{q} = 0,30.$$

Величины пределов изменения отдельных параметров
нужно выяснить для определения участков использования ли-
нии в графиках.

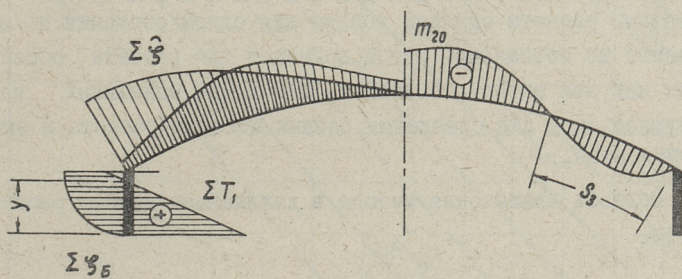
2. Область применения метода

Метод обоснован на 150 расчетах, рассчитанных методом
аппроксимации сдвигающих сил [3]. При расчетах варьиро-
вали следующими параметрами:

$$\alpha_0 = 30^\circ + 40^\circ, \text{ шагом } 10^\circ;$$



Фиг. 1



Фиг. 2

$$L/l = 1 + 3, \text{ шагом } 1;$$

$$f/h = 0,55 + 0,73, \text{ шагом } 0,09;$$

$$q_0/q = 0,15 + 0,5, \text{ шагом } 0,05 + 0,200.$$

В данном участке параметров все внутренние силы найдены с максимальной погрешностью $\pm 3\%$ (поперечные изгибающие моменты $\pm 10 + 20\%$) относительно результатов, полученных методом аппроксимации сдвигающих сил [3]. Метод применен для расчета отдельностоящих гладких оболочек средней длины при наличии бортового элемента в показанных пределах.

Данные сравнительного расчета с ребристыми оболочками см. в таблице I.

Т а б л и ц а I

$\Sigma \text{прив}/\delta$	ΣT_1	$\Sigma \varphi$	m_{20}
1	100%	100%	100%
2	96%	105%	285%
3	94%	110%	470%

Основное расхождение в поперечных моментах. Сравнительные расчеты сделаны только для одной оболочки и их данные не обобщаемы. Метод применен для расчета оболочек как при эксплуатационных, так и при монтажных нагрузках, но и для сравнения разных методов расчета и экспериментов.

Область применения метода в дальнейшем можно расширить.

3. Суммарная продольная внутренняя сила (растяжение) ΣT_1

Суммарная продольная сила может быть выражена формулой

$$\Sigma T_1 = \frac{M}{k \cdot h} \quad (I)$$

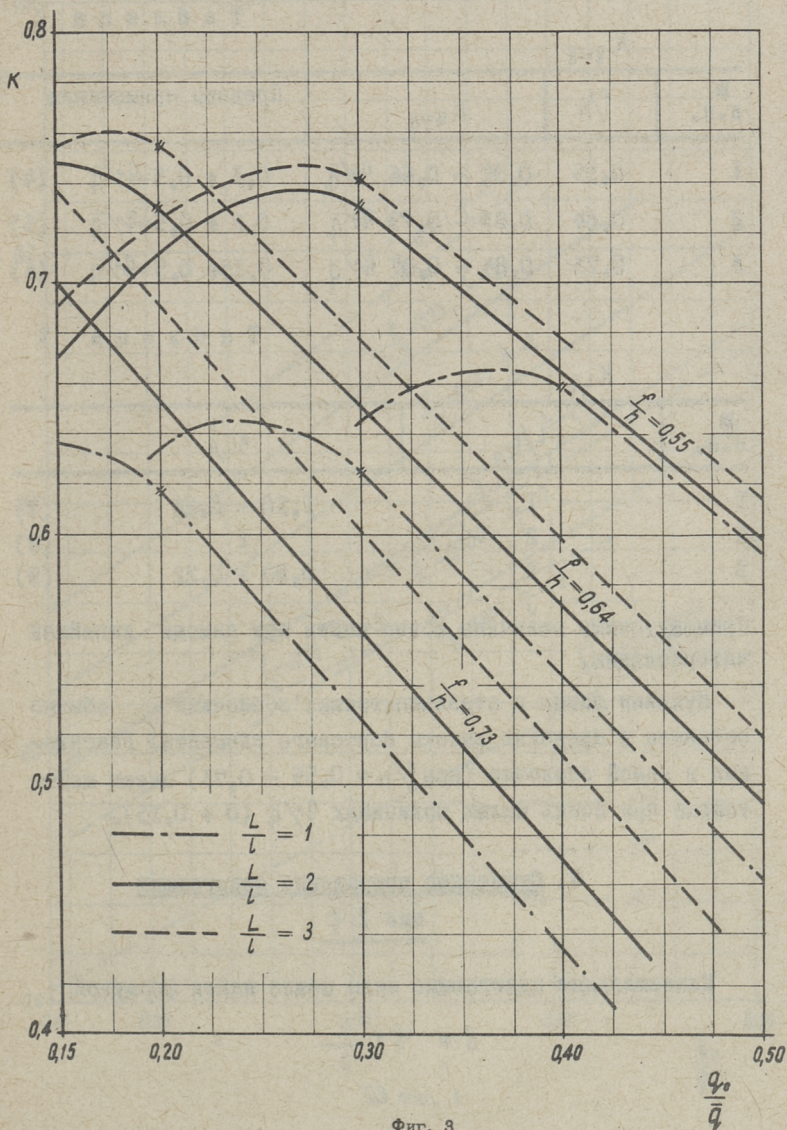
где

$$M = \frac{\bar{q} L^2}{8} \quad (2)$$

момент оболочек, как большой балки. Центральной величиной является

$$K = K_{q_0/\bar{q}} \cdot K_{L/l} \quad (3)$$

На фиг. 3 дается зависимость величин K , q_0/\bar{q} , f/h и L/l . Изменение угла α_0 мало влияет на K и им можно в расчетах пренебречь.



Фиг. 3

Как видно из фиг. 3, линейная связь между K и q/\bar{q} существует в ограниченных пределах q/\bar{q} . Криволинейные участки наблюдаются за пределами практически применяемых габаритов и нагрузок. На основе фиг. 3 K можно рассчитать по следующим формулам (см. таблицы 2 и 3).

Т а б л и ц а 2

№ п.п.	$K_{q/\bar{q}}$		Пределы применения
	f/h	$K_{q/\bar{q}}$	
1	0,55	0,92 - 0,66 q/\bar{q}	0,3 + 0,5 = q/\bar{q} (4)
2	0,64	0,89 - 0,79 q/\bar{q}	0,2 + 0,5 = q/\bar{q} (5)
3	0,73	0,84 - 0,92 q/\bar{q}	0,15 + 0,5 = q/\bar{q} (6)

Т а б л и ц а 3

№ п.п.	$K_{L/l}$	
	L/l	$K_{L/l}$
1	1	1,10 - 0,22 (7)
2	2	1 (8)
3	3	0,90 + 0,22 (9)

Промежуточные величины можно найти при помощи линейной интерполяции.

Нулевая линия в отдельстоящих оболочках обычно остается в пределах высоты бортового элемента. Растяжение в самой оболочке (при $f/h = 0,55 - 0,73$) имеет место только при очень малых величинах q/\bar{q} ($0 + 0,15$).

4. Суммарное приращение сдвигающих

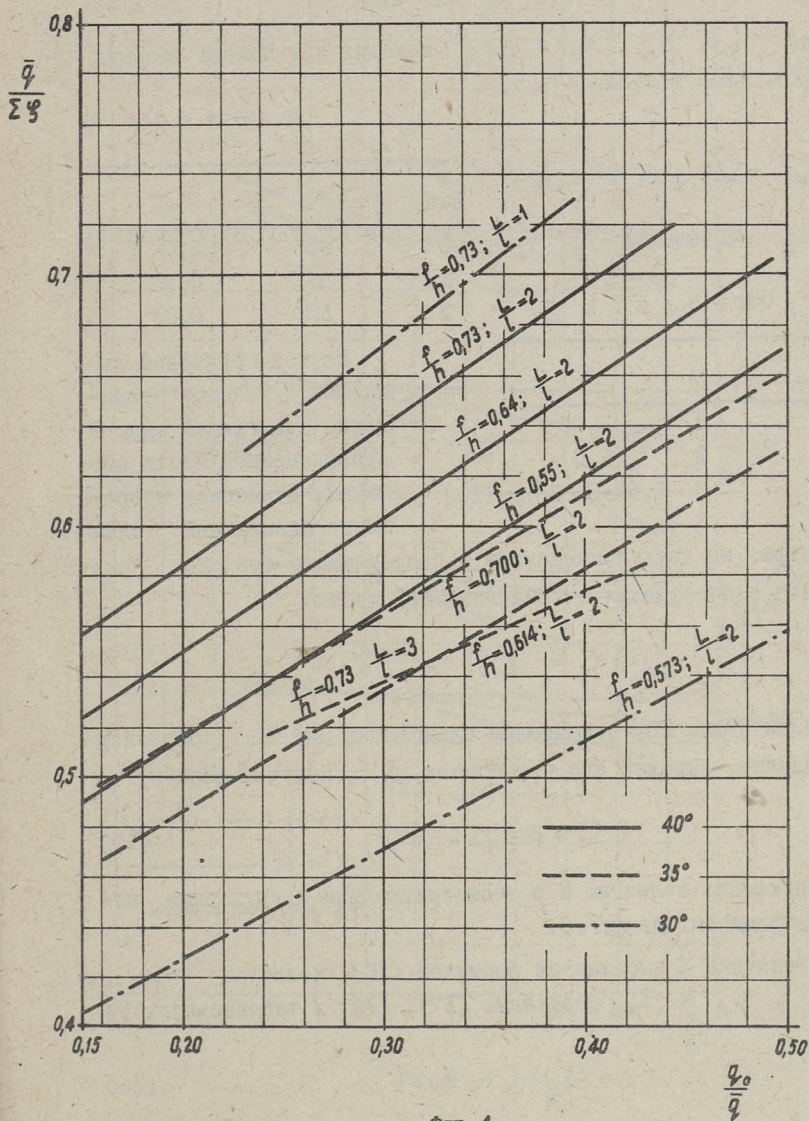
$$\underline{\text{сил } \sum \varphi}$$

Максимальные сдвигающие силы можно найти формулой

$$S = \varphi \cdot \frac{L}{2}$$

Приращение сдвигающих сил можно найти при помощи суммарного приращения сдвигающих сил $\Sigma \varphi$. Можно написать простое выражение

$$\Sigma \varphi = \frac{\bar{q}}{K} \cdot \quad (10)$$



Фиг. 4

На фиг. 4 показана связь K с геометрическими и грузовыми параметрами оболочек. Для K можно выписать следующее выражение

$$K = K_{f/h} \cdot K_{\alpha_0} \cdot K_{L/l} \cdot K_{q_0/\bar{q}}, \quad (II)$$

где $K_{f/h}$, K_{α_0} , $K_{L/l}$ и $K_{q_0/\bar{q}}$ находят при помощи формул (I2), (I3) и таблиц 4, 5.

Т а б л и ц а 4

		K_{α_0}		
		№ п.п.	α_0	K_{α_0}
$K_{f/h} = 0,52 + 0,75f/h, (I2)$		1	40°	1,0
$K_{q_0/\bar{q}} = 0,44 + 0,54 q_0/\bar{q}, (I3)$		2	35°	0,9
		3	30°	0,83

Т а б л и ц а 5

№ п.п.	L/l	$K_{L/l}$
1	1	1,09
2	2	1,0
3	3	$1,54 - 0,98 f/h, (I4)$

Важной величиной является суммарное приращение сдвигающей силы в криволинейной части оболочки. Суммарное приращение сдвигающей силы

состоит из двух компонентов - приращения в бортовом элементе и приращения в криволинейной части

$$\sum \varphi = \sum \varphi_B + \sum \hat{\varphi}.$$

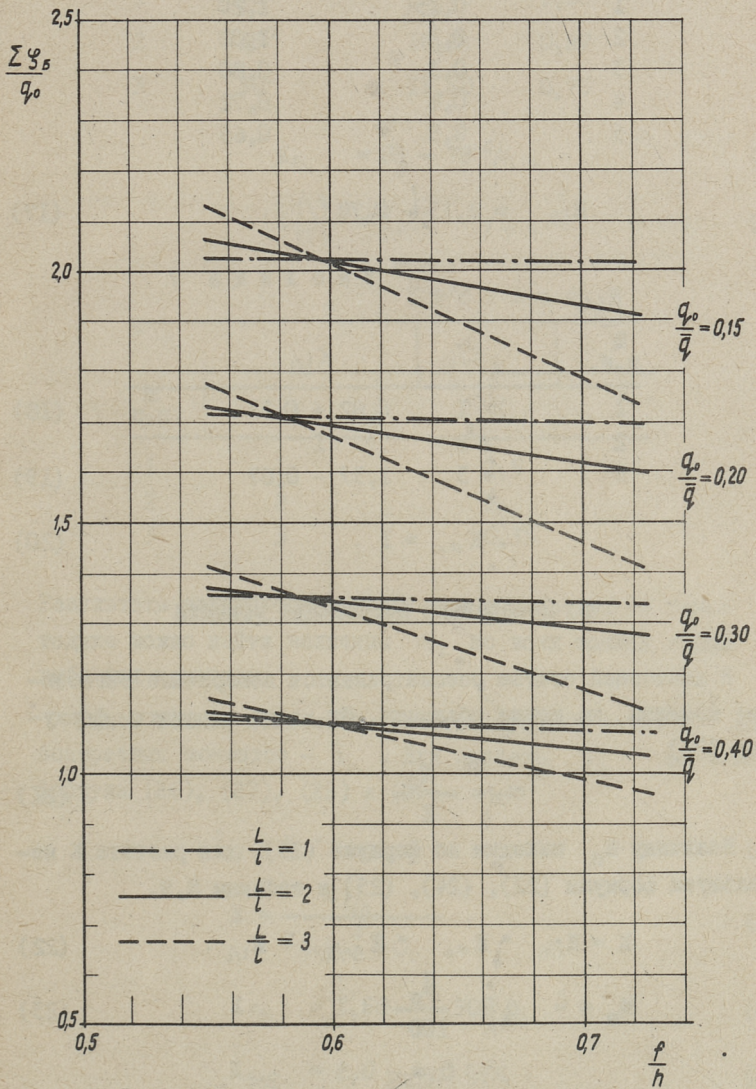
Найдем суммарное приращение сдвигающих сил в бортовом элементе, выражая его при помощи q_0 . Получим формулу

$$\sum \varphi_B = k \cdot q_0. \quad (I5)$$

Зависимость величины K с геометрическими и грузовыми параметрами см. на фиг. 5.

Величина K выражается формулой (I6), величины $K_{q_0/\bar{q}}$, $K_{f/h}$, $K_{L/l}$ и K_{α_0} формулами (I7), (20) и таблицами 6, 7.

$$K = K_{q_0/\bar{q}} \cdot K_{f/h} \cdot K_{L/l} \cdot K_{\alpha_0}. \quad (I6)$$



Фиг. 5

Таблица 6

$K_{q_0/\bar{q}}$		
№ п.п.	q_0/\bar{q}	$K_{q_0/\bar{q}}$
1	0,15	1,20
2	0,2	1,00
3	0,3	0,80
4	0,4	0,72
5	0,5	0,65

$$K_{f/h} = 2,15 - 0,78 f/h \quad (17)$$

Таблица 7

$K_{L/l}$		
№ п.п.	L/l	$K_{L/l}$
1	1	0,82 + 0,33
2	2	1
3	3	1,37 - 0,67

(18)

(19)

$$K_{\alpha_0} = 1 \quad (20)$$

5. Поперечные изгибающие моменты

В настоящей статье рассматриваются поперечные изгибающие моменты на конце оболочки. Их можно выразить формулой (21)

$$m_{20} = \frac{M_0}{K} \quad (21)$$

Величину M_0 находим по формуле (23), для расчета K используем формулы (22), (24), (25) и таблицы 8,9.

$$K = K_{f/h} \cdot K_{\alpha_0} \cdot K_{q_0/\bar{q}} \cdot K_{L/l} \quad (22)$$

$$M_0 = - q R \frac{\bar{M}_0}{100} \quad (23)$$

Т а б л и ц а 8

№ п.п.	α_0	\bar{M}_0	K_{α_0}
1	40°	23,40	1,00
2	35°	18,08	0,87
3	30°	13,40	0,75

$$K_{f/h} = 88 - 78 f/h, \quad (24)$$

$$K_{q_0/\bar{q}} = 1,20 - q_0/\bar{q}, \quad (25)$$

Т а б л и ц а 9

$K_{L/l}$

№ п.п.	L/l	$K_{L/l}$
1	1	2,5
2	2	1
3	3	0,35

Результаты получаются с требуемой точностью. По такой методике можно найти величины m_2 во всех точках эпюры изгибающих моментов.

Одной важной величиной является нулевая линия в эпюре поперечных моментов — S_3 . Для расчета S_3 используем формулы (26), (27), (28) и (29).

$$S_3 = K \cdot S_0, \quad (26)$$

$$K = \frac{K_{f/h}}{K_{q_0/\bar{q}} \cdot K_{L/l}}, \quad (27)$$

$$K_{f/h} = 1,50 - 1,50 f/h, \quad (28)$$

$$K_{q_0/\bar{q}} = 2,0 - 4,0 q_0/\bar{q}. \quad (29)$$

для

$$\frac{L}{l} = 1 + 2, \quad K_{L/l} = 1,$$
$$\frac{L}{l} = 3, \quad K_{L/l} = 1,7.$$

Л и т е р а т у р а

1. J. D. B e n n e t t. Empirical design of symmetrical cylindrical Shells.

Proceeding of the Colloquium on Simplified Calcul. Method. Brussels, Sept. 4-6. 1961, Amsterdam 1962.

2. Н. Л а у л. Raudbetoon II, Tallinn 1962.

3. X. X. Л а у л. Расчет цилиндрических оболочек с криволинейными частями, очерченными по окружности. Труды ТПИ, серия А, № 50, 1953.

4. X. X. Л а у л, Ю. А. Т я р н о. Расчет цилиндрических железобетонных оболочек средней длины. Труды ТПИ, серия А, №217, 1965.

УДК 699.844

001.57

М.Н. Янисо

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ОГРАЖДЕНИЙ НА МОДЕЛЯХ

И. В в е д е н и е

Метод моделирования в настоящее время применяется для исследования самых разнообразных научно-технических задач в аэро- и гидродинамике, строительной механике, теплотехнике и т.д.

Исследование звукоизоляции ограждений на их моделях было разработано И.Г. Лейзером [1]. Разработанный им метод удобен для изучения многих вопросов в области строительной акустики.

Исследование звукоизоляции строительных конструкций опытным путем затрудняется необходимостью изготовления образцов большого размера, что дорого и весьма трудоемко. Поэтому практически целесообразным является изучение звукоизоляции ограждений на их моделях уменьшенного масштаба, особенно при изучении вопросов, требующих серийного испытания.

В настоящей работе изложены исследования некоторых вопросов, касающихся звукоизоляции стен, и описываются малые акустические камеры, построенные в лаборатории кафедры архитектуры Таллинского политехнического института. Приводятся результаты исследования звукоизоляции однослойных газоккермитовых перегородок и стеклянных пластинок.

При моделировании звукоизоляции ограждений используют модели, выполненные из таких же материалов или из материалов близких по физико-механическим свойствам к материалам исследуемых строительных конструкций. В этом случае основное соотношение подобия между оригиналом и моделью имеет следующий вид:

$$C_p = C_t,$$

где C_p — линейный масштаб,

C_t — масштаб времени.

Масштабы подобия частоты, силы звука и давления в этом случае будут:

C_f^{-1} — масштаб частоты,

i — сила звука и давление.

Если удовлетворено соотношение $C_p = C_t$ и для частот модели применяется масштаб C_f^{-1} , то звукоизоляция модели от воздушного шума равняется звукоизоляции оригинала. Вышеуказанное справедливо как при колебаниях изотропных твердых, газообразных и жидких тел, так и при колебаниях сложных тел [1].

2. Малые акустические камеры

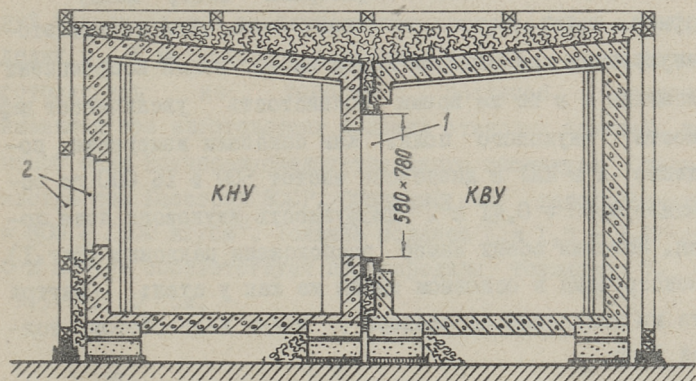
Исследования звукоизоляции ограждений велись на моделях в 1/5 натуральной величины. Размер моделей был принят 57 x 77 см, что в натуре соответствует стеновым конструкциям размерами 2,85 x 3,85 м.

Акустические камеры состоят из камеры низкого уровня (КНУ — объем 0,75 м³), где воспринимается звук, прошедший стеновую конструкцию, и камеры высокого уровня (КВУ — объем 0,8 м³), где расположены громкоговорители для создания звукового поля.

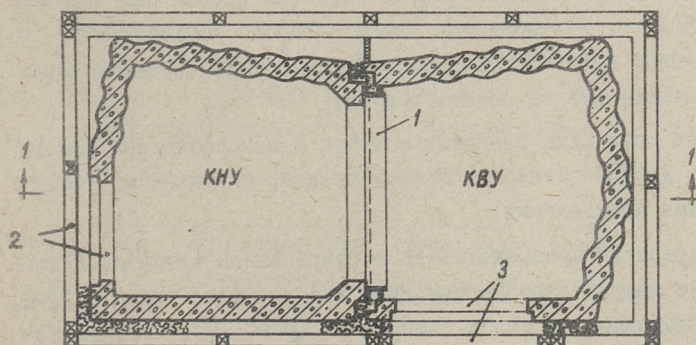
Ниже рассматривается конструкция вышеуказанных камер (фиг. 1, 2, 9). В плане обе камеры расположены рядом и

представляют собой неправильные многогранники. Между двумя камерами имеется проем размерами 50 x 70 см, куда ставят модель испытываемого стенового ограждения в вертикальном положении, что соответствует положению моделируемого ограждения в натуре.

Разрез по 1-1



Фиг. 1. Схематический разрез камер для исследования звукозеркалий. 1—рама для модели, 2—проемы для установки микрофона (показана без люк)



Фиг. 2. План камер. 3—проемы для установки моделей и микрофона (показана без люк)

Основная конструкция обеих камер из железобетона (фиг. I и 2). Железобетонные плиты пола камер опираются на грунт (лаборатория с камерами находится в подвальном помещении) через кирпичные столбики, под которыми подложены войлочные прокладки. Стеновая конструкция камер состоит из двух волнистых асбофанерных плит, между которыми залит бетон толщиной 7 см. Вследствие этого внутренняя поверхность камер имеет малый коэффициент поглощения и в то же время волнистость увеличивает диффузность звукового поля. Как показали измерения, поглощение A в КНУ в диапазоне частот 500 + 16 000 гц составляет $0,20 + 0,41 \text{ м}^2$. Диффузность звукового поля хорошая. Потолки обеих камер расположены наклонно (фиг. I). Их конструкция в основном такая же как у стен: внутри плита из волнистой асбофанеры, затем железобетон толщиной 7 см.

Обе камеры изолированы одна от другой (фиг. I, 2) промежуточными эластичными швами. Модели между двумя камерами монтируются таким образом, чтобы исключить жесткую связь модели со стенами камер.

Обе камеры в свою очередь окружены деревянным кожухом (фиг. I, 2, 9), фанерные стены которого двухслойные с воздушной прослойкой 4 см. Фанерный кожух предусмотрен для защиты КНУ от внешнего шума.

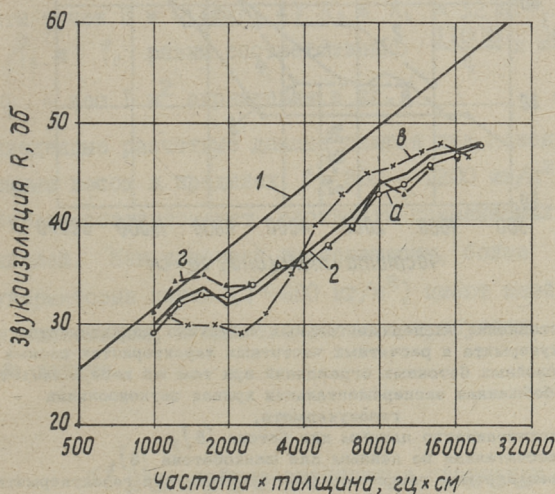
Для установки стеновых моделей и микрофона обе камеры имеют дверцы специальной конструкции, снабженные уплотняющими прокладками.

Измерения проводились по нормированной методике. В качестве излучателей применялись два динамика типа 6 ГД-2, расположенные по углам камеры КВУ (фиг. IO). Возбуждаемое звуковое поле в диапазоне частот 500 + 16000 гц имело уровень звукового давления порядка $100 \div 105 \text{ дБ}$. При измерении звукоизоляции микрофон находился в шести точках внутри камер.

3. Результаты исследований

а) Однослойные газокукермитовые перегородки

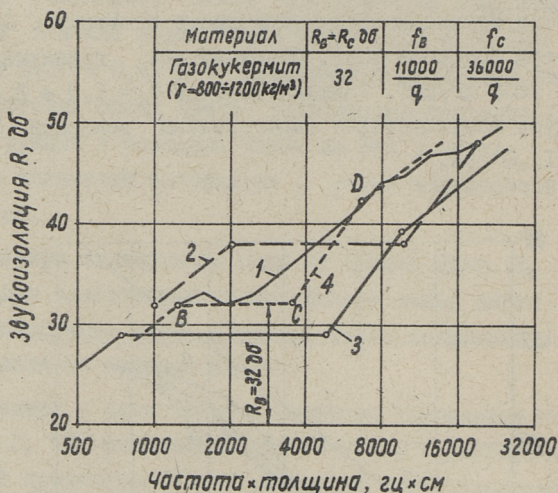
Ниже приводятся результаты экспериментальных исследований звукоизоляции газокукермитовых перегородок на их моделях в 1/5 натуральной величины. Модели перегородок изготовлялись из того же раствора, который применялся при изготовлении больших стеновых панелей на опытной базе Научно-исследовательского института Строительства при Госстрое ЭССР. Объемный вес газокукермита $\gamma = 800 + 1000 \text{ кг/см}^3$. Толщина моделей $\delta_m = 1,9 + 2,2 \text{ см}$, что в натуре соответствует перегородкам толщиной $\delta_n = 9,5 + 11,0 \text{ см}$.



фиг. 3. Звукоизоляция однослойных газокукермитовых ограждений в зависимости от произведения частоты на толщину ограждения.
1 — рассчитанная по закону массы ($\gamma = 900 \text{ кг/м}^3$);
по измерениям автора;
а — газокукермитовая плита толщиной 10 см, в — то же, 11,0 см,
г — то же, 9,8 см;
2 — усредненная кривая звукоизоляции по результатам измерений автора

На фиг. 3 даны измеренные частотные характеристики звукоизоляции (от воздушного шума) вышеуказанных газокукермитовых плит для 1/5 октавных полос. На этой же фигуре дана и усредненная кривая звукоизоляции по результатам измерений автора, поскольку довольно близкое совпадение результатов измерений позволяет обобщить их одной кривой.

Для сравнения измеренных величин звукоизоляции с расчетными на фиг. 4 сопоставлены усредненная экспери-



фиг. 4. Сопоставление экспериментальных частотных характеристик газокукермита и расчетных частотных характеристик разных однослойных бетонных ограждений при том же весе, в кг/м^2 :
 1 - обобщенная экспериментальная кривая звукоизоляции газокукермита,
 2 - рассчитанная по данным для бетона [8],
 3 - рассчитанная по данным для шлакобетона [3],
 4 - предлагаемая расчетная характеристика для газокукермита

ментальная кривая звукоизоляции газокукермита и расчетные частотные характеристики бетонных и шлакобетонных однослойных ограждений. По литературным источникам для

некоторых видов однослойных ограждений разработан графический метод расчета их звукоизоляции, основанный на экспериментальных исследованиях этих ограждений [2,3].

Существующие способы построения расчетных частотных характеристик звукоизоляции не дают пока дифференцированных данных для разных пено- и газобетонных материалов. Имеются данные только для бетона, гипсо- и шлакобетона. Из фиг. 4 видно, что газокермитовые перегородки имеют звукоизоляцию, отличающуюся от вышеуказанных материалов.

Ниже приводятся данные для расчета звукоизоляции от воздушного шума однослойных газокермитовых перегородок с объемным весом $\rho = 800 + 1200 \text{ кг/м}^3$. Методика построения частотной характеристики звукоизоляции газокермитовой перегородки аналогична приведенной в работе [3], но ординаты точек В и С (фиг. 4) $R_B = R_C = 32 \text{ дБ}$, а абсциссы f_B и f_C равны соответственно $\frac{11000}{q}$ и $\frac{36000}{q}$ гц, где q — вес 1 м^2 ограждения, в кг.

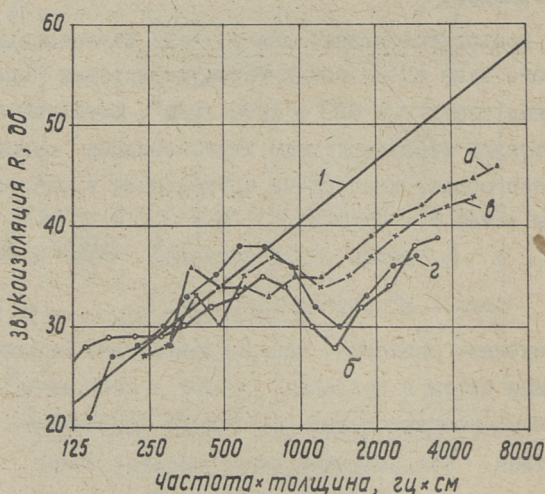
Приведенные расчетные данные даются для газокермита с объемным весом в пределах $\rho = 800 + 1200 \text{ кг/м}^3$, что практически соответствует плотности применяемых стеновых панелей. Как показали эксперименты, более легкие газокермитовые плиты ($\rho \leq 600 \text{ кг/м}^3$) имеют иной характер звукоизоляции, и для его расчета требуются дополнительные данные.

б) Однослойные стеклянные пластинки

Существующие способы построения частотных характеристик звукоизоляции распространяются на проектирование однослойных ограждений из таких материалов как бетон,

шлакобетон, гипсобетон, кирпич и стекло.

Как уже сказано выше, графический метод расчета звукоизоляции ограждений основан на данных экспериментальных исследований. Рассматривая экспериментальные кривые для ограждений разной толщины, но из одного и того же материала, можно было заметить, что характер этих кривых зависит от толщины ограждения. Зависимость звукоизоляции от толщины ограждения была изучена на стеклянных моделях в малых акустических камерах.



фиг. 5. Звукоизоляция однослойных стеклянных пластинок в зависимости от произведения частоты на толщину стекла.

1 — рассчитанная по закону масса,

а — по измерениям автора, толщина 3,0 см; в — то же, толщина 2,4 см

г — то же, толщина 1,45 см, б — экспериментальная [4], толщина 0,7 см

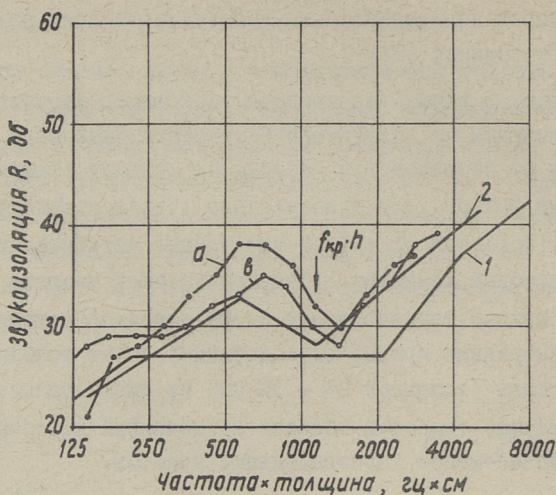
Материалом изучения было выбрано стекло, поскольку из этого материала легко изготавливать модели разной толщины. Измерения проводились на моделях из обыкновенного стекла толщиной $\delta_m = 2,9$ мм, 4,8 мм и 6,0 мм, что соответствует в строительстве толщинам $\delta_n = 14,5$ мм, 24 мм и 30 мм. Для более тонких стеклянных пластинок ($\delta_n = 4$ мм, $\delta_n = 7$ мм),

для которых невозможно было изготовить модели, взяты данные из источника [4].

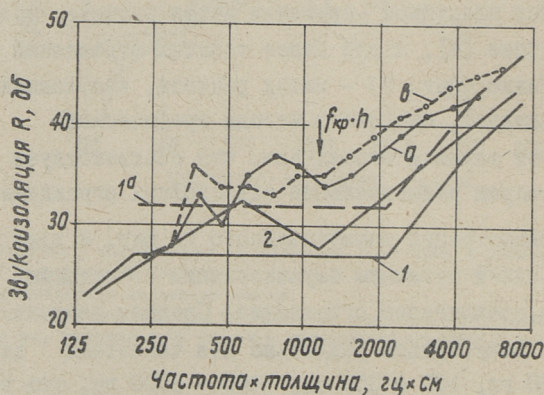
На фиг. 5 даны измеренные частотные характеристики звукоизоляции от воздушного шума стеклянных плит в зависимости от произведения частоты на толщину стекла. Как видно из фигуры, для относительно тонких стеклянных пластинок (толщиной $\delta_n \leq 14,5$ мм) кривые звукоизоляции имеют одинаковый характер. При критической частоте измеренные кривые звукоизоляции имеют довольно острый минимум. Измеренные кривые звукоизоляции более толстых стеклянных плит (толщиной $24 \div 30$ мм) не имеют такого острого минимума; здесь в области критической частоты кривая имеет более-менее горизонтальный участок.

Экспериментальные и расчетные частотные характеристики однослойных стеклянных пластинок сопоставлены на фигурах 6 и 7. Расчетная кривая 1 рассчитана в соответствии с указаниями [3]; кривая 2 по методу, предложенному в работе [4]. Из фиг. 6 видно, что для более тонких стеклянных пластинок применим метод расчета, предложенный в работе [4], а для более толстых ограждений из того же материала (фиг. 7) — метод расчета, изложенный в [3]. Отсюда следует, что выбор метода графического расчета зависит от толщины ограждения, что соответствует современной теории звукоизоляции однослойных ограждений.

Для иллюстрации вышеуказанного на фиг. 8 дана зависимость средней величины звукоизоляции от толщины однослойного стеклянного ограждения. Средняя величина звукоизоляции вычислялась раздельно для частотных диапазонов $100 \div 400$ гц, $400 \div 800$ гц, $800 - 2000$ гц, что в данном случае более-менее соответствует характеру звукоизоляции однослойного ограждения. Как видно из фиг. 8, в диапазоне низких частот ($100 \div 400$ гц) звукоизоляция стеклянных плит растет с увеличением толщины, прирост звукоизоляции интенсивен до толщины 7 мм. На средних частотах ($400 \div$

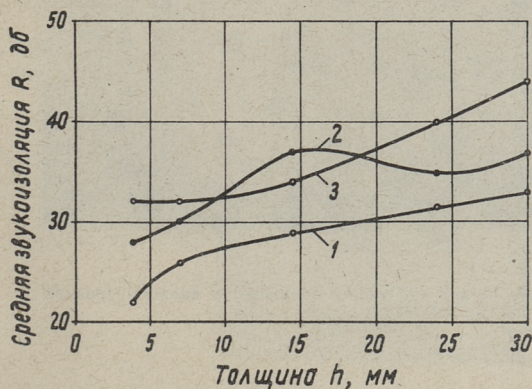


Фиг. 6. Сопоставление экспериментальных и расчетных характеристик однослойных стеклянных пластинок,
 1 - рассчитанная по указаниям [3]; 2 - рассчитанная по методике [4]:
 а - по измерениям автора, толщина 1,45 см,
 в - экспериментальная [4], толщина 0,7 см



Фиг. 7. Сопоставление экспериментальных и расчетных характеристик однослойных стеклянных пластинок,
 1 - рассчитанная по указаниям [3],
 1а - то же, сдвинутая на несколько дБ выше
 2 - рассчитанная по методике [4],
 а - по измерениям автора, толщина 2,4 см,
 в - то же, толщина 3,0 см

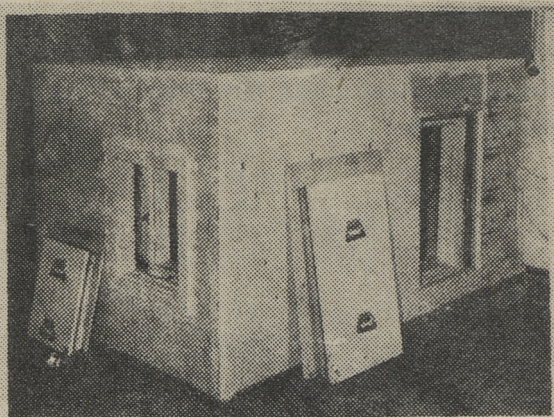
+ 800 гц) звукоизоляция интенсивно растет с увеличением толщины до 15 + 17 мм, достигая здесь максимума. На высоких частотах звукоизоляция при толщинах 4 + 10 мм почти не увеличивается, затем постепенно растет с увеличением толщины. Значит, звукоизоляция в зависимости от толщины ограждения в некоторых частотных диапазонах может не увеличиваться.



Фиг. 8. Зависимость средней величины звукоизоляции от толщины однослойного стеклянного ограждения.

- 1 - в диапазоне низких частот (100 ÷ 400 гц),
- 2 - в диапазоне средних частот (400 ÷ 800 гц),
- 3 - в диапазоне высоких частот (800 ÷ 2000 гц)

Сравнивая данные, приведенные на фиг. 8, с результатами на фигурах 6 и 7, заметим следующее: методика расчета, данная в указаниях [3], справедлива в пределах толщины, где звукоизоляция на низких и высоких частотах растет, а на средних остается почти неизменной. Для ограждений меньшей толщины $\delta_n \leq 17 + 18$ мм, как видно из фиг. 8, звукоизоляция имеет на высоких частотах горизонтальную часть, и характер расчетной схемы имеет иной вид [4].



Фиг. 9. Общий вид камер высокого и низкого уровней

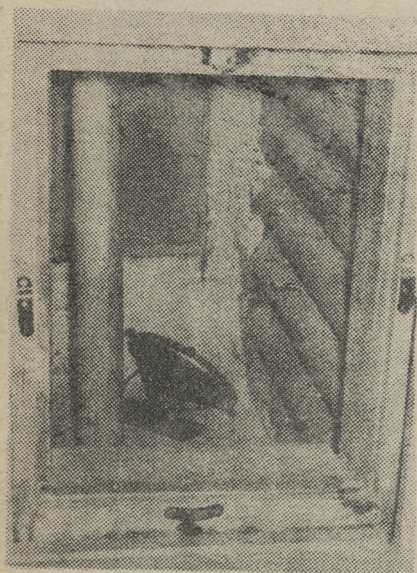
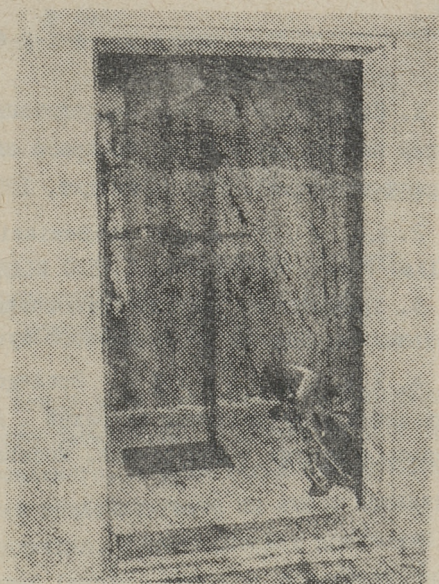
Выводы

1. Методика построения расчетной частотной характеристики звукоизоляции газокермитовых перегородок ($\gamma = 800 + 1200 \text{ кг/м}^3$) аналогична приведенной в работе [2,3], но ординаты точек В и С следует принять $R_B = R_C = 32 \text{ Дб}$, а абсциссы f_B и f_C равны соответственно $11000/q$ и $36000/q$, где q — вес 1 м^2 ограждения, в кг.

2. Методика графического построения частотной характеристики звукоизоляции одного и того же материала зависит от толщины ограждения. Метод расчета по [3] справедлив для относительно более толстых ограждений. Для стеклянных плит он справедлив, начиная с толщины $\delta = 17 + 18 \text{ мм}$.

3. Метод исследования звукоизоляции ограждений на моделях уменьшенного масштаба удобен для изучения многих вопросов звукоизоляции ограждений.

Фиг. 10. Внутренний вид
камеры высокого уровня



Фиг. 11. Внутренний вид
камеры

Л и т е р а т у р а

1. И.Г. Лейзер. Исследование звукоизоляции ограждений на моделях . В сб. "Вопросы звукоизоляции и архитектурной акустики". Госстройиздат, 1959.
2. B.G. W a t t e r s. Transmission loss of some masonry walls. JASA, v. 31, 1959.
3. Указания по расчету звукоизоляции однослойных и раздельных ограждений от воздушного шума. Челябинск, 1965.
4. А.А. К л и м у х и н. Исследование звукоизоляционных качеств остекленных витражей . Доклады совещания: Борьба с шумами и вибрациями. Москва, 1966.

УДК 69.028.2:523.72+613.165

Х.О. Пыллуаас

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОЩАДИ ОКНА НА ОСНОВЕ ПРОНИКАЮЩЕЙ
В ПОМЕЩЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В УСЛОВИЯХ
ЭСТОНСКОЙ ССР

Одной из исходных основ всех архитектурных проектов являются факторы местного биоклимата. В Эстонской ССР существенным фактором биоклимата, определяющим микроклимат помещения и биологически воздействующим на живой организм, является солнечная радиация. В планировании помещений многих общественных зданий (школы, музеи, лаборатории, выставочные павильоны и т.д.) важной основой является также решение естественного освещения. Из области биоклимата архитектору приходится учитывать три основные проблемы, а именно:

- в какой период в жилом и рабочем помещении потребность в солнце является наибольшей;

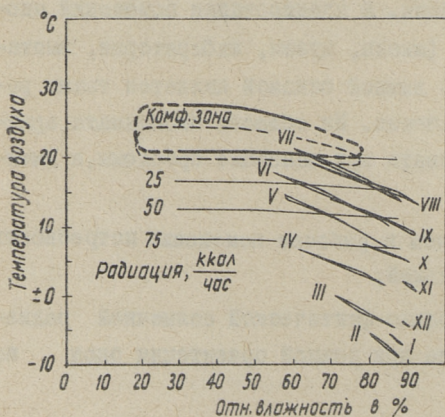
- в какое время и сколько фактической солнечной радиации проникает в помещение при разной ориентации окон по странам света;

- критерии для определения площади и ориентации окна исходя из проникающей в помещение тепловой солнечной радиации.

Потребность в солнечной энергии в Эстонской ССР

Здоровье и работоспособность человека в значительной мере зависят от климатических факторов. Не представляет трудностей обосновать, что холодный период года в Эстонии является наиболее вредным для здоровья временем года, когда потребность в солнце для смягчения неблагоприятного влияния климата благодаря его обогревающему, общебиологическому, бактерицидному и противорахитному действию особенно велика. Поэтому предоставляемую природой солнечную радиацию необходимо ввести в жилые и рабочие помещения с минимальными потерями.

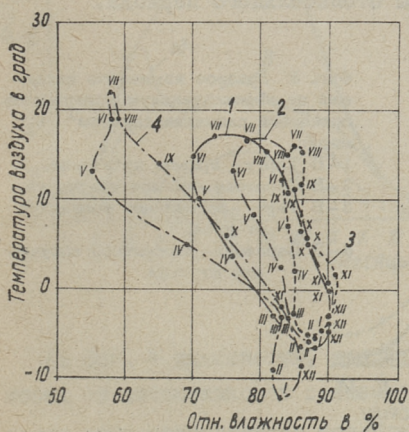
Состояние температуры и влажности воздуха в Эстонской ССР иллюстрирует диаграмма биоклимата города Тарту (фиг. 1) [2].



Фиг. 1 Диаграмма биоклимата г. Тарту. Римскими цифрами (1—XII) показано изменение средне-суточной температуры наружного воздуха и его относительной влажности по месяцам

На диаграмму по месяцам нанесено среднесуточное изменение температуры наружного воздуха и его относительной влажности. В середине проходит летняя зона комфорта, т.е. состояние среды, в котором механизм терморегуляции человека находится под наименьшим напряжением. (Зимняя зона комфорта расположена несколько ниже). Из диаграммы выясняется, что

потребность человека в солнечном тепле вне помещений отмечается почти круглогодично, за исключением июля месяца в полдень, когда в тени он чувствует себя лучше. В летние месяцы в Эстонской ССР в солнцееобильные часы в помещениях требуется защита от солнца. Хотя открытием окон и достигается охлаждение воздуха помещения до наружной температуры, однако и при температуре внутреннего воздуха, остающейся в пределах зоны комфорта, непосредственно падающая на человека солнечная радиация может вызвать расстройство его терморегуляции и снизить работоспособность.



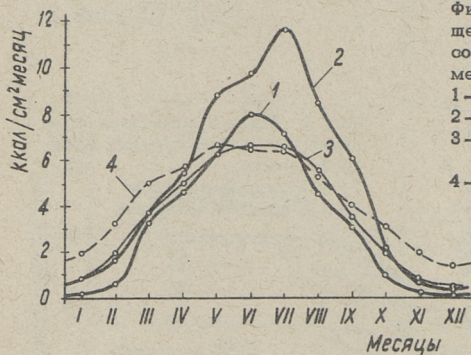
Фиг. 2 Годовое изменение температуры и относительной влажности воздуха
1 - г.Тарту, 2 - г.Таллин
3 - о.Пакри, 4 - г.Саратов

В нормах проектирования действуют одинаковые требования относительно ориентации и размеров окон, а также инсоляции помещений (в отопительный период) в пределах каждого климатического района. Указанные нормы одинаковы как для г.Тарту, так и для г.Саратова (расстояние около 2000 км), хотя состояние температуры и влажности воздуха (фиг. 2) и климат солнечной радиации (фиг. 3) в этих местностях различны. В течение отопительного периода за 7 месяцев в г.Саратове на горизонтальную поверхность приходится почти в 1,5 раза больше солнечной радиации, чем в г.Тарту, вследст-

вие чего при одинаковых размерах и ориентации окон средняя освещенность помещений в г.Саратове во столько же раз больше [2].

Ясно, что применение средних биоклиматических факторов для слишком большой территории на основе отмеченных гигиенических норм дает весьма неточные результаты. Поэтому гигиенические нормы проектирования зданий, учитывающие влажность воздуха и солнечную радиацию холодного периода года, должны основываться на местных климатических данных.

Из вышеизложенного можно заключить, что за основу критерия выбора размеров и ориентации окон следует принимать местные климатические факторы отопительного периода.



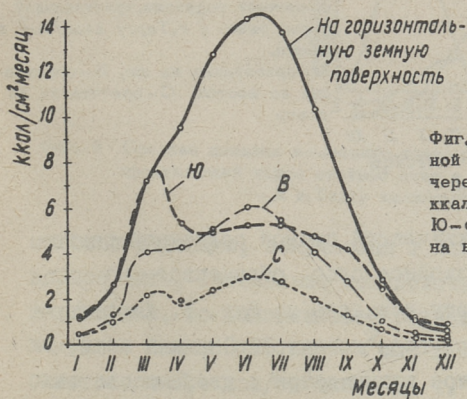
Фиг. 3 Годовое изменение падающей на горизонтальную поверхность солнечной радиации ккал/см² в месяц.

- 1-В Тарту - прямое излучение.
- 2-В Саратове - прямое излучение.
- 3-В Тарту - рассеянное излучение от неба.
- 4-В Саратове - рассеянное излучение от неба

Проникающая в помещение фактическая солнечная радиация в условиях Эстонской ССР

Исходя из данных измерения солнечной радиации Тартуской актинометрической станции за годы 1955-1964 и пропускательности солнечной радиации оконного стекла завода Ярваканди [1], автором рассчитано годовое изменение солнечной радиации, проникающей через двойное окно, для различных ориентаций окон по странам света.

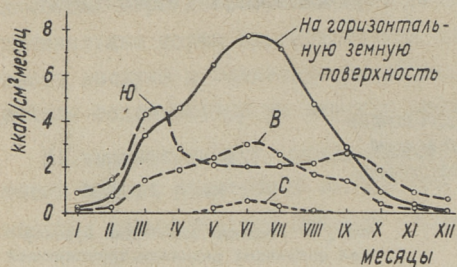
Годовое проникновение суммарной солнечной радиации через двойное окно, обращенное на юг, восток и север, в г. Тарту поясняет фиг. 4. В качестве суммарной солнечной радиации здесь учитываются прямое излучение плюс рассеянное излучение от неба плюс отраженное излучение от поверхности земли. Тут же для сравнения представлено суммарное излучение, падающее на горизонтальную незатемненную земную поверхность.



Фиг. 4 Годовое изменение суммарной солнечной радиации, проникающей через двойное окно, в г. Тарту ккал/см² в месяц. Ю — ориентация на юг, В — ориентация на восток, С — ориентация на север.

Из фиг. 4 выясняется, что наиболее солнечным, в зависимости от интенсивности солнечного излучения и от угла падения луча относительно поверхности окна, в марте месяце является окно, ориентированное на юг, и в июне месяце — окно, ориентированное на восток. В середине лета окно, обращенное на восток, нагревает помещение больше, чем окно, обращенное на юг. Заслуживает внимания излучение, отраженное снеговым покровом. В феврале и марте отраженное снегом излучение составляет в случае южной ориентации окна около 20%, а при восточной и западной ориентации — около 40% от дневной суммарной солнечной радиации, проникающей в помещение через окно.

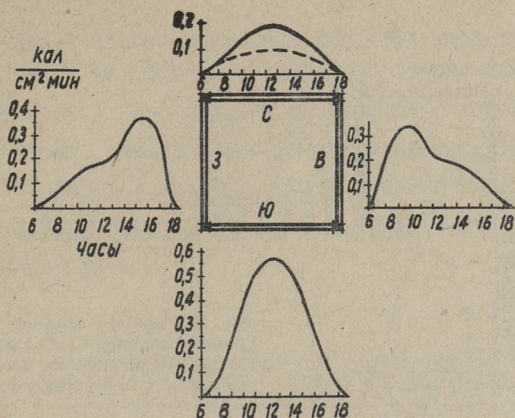
Прямое и излучение солнца отличается по действию от рассеянного солнечного излучения. Прямое излучение более интенсивно и в случае низкого стояния солнца проникает через окно в помещение на большую глубину.



Фиг. 5 Годовое изменение прямой солнечной радиации, проникающей через окно, в г. Тарту ккал/см² в месяц. Ю — ориентация на юг, В — ориентация на восток, С — ориентация на север

Годовое изменение фактической прямой солнечной радиации, проникающей через двойное окно, обращенное на юг, восток и север, в г. Тарту показано на фиг. 5. Характерно, что в холодный период года количество прямой солнечной радиации, пропускаемое южным окном с двойным остеклением, превышает количество прямой солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность в открытой местности. В этот же период помещение инсолируется в наибольшей мере при южной ориентации окна, а летом при восточной. Летняя инсоляция одновременно в сочетании с повышенной температурой наружного воздуха требует мероприятий для предупреждения перегрева помещения и во избежание расстройств терморегуляции человека и падения его работоспособности.

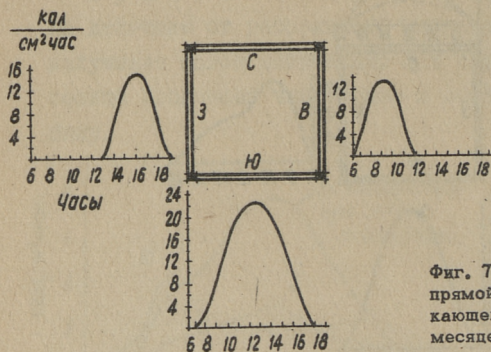
График на фиг. 6 иллюстрирует средний дневной ход фактической суммарной радиации, пропускаемой двойным окном в марте месяце в г. Тарту. Окно обращено на юг, запад, восток и север. Через окно, с ориентацией на север, поступает только рассеянное и отраженное снеговым покровом излучение. В качестве сравнения на графике пунктирной линией показано суммарное излучение через северное окно в сентябре месяце (снег отсутствует). Если макси-



Фиг. 6 Среднее дневное изменение суммарной солнечной радиации, проникающей через двойное окно в марте месяце в г.Тарту ккал/см² мин

мальная радиация, получаемая в полдень через южное и северное окно, составляет соответственно около 0,6 и 0,2 кал/см²мин, то максимальная радиация через восточное окно равна около 0,35 кал/см²мин в 9 ч. и через западное окно около 0,4 кал/см²мин в 15 ч. Графики представляют интерес в первую очередь для гигиенистов. Из них выясняется величина степени хронически влияющей дозы интенсивности фактической солнечной радиации в непосредственной близости от окна, биологическое действие которой на людей и животных можно проследить опытным путем.

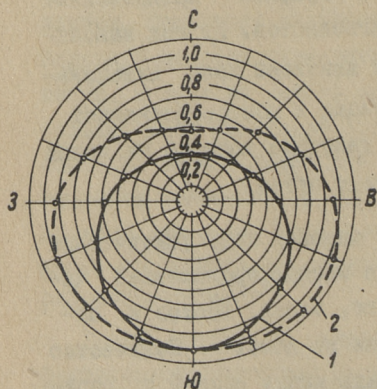
На фиг. 7 представлен средний дневной ход фактической прямой солнечной радиации в марте месяце, проникающей через двойное окно, обращенное на юг, запад, восток и север. Северное окно прямой радиации не дает. Количество дневной радиации показывает площадь между кривой и горизонтальной осью. Сравнение этих площадей показывает, что окно, с ориентацией на юг, пропускает в помещение прямой солнечной радиации в 3 раза больше, чем окно, ориентированное на восток.



Фиг. 7 Среднее дневное изменение прямой солнечной радиации, проникающей через двойное окно в марте месяце в г.Тарту ккал/см²час

О критериях определения площади и ориентации окна

Произведенные расчеты позволяют представить критерии для определения площади и ориентации окна на основе проникающего в помещение солнечного теплового излучения.



Фиг. 8 Относительное число ориентации окна.
1 - в отопительный период (7 мес.),
2 - в летнее время года (5 мес.)

И. Относительное число ориентации окна показывает, каковую долю суммарная солнечная радиация, проникающая через окно в течение отопительного периода (7 месяцев), составляет от радиации, поступающей через окно, ориентированное на юг (фиг. 8).

На основании опроса населения Институт строительства и стройматериалов АН ЭССР дает следующие оценки для ориентации окна: юг... юго-запад и юго-восток рекомендуется (5); юго-запад...запад и юго-восток...восток допустимая (3); запад...север и восток...север недопустимая (2) [4].

Относительные числа и оценка ориентации окна представлены в таблице I.

Т а б л и ц а I

Ориентация окна	Ю	ЮЗ, ЮВ	ЮЗЗ, ЮВВ	З, В	СЗ, СВ	С
Относительное число	1,00	0,85	0,72	0,58	0,37	0,32
Оценка ориентации окна	5	4	3	2	2	1

Относительные числа позволяют вывести ряд заключений. Из них некоторые:

1. Если считать удовлетворяющим освещенность отношение площади южного окна к площади пола 1:7 (обеспечивает для жилого помещения средней величины соответствующий нормам минимальный коэффициент естественного освещения 0,5%), то столько же солнечной радиации в ту же комнату дает в течение отопительного периода окно, ориентированное на восток, площадь которого составляет 1:4 от площади пола.

2. Освещенные с двух сторон квартиры секционных жилищ получают в течение отопительного периода в жилищах, с ориентацией окон на СВ-ЮЗ и ЮВ-СЗ, свыше 5% и в жилищах, с ориентацией окон на Ю-С, почти на 14% солнечной радиации больше по сравнению с жилищем, окна которого обращены на восток и запад.

3. В течение отопительного периода комната с южной ориентацией окна получает на 72% больше солнечного тепла, чем комната с окном, ориентированным на восток и запад.

т 2. К р и т е р и е м о ц е н к и з а т е н я ю щ е -
г о д е й с т в и я п р о т и в о с т о я щ е г о
з д а н и я, с о г л а с н о д е й с т в у ю щ и м н о р м а м, я в л я е т с я р а с с ч и -
т ы в а е м ы й н а о с н о в а н и и р а с с е я н н о г о с в е т а н е б а м и н и м а л ь н о
д о п у с к а е м ы й к о э ф ф и ц и е н т е с т е с т в е н н о г о о с в е щ е н и я. Н а о с н о в е
п о с л е д н е г о с а н и т а р н ы й р а з р ы в м е ж д у з д а н и я м и п р е д у с м о т р е н в
1,5 - 2 в ы с о т ы з д а н и я, н е з а в и с и м о о т о р и е н т а ц и и o k o n п о
с т р а н а м с в e т а. O т с ю д а в ы т е к а е т o ш и б о ч н о е з а к л ю ч e н и e, ч т о
o д н o и т o ж e з д а н и e н a o д и н а к o в o м р а с с т o я н и и з а т e н я e т п e -
р e d ю ж н ы м o k n o м с т o л ь к o ж e c o л н e ч н o г o c в e т a, c k o л ь к o и п e -
р e d с e в e р н ы м o k n o м. Ф а к т и ч e с к и п р o т и в o с т o я щ e e п e р e d ю ж н ы м
o k n o м з д а н и e з а т e н я e т т a k ж e п р o н и к а ю щ ю в п o м e щ e н и e п р я м ю
c o л н e ч н у ю р а д и а ц и ю, к o л и ч e с т в o к o т o р o й в o т д e л ь н ы e м e с я ц ы
м o ж e т в д в a и б o л e e р а з п р e в ы ш а т ь p a c c e я н н o e и з л у ч e н и e н e -
б a. B ц e л я x y c т р а н e н и я э т o г o н e д o c т a т k a в 1963 г. б ы л и в в e -
д e н ы c a н и т a р н ы e н o р м ы п p o e к т и р o в a н и я ж и л ы x и o б щ e c т в e н н ы x
з д а н и й [5], c o г л a s н o к o т o p ы м в к a ч e c t в e к p и т e p и я и н c o л я ц и и
д л я д o c т и ж e н и я o б щ e o з d o p o в и т e л ь н o г o в л и я н и я c л e д y e т п р e д -
в и д e т ь и н c o л я ц и ю п o м e щ e н и я в т e ч e н и e н e м e н e e 3 ч a c o в в
д e н ь н a в c e x г e o г p a ф и ч e c к и x ш и p o т a x C o в e т c k o г o C o ю з a в п e -
р и o д в p e м e н и o т 22 м a p т a д o 22 c e n т я б р я. O з d o p o в и т e л ь н у ю
и н c o л я ц и ю д o л ж н o и м e т ь п o м e н ь ш e й м e р e o д н o ж и л o e п o м e щ e -
н и e 1-2-3-к o м н a т н o й к в a p т и р ы, н e м e н e e ч e м д в a п o м e щ e н и я
4-к o м н a т н o й к в a p т и р ы и н e м e н e e 30% п o м e щ e н и й в o м н o г o к o м -
н a т н o й к в a p т и р e; a т a k ж e в o в c e x c п a л ь н ы x к o м н a т a x o б щ e ж и -
т и я, к o м н a т a x г o c т и н и ц и б o л ь н и ч н ы x п a л a т a x. O д и н ч a c н e -
п o c p e д c t в e н н o п o c л e в o c x o д a и д o з a x o d a c o л н ц a в к a ч e c t в e
в p e м e н и и н c o л я ц и и н e y ч и т ы в a e т c я.

Д л я п o я c н e н и я н и ж e и з л o ж e н н o г o п р e д c т a в л e н a ф и г . 7. П у с т ь
п р o т и в o c т o я щ e e з д а н и e з a т e н я e т c o л н e ч н o e и з л у ч e н и e п e р e d
в o c т o ч н ы м o k n o м в м a p т e м e с я ц e c 8 ч a c . 30 м и н д o 9 ч a c .
30 м и н (I ч a c), O c т a л ь н o e в p e м я п o м e щ e н и e и н c o л я ц и y e т c я 3 ч a -
c a, c 7 ч a c . д o 8 ч a c . 30 м и н и c 9 ч a c . 30 м и н д o II ч a c .
B p e м я c 6 ч . д o 7 ч . (I ч a c п o c л e в o c x o d a c o л н ц a) и c II ч .
д o 12 ч . (з a т e н e н и e o т т o л щ и н ы c т e н ы) н e y ч и т ы в a e т c я. B т e -

чение учитываемого времени окно, ориентированное на восток, пропускает в помещение дозу фактической прямой радиации 27 кал на 1 см^2 площади окна. Окно, обращенное на юг, дает с 10 ч 30 мин до 13 ч 30 мин (также за 3 часа) 64 кал, т.е. в 2,4 раза больше. Особенно большое различие получим, если примем время 3-часовой инсоляции через южное окно в период с 7 ч до 8 ч 30 мин и с 15 ч 30 мин до 17 ч (время с 6-7 ч и с 17-18 ч как в результате затенения толщиной стены, как и низкого стояния солнца в учет не входит). За упомянутое время помещение получит дозу фактической прямой радиации 14 кал на 1 см^2 площади окна, т.е. в 4,6 раза меньше, чем в полдень за 3 часа.

В результате вышеизложенного автор со своей стороны вносит следующее предложение. Ввиду того, что продолжительность инсоляции оценивает биологическое действие солнца неточно, в качестве критерия инсоляции следует принимать относительное число инсоляции, вычисленное на основе дозы инсоляции, т.е. произведения интенсивности радиации и времени ее влияния. Относительное число инсоляции показывает, каковую долю проникающая через окно средняя фактическая дневная доза прямой солнечной радиации в марте месяце составляет от дозы прямой дневной радиации, проникающей через южное окно со свободным горизонтом.

Для определения средней дневной дозы прямой солнечной радиации следует установить промежуток времени, в течение которого солнце светит через данное окно и интенсивность солнечной радиации в этот промежуток времени.

Относительное число инсоляции в случае свободного горизонта и оценка ориентации окна представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Ориентация окна	Ю	ЮЗ, ЮВ	ЮЗЗ, ЮВВ	З, В	СЗ, СВ	С
Относительное число инсоляции	1,00	0,78	0,56	0,36	0,04	0,00
Оценка ориентации окна	5	4	3	2	2	

Пример 1. Пусть противостоящее здание перед южным окном затеняет $2/3$ дозы дневной прямой солнечной радиации в марте месяце. Положение следует оценить как удовлетворительное, так как в данном случае при южной ориентации окна получается столько же прямой солнечной радиации, как и окном со свободным горизонтом, которое ориентировано на восток. Для достижения хорошей инсоляции следует добиваться относительного числа инсоляции не менее $0,56$ или же увеличить площадь окна в $1,7$ раза, что дает отношение площади окна и площади пола $1 : 4,1$ (вместо $1:7$ в случае свободного горизонта).

2. В результате затенения противостоящим зданием получаемое окном, ориентированным на восток, относительное число инсоляции равно $0,24$. Для достижения удовлетворительной инсоляции окно следует увеличить по меньшей мере в $0,36 : 0,24 = 1,5$ раза, что дает отношение площади окна и пола $1:4,7$ (вместо $1:7$).

3. Тепловой баланс окна является критерием его площади, исходя из расходов на отопление. Тепловой баланс характеризует проводящее и согревающее действие окна, так как окно пропускает наружу комнатное и впускает в комнату солнечное тепло. Тепловой баланс позволяет установить возможности увеличения площади окна без повышения при этом расходов на отопление.

Тепловой баланс окна можно улучшить (т.е. уменьшить утечку через окно комнатного тепла в наружный воздух) ночным утепляющим покрытием.

Среднемесячный суточный тепловой баланс (кал/см^2) для окна жилого помещения с двойным остеклением ($K = 2,5$) представлен в табл. 3 [1].

Площадь окна определялась на основе теплового баланса декабря месяца, так как в декабре, вследствие малой солнечной радиации ориентация окна на юг имеет наименьшее предпочтение.

Т а б л и ц а 3

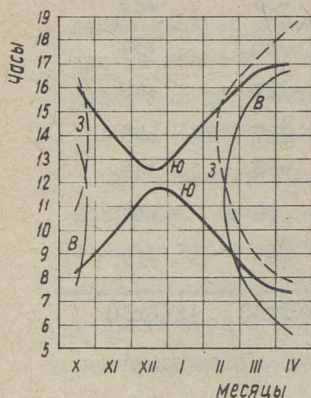
Календар- ный месяц	Ориентация окна на юг		Ориентация окна на восток и запад		Экономия тепла при применении утепляюще- го покры- тия ($K=1,25$)
	Покры- тое окно	Непокры- тое окно	Покры- тое окно	Непокры- тое окно	
Октябрь	+32	+9	-10	-33	+23
Ноябрь	-27	-61	-51	-85	+34
Декабрь	-54	-103	-72	-121	+49
Январь	-56	-105	-78	-127	+49
Февраль	-12	-57	-53	-98	+45
Март	+132	+100	+40	+8	+32
Апрель	+107	+88	+72	+53	+19
Тепловой баланс ото- пительного периода	+122х30	-129х30	-152х30	-403х30	+251х30

В ы в о д ы

1. Площадь окна, ориентированного на юг, может составлять $I : 5,8$ от площади пола (вместо $I : 7$).

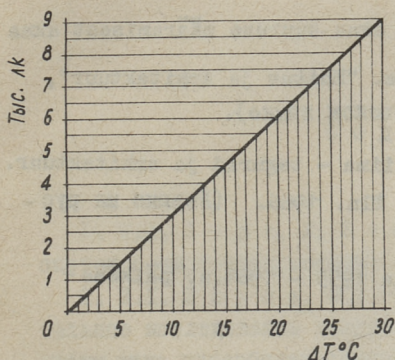
2. После захода солнца площадь утепленного соответствующим покрытием окна, ориентированного на восток или на запад, может составлять $I : 4,2$, а площадь окна, ориентированного на юг, $I : 3,1$ от площади пола (вместо $I : 7$); коэффициент теплопроводности утепленного окна $K=1,25$. Тепловой баланс окна, ориентированного на юг, утепленного на ночь соответствующей шторой или ставнями является на протяжении всего отопительного периода положительным, т.е. окно помогает согреть комнату. Применение ночной утепляющей шторы дает в течение отопительного периода экономию тепла около 75.000 ккал на м²

площади окна. Поэтому назрела необходимость, учитывая современные большие площади окон, разработать соответствующие климатическим условиям Эстонской ССР конструкции утепляющих оконных покрытий, приступить к их производству и направить в торговую сеть.



Фиг. 9 Часы, когда тепловой баланс двойного окна ($K=3,2$) жилого помещения является положительным. Ю — ориентация на юг, З — ориентация на запад, В — ориентация на восток

График на фиг. 9 показывает часы, когда тепловой баланс двойного окна ($K=3,2$) является положительным. Видим, что окно, ориентированное на юг, согревает жилое помещение (температура внутреннего воздуха 18°C) даже и в декабре месяце в полдень в течение примерно 1 часа, в то время как тепловой баланс окна, ориентированного на восток или на запад, в период с 25 октября до 15 февраля остается неизменно отрицательным. Окно следует покрывать утепляющей шторой тогда, когда расход тепла станет превышать согревающее действие солнца. Ориентировочный момент для покрытия окна утепляющей шторой в каждом конкретном случае в зависимости от разницы между температурами комнатного и наружного воздуха и от интенсивности проникающей через окно солнечной радиации позволяет определить представленная на фиг. 10 номограмма.



Фиг. 10 Номограмма определения момента времени для утепления окна соответствующим покрытием в зависимости от разницы между температурами комнатного и наружного воздуха и от плотности солнечного света, проникающего через окно ($K=2,5$)

П р и м е р: Пусть температура внутреннего воздуха комнаты будет $+15^{\circ}\text{C}$ и наружного воздуха -2°C ($\Delta T = 17^{\circ}\text{C}$). Двойное окно покрывается утепляющей шторой тогда, когда прикладывая фотозлемент светочувствительным слоем непосредственно к оконному стеклу люксметр показывает освещенность ниже 5000 люкс. Наличие зависимости между интенсивностью солнечной радиации и освещенностью ($I \frac{\text{ккал}}{\text{см}^2 \cdot \text{мин}} \sim 70000 \text{ лк}$) позволяет на основе вышеизложенного автоматизировать опускание и поднятие утепляющего оконного покрытия.

В з а к л ю ч е н и е. Все представленные критерии рекомендуется применять в архитектурном проектировании как для определения оптимальной площади окна и его ориентации, так и для оценки решения жилой застройки на основе проникающей в помещение солнечной радиации.

До настоящего времени во многом опирающееся на интуицию и как-бы следующее направлениям моды определение размеров окна следует заменить современными научными методами, учитывающими местные климатические условия.

Л и т е р а т у р а

1. H. P õ l l u a a s. Elamu akna suuruse määramisest akna soojabilansi alusel Eesti NSV-s. "Ehitus ja Arhitektuur", nr. 2, Tln. 1966. (Резюме на русском языке).

2. H. P õ l l u a a s. Biokliima - tegurid ja arhitektuur. "Ehitus ja Arhitektuur", nr. 4, Tln. 1966. (Резюме на русском языке)

3. Tartu aktionomeetria jaama 1955 - 1964.a. päikese-kiirguse kuutabelid. Tõravere.

4. L. V o l k o v. Elanikud elamust. Elamuehituse küsimusi Eesti NSV-s. Artiklite kogumik. Tln., 1963. (Резюме на русском языке).

5. Санитарные нормы и правила обеспечения инсоляции жилых и общественных зданий и жилой застройки населенных мест. М. 1963.

С о д е р ж а н и е

	Стр.
1. И.И. А а р е, Л. Ю к с т и. Расчет балочных систем с перпендикулярными элементами	3
2. Х.Х. Л а у л ь, М.Г. В а й к. Экспериментальное исследование квадратных железобетонных оболочек вида гиперболического параболоида с предварительно напряженной арматурой	15
3. Х.Х. Л а у л ь, А.И. Л а в р о в. О расчете диафрагм коноидальных оболочек	27
4. Ю.А. Т я р н о. Статистическо-эмпирический метод расчета железобетонных оболочек (внутренняя волна многоволновых оболочек)	41
5. Ю.А. Т я р н о. Статистическо-эмпирический метод расчета железобетонных оболочек (отдельно стоящая волна оболочки)	57
6. М.Н. Я а н и с о. Исследование звукоизоляции ограждений на моделях	69
7. Х.О. П ы л л у а а с. Определение площади окна на основе проникающей в помещение солнечной радиации в условиях Эстонской ССР	83



СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ
И
СТРОИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА
1У

ТАЛЛИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Редактор В. Райдна
Техн. редактор Л. Лоопер

Сдано в набор 10/XI 1966 года
Подписано к печати 1/XII 1966 г. Бумага 60x90, 1/16
Печ. л. 6,25. Уч.изд. л. 5,0. МБ-11221. Зак. 455 Тираж 500
Ротапринт ТПИ, Таллин, Пикк ялг 14

Цена 33 коп

Цена 33 коп.