

А. А. Сумбак

**Экспериментальное исследование предварительно
напряженных цилиндрических железобетонных
оболочек**

А. А. Сумбак

**Экспериментальное исследование предварительно
напряженных цилиндрических железобетонных
оболочек**

Технический институт химии
Институт химии
1931

Л. А. Сидяк

Исследования по химии
и физике
жидкостей



77

ВВЕДЕНИЕ

Для проверки теоретических результатов, изложенных в статьях [5] [6], были моделированы две предварительно напряженные железобетонные цилиндрические оболочки и произведено их экспериментальное исследование. В настоящей статье изложены некоторые результаты испытания этих моделей.

Точному сравнению теоретических (см. [5] и [6]) и экспериментальных результатов препятствует обстоятельство, что методы расчета обоснованы на теории упругих оболочек, т. е. предполагается, что материал оболочки однороден и подчиняется закону Гука. В действительности же модуль упругости бетона зависит от напряженного состояния и следовательно в разных точках оболочки различен.

Поэтому исчерпывающая оценка точности вышеуказанных методов расчета является затруднительной, но все же хотя бы качественно можно судить, насколько результаты расчета близки к действительности.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ

а) Принцип и масштаб моделирования

При моделировании потребовалось, чтобы возникающие в модели напряжения равнялись напряжениям действительной конструкции. Из теоретических основ моделирования известно, что в n раз уменьшенной модели полученные напряжения при равных характеристиках упругости материалов модели и конструкции равны напряжениям в конструкции, а деформации уменьшаются в n раз, если поверхностная нагрузка модели равна нагрузке конструкции, линейная нагрузка уменьшена в n раз и сосредоточенная нагрузка в n^2 раза.

Вышеизложенное учитывается при моделировании нагрузок, а также предварительного напряжения.

Была моделирована оболочка в масштабе 1 : 10, рассматриваемая в примерах [5] и [6]. Геометрические данные моделей следующие: длина $L = 250$ см, ширина $b = 120$ см, толщина $\delta = 0,7$ см, радиус $R = 93,3$ см, угол раскрытия оболочки $\varphi_0 = 40^\circ$, высота бортового элемента $h = 18$ см, толщина бортового элемента $\delta_0 = 2,0$ см.

б) Опалубка и бетонирование

Для бетонирования моделей спроектировали и изготовили специальную сборную деревянную опалубку (рис. 1, 2, 3, 4). Для распалубки и предотвращения усадочных трещин внутренняя часть опалубки спроектирована из четырех, сдвигаемых относительно друг друга частей (рис. 1). Также внешние щиты опалубки бортовых элементов и диафрагм разбираемы в углах (рис. 2) и при надобности позволяют изменить толщины бортовых элементов и диафрагм.

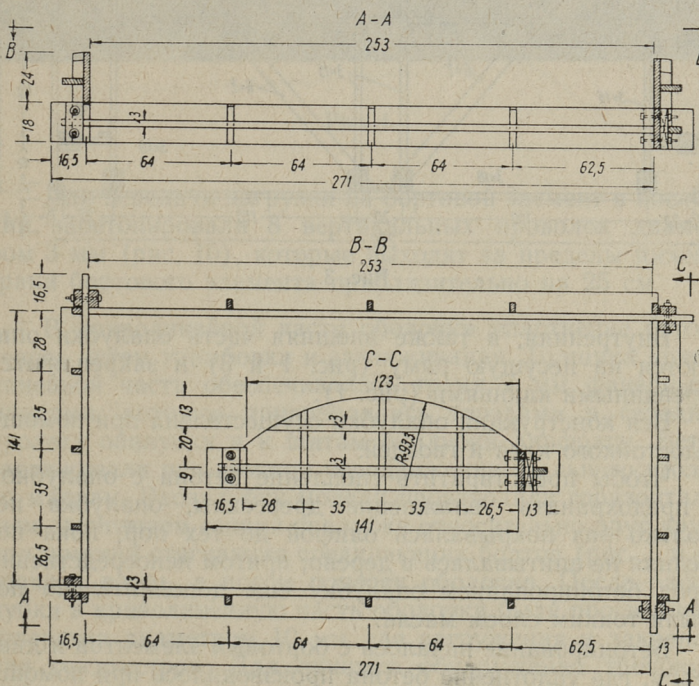


Рис. 2.

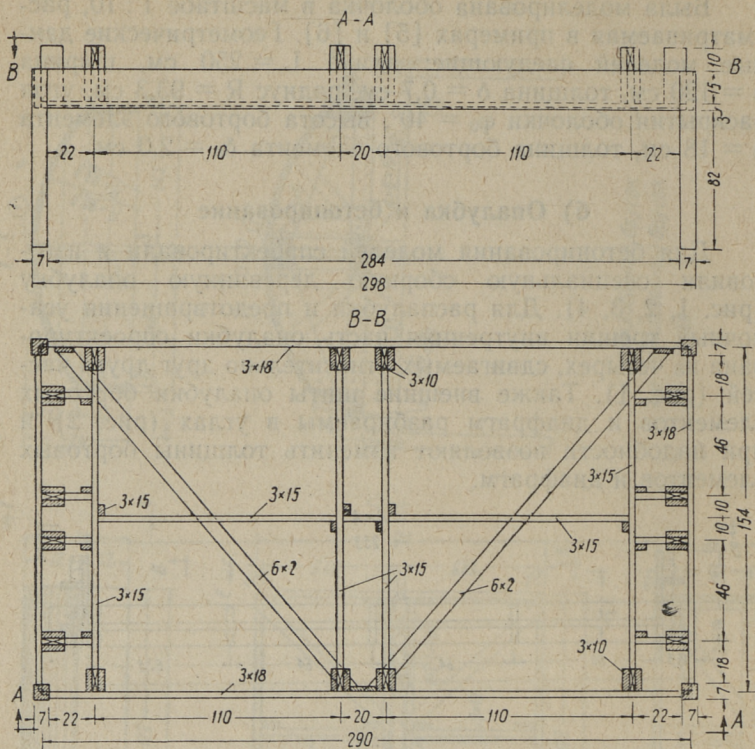


Рис. 3.

Внутренняя, а также внешняя часть опалубки опираются на несущую раму (рис. 1 и 3) и закрепляются деревянными клиньями (рис. 1).

Вся конструкция опалубки осуществлена при помощи водостойкого клея и гвоздей.

Чтобы предотвратить сцепление бетона с опалубкой и предохранить увлажнение древесины, опалубка несколько раз покрывалась олифой до тех пор, пока последняя не впитывалась в дерево; притом непосредственно перед бетонированием опалубку еще дополнительно покрыли тонким слоем масла.

Бетонирование началось с бортовых элементов и диафрагм, где уплотнение бетона производилось при помощи вибрирования.

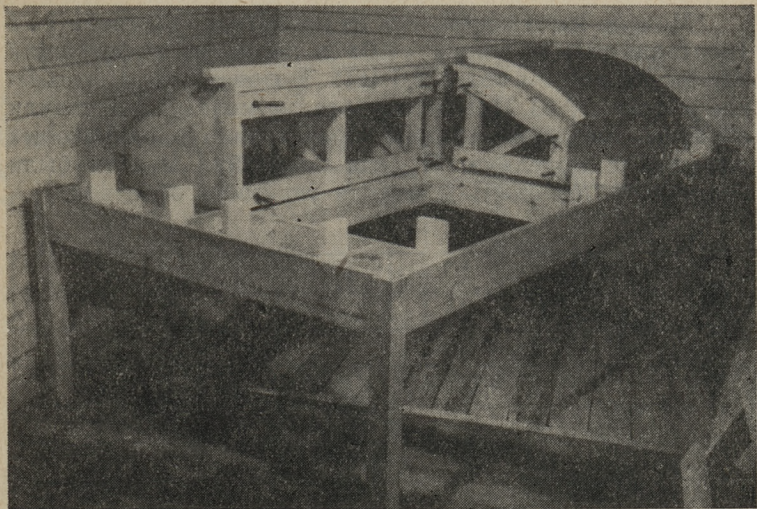


Рис. 4.

Для передачи нагрузки на бортовой элемент в последний забетонировали 8 вертикальных проволок диаметром 3 мм (рис. 10), которые выходят за пределы нижней грани бортового элемента приблизительно на 25 см.

В криволинейной части оболочки уплотнение бетона велось путем трамбовки и заглаживания. Толщина криволинейной части обеспечивалась тремя 7 мм фанерными маяками, которые прикреплялись гвоздями в середине пролета опалубки и к щитам опалубки диафрагм. Бетон заглаживали при помощи передвижения стального уголка по маякам. Распалубку модели производили горизонтальным сдвиганием секций опалубки относительно друг друга при помощи стягивания соединяющих болтов (рис. 1 и 4), сначала вдоль, а потом поперек оболочки. После распалубки в криволинейную часть оболочки были просверлены отверстия диаметром 10 мм для загрузки и закрепления тензометров. Для лучшего обнаружения трещин и наблюдения за ними нижняя и верхняя поверхность оболочки были выбелены.

в) Раствор

Модели изготавливались из цементного раствора 1 : 2 (портланд-цемент марки «400» и песок, не содержащий частиц диаметром более 2,5 мм). Водоцементное отношение раствора 0,33. При бетонировании моделей изготовили образцы, твердение которых происходило в одинаковых условиях с моделями. В день испытания модели были определены прочность и модули упругости образцов.

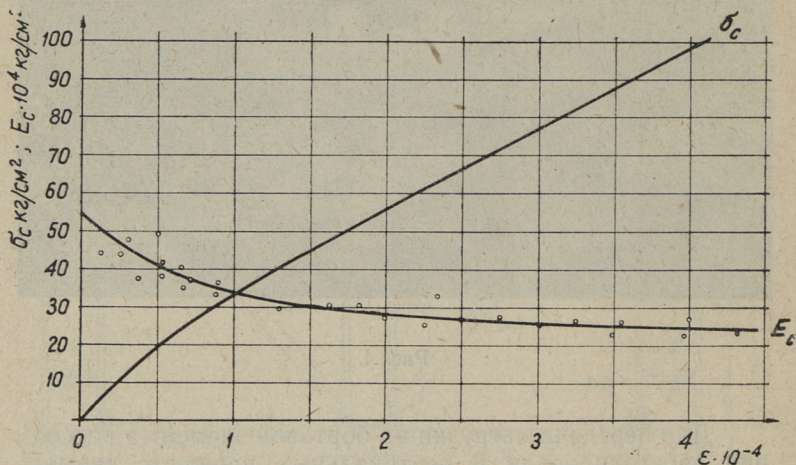


Рис. 5.

Во время испытания моделей прочность бетона при растяжении была в бортовых элементах: $R_p = 46$ кг/см², — в криволинейной части: $R_p = 36$ кг/см². Разность прочностей вызвана различием способов укладки бетона (вибрирование и трамбовка) и толщинами образцов, которые были равны толщинам соответствующих элементов модели, т. е. 20 мм и 7 мм. Прочность раствора при сжатии определялась на призматических образцах $4 \times 4 \times 12$ см и получили $R_{пр} = 456$ кг/см². На тех же образцах определили модуль упругости при сжатии (рис. 5), а модуль упругости при изгибе (рис. 6) при помощи балочек, высота которых равнялась толщине модели оболочки, т. е. 7 мм, ширина 20 мм и пролет 200 мм. Модуль упругости при растяжении (рис. 7) определили на образцах с поперечными сечениями 7×20 мм.

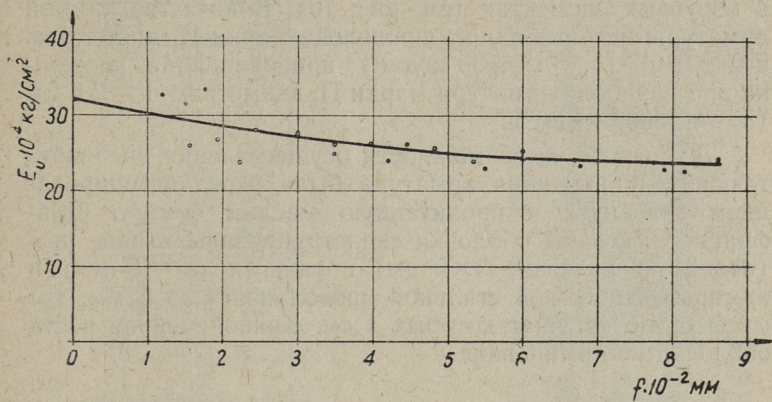


Рис. 6.

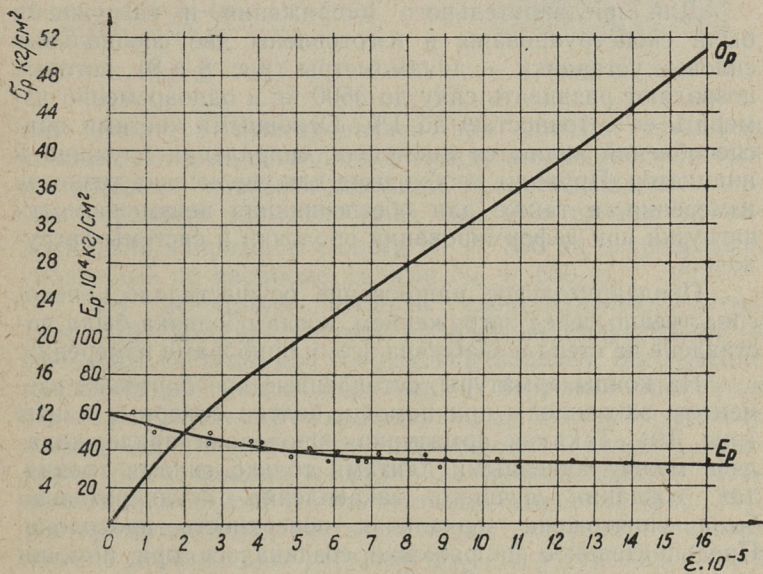


Рис. 7.

г) Арматура

Предварительно напряженная арматура расположена в бортовых элементах (см. рис. 10). В качестве прямой арматуры использовалась проволока марки П, диаметром $d = 2,5$ мм ($\sigma_p = 16500$ кг/см²); криволинейная, уложенная по параболе арматура марки П, диаметром $d = 3,5$ мм ($\sigma_p = 15000$ кг/см²).

Для создания возможности осуществления предварительного напряжения арматура была перед бетонированием завернута в пропитанную маслом бумагу. Диафрагмы и столбы оболочки сконструированы в виде рам (поперечное сечение 3×5 см) с тяжами ($d = 8$ мм) и армированы мягкой стальной проволокой $4 \text{ } \varnothing 5$ мм; хомуты $\varnothing 1,5$ мм, шаг которых 4 см. Криволинейная часть оболочки не армирована.

2. ИСПЫТАНИЕ МОДЕЛЕЙ

а) Предварительное напряжение и загрузка

Для предварительного напряжения и загрузки были сконструированы и изготовлены две специальные силовые установки — динамометры (рис. 8 и 9), которые позволяют развивать силу до 3500 кг и одновременно измерить ее с точностью до 1%. Основными частями приспособлений являются шпиндель, спиральная пружина и индикатор. Пружина необходима для увеличения точности измерения, а также для обеспечения неизменяемости нагрузки при деформировании оболочки и системы загрузки.

Предварительное напряжение осуществлялось непосредственно перед загрузкой, когда оболочка была поставлена на стенд и снабжена всеми приборами измерения.

На концы арматуры, оставленные вне бортовых элементов, закреплены при помощи болтов анкерные плиты (рис. 10). Так как арматурная проволока придерживалась между анкерными плитами только силами трения, для создания лучшего закрепления предварительно была уничтожена зеркальная поверхность проволоки. Предварительное напряжение создавалось при помощи двух установок (рис. 8 и 9), вначале натягая одновременно обе прямые проволоки (рис. 10) и потом проволоки, расположенные по параболе. Предварительно напряжен-

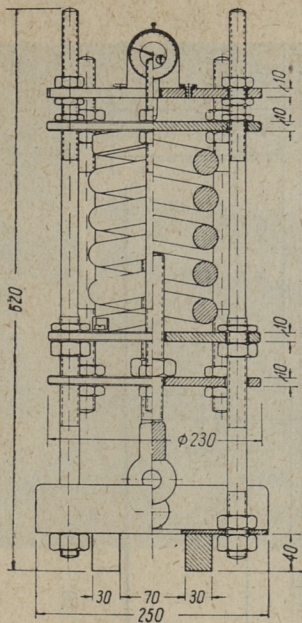


Рис. 8.

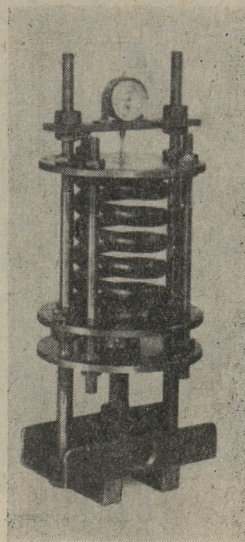


Рис. 9.

ная арматура фиксировалась при помощи стальных клиньев, которые вставлялись между анкерными плитами и стальными опорными деталями, прикрепленными к торцам бортового элемента (рис. 10). Обе прямые проволоки были напряжены силами $\bar{N}_1 = 350$ кг, а проволоки, уложенные по параболе, силами $N_1 = 650$ кг.

Для испытания моделей сконструирован стенд (рис. 10), который состоит из несущей конструкции и рычажной системы для загрузки моделей. Загружение криволинейной части оболочки и бортовых элементов было произведено пропорционально их собственному весу и снеговой нагрузке. При помощи одной силовой установки была создана нагрузка на криволинейную часть оболочки, а другой — на бортовые элементы (рис. 10). На криволинейную часть оболочки нагрузка передавалась 64 деревянными рейками (рис. 10 и 11), на каждый бортовой элемент через 8 точек. Таким образом на оболочку и бортовые элементы были созданы практически равномерно распределенные нагрузки.

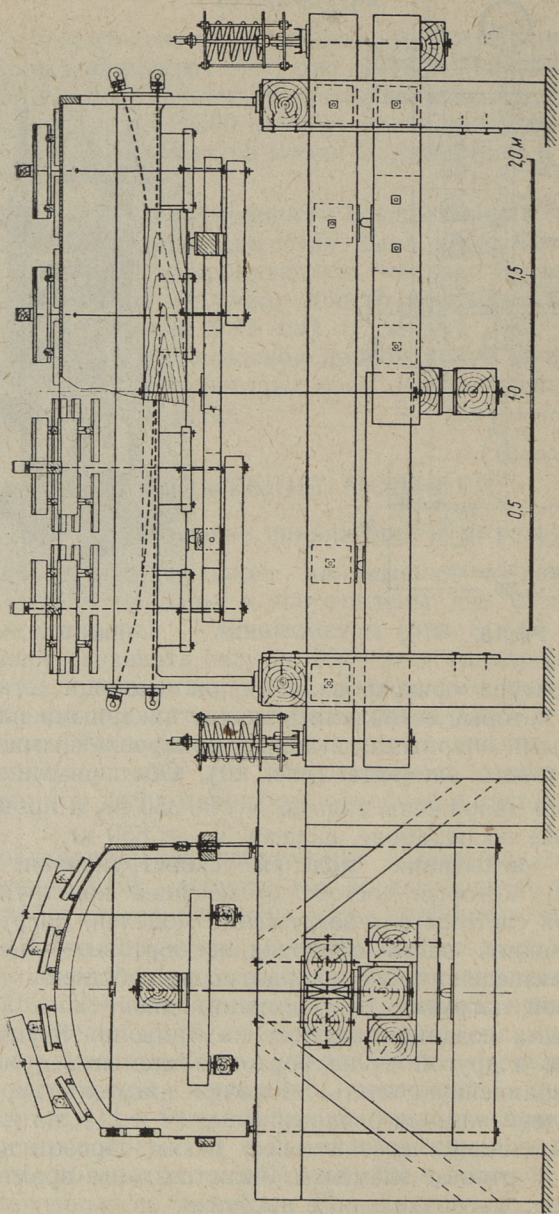


Рис. 10.

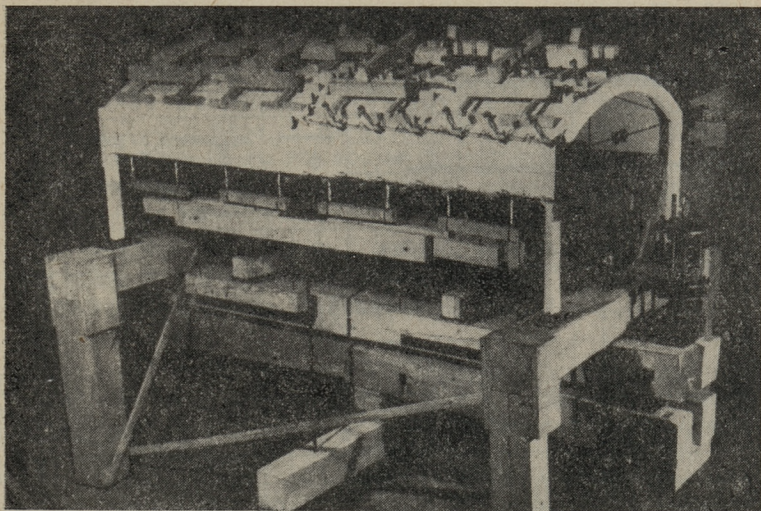


Рис. 11.

б) Измерение деформаций

Измерялись прогибы, продольные деформации и углы поворотов, используя индикаторы, механические тензометры и зеркальные приспособления (расположение измерительных приборов см. на рис. 12).

Тензометры с базой 200 мм, расположенные на криволинейной части оболочки (рис. 11), закреплялись крючками через отверстия, просверленные в оболочке. Для обеспечения лучшей работы тензометров под гайки крепежных крючков были подложены резиновые пластинки толщиной 10 мм. Зеркала (8 штук) расположены поперек оболочки в середине продольного пролета и вдоль гребня оболочки (7 штук). На зеркала проектировались горизонтальные линии, откуда они отражались на экран, подвешенный на стене. В соответствии с перемещением линий на экране и его расстоянию от зеркал были определены углы поворотов в местах расположения зеркал. На оболочку было установлено всего 37 тензометров (из них два на диафрагме и два на тяже), 15 зеркал и 7 индика-

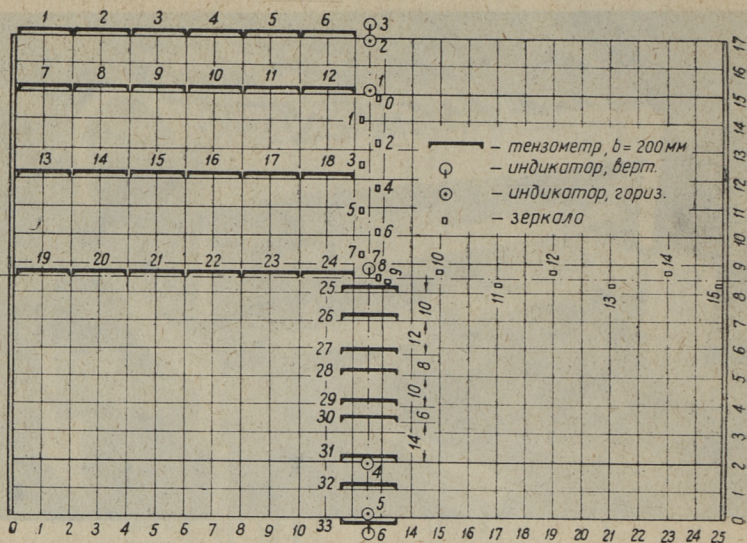


Рис. 12.

торов. При испытании каждой модели было получено свыше 2000 отчетов, которые из-за ограниченности объема нашей статьи здесь не приведены.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Некоторые результаты испытаний моделей приведены на рис. 13 и 14. Разрушающая нагрузка была достигнута (вместе с собственным весом оболочки и весом рычажной системы) приблизительно при 3150 кг ($q = 907$ кг/см²). Разрушение произошло из-за растягивающих напряжений в середине продольного пролета, где в обоих бортовых элементах одновременно появилось по одной вертикальной трещине, причем каждая распространилась немного в криволинейную часть оболочки (14 см). Ширина трещины у нижней грани бортовых элементов около 2 мм.

Возникновение трещин не означало еще потери несущей способности модели. После появления упомянутых трещин нагрузку больше не увеличивали, так как в прак-

тике возникновение трещин в предварительно напряженных оболочках при эксплуатационных нагрузках, как правило, не допускается.

По сравнению с моделями без предварительного напряжения разрушающая нагрузка увеличилась примерно в 2—2,5 раза, а нагрузка на образование трещин в 2,5—3,5 раза. В то же время поперечное сечение арматуры предварительно напряженной оболочки было примерно в пять раз меньше.

Сравнение полученных экспериментальным и теоретическим путем продольных напряжений σ_1 в середине продольного пролета, приведено на рис. 13.

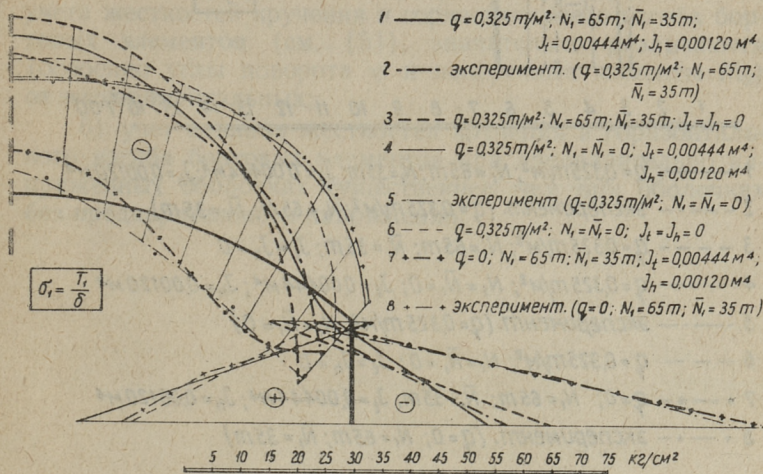
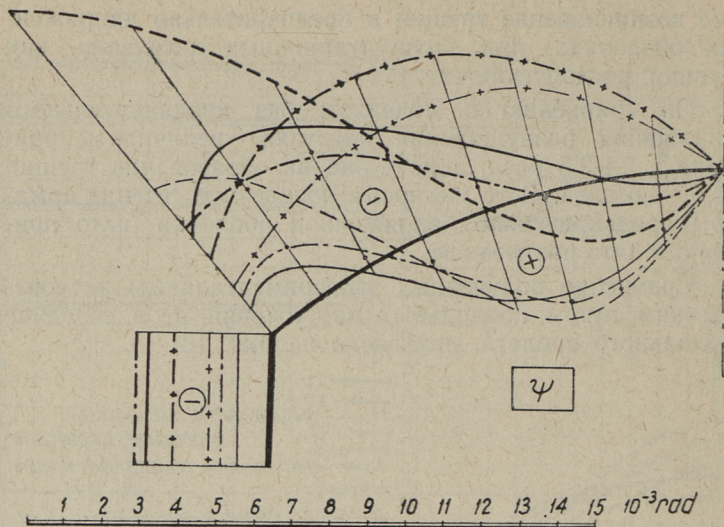


Рис. 13.

Из рисунка 13 видно, что продольные напряжения, полученные экспериментальным путем, достаточно хорошо совпадают с результатами, полученным по методу, изложенному в [6], т. е. с учетом жесткостей кручения и горизонтального изгиба бортовых элементов.

В случае пренебрежения жесткостей кручения и горизонтального изгиба бортовых элементов (см. [5]) расхождения в некоторой степени увеличиваются (сравн. рис. 13 (1) с (2) и (3) с (2)).



- 1 ——— $q = 0,325 \text{ т/м}^2; N_1 = 65 \text{ т}; \bar{N}_1 = 35 \text{ т}; J_t = 0,00444 \text{ м}^4; J_h = 0,00120 \text{ м}^4$
- 2 - - - - эксперимент. ($q = 0,325 \text{ т/м}^2; N_1 = 65 \text{ т}; \bar{N}_1 = 35 \text{ т}$)
- 3 - - - - $q = 0,325 \text{ т/м}^2; N_1 = 65 \text{ т}; \bar{N}_1 = 35 \text{ т}; J_t = J_h = 0$
- 4 ——— $q = 0,325 \text{ т/м}^2; N_1 = \bar{N}_1 = 0; J_t = 0,00444 \text{ м}^4; J_h = 0,00120 \text{ м}^4$
- 5 - - - - эксперимент. ($q = 0,325 \text{ т/м}^2; N_1 = \bar{N}_1 = 0$)
- 6 - - - $q = 0,325 \text{ т/м}^2; N_1 = \bar{N}_1 = 0; J_t = J_h = 0$
- 7 + — + - $q = 0; N_1 = 65 \text{ т}; \bar{N}_1 = 35 \text{ т}; J_t = 0,00444 \text{ м}^4; J_h = 0,00120 \text{ м}^4$
- 8 + — + - эксперимент. ($q = 0; N_1 = 65 \text{ т}; \bar{N}_1 = 35 \text{ т}$)

Рис. 14.

Сопоставление углов поворота ψ , полученных экспериментальным путем, с теоретическими приведено на рис. 14. Углы поворота (2), полученные экспериментальным путем достаточно близки теоретическим (1), полученным с учетом жесткостей кручения и горизонтального изгиба бортовых элементов (см. [6]), но существенно различаются от углов поворота (3), полученных без учета жесткостей кручения и горизонтального изгиба бортовых элементов (см. [5]).

Из экспериментального исследования цилиндрических предварительно напряженных оболочек вытекает следующее:

1) достигается значительная экономия арматуры по сравнению с оболочками без предварительного напряжения;

2) возрастают разрушающая нагрузка и трещиностойчивость;

3) значительно увеличивается жесткость оболочки;

4) при эксплуатационных нагрузках предварительно напряженные оболочки работают в упругой стадии;

5) результаты испытания достаточно хорошо совпадают с теоретическими, полученными по методу, изложенному в [6]. Теоретические результаты, полученные без учета жесткостей кручения и горизонтального изгиба бортовых элементов (см. [5]), значительно различаются (особенно углы поворота ψ и поперечные моменты M_2) от экспериментальных;

6) учет влияния жесткостей кручения и горизонтального изгиба бортовых элементов при предварительно напряженных оболочках существеннее, чем при оболочках без предварительного напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новожилов В. В. Теория тонких оболочек. 1951.
2. Власов В. З. Общая теория оболочек. 1949.
3. Гольденвейзер А. Л. Теория упругих тонких оболочек. 1953.
4. Лаул Х. Х. Цилиндрические железобетонные оболочки с предварительно напряженной арматурой. Труды Таллинского Политехнического Института, № 45, 1953.
5. Сумбак А. А. Расчет предварительно напряженных цилиндрических железобетонных оболочек. Труды Таллинского Политехнического Института, № 159, 1959.
6. Сумбак А. А. Расчет предварительно напряженных цилиндрических железобетонных оболочек с учетом жесткостей кручения и горизонтального изгиба бортовых элементов. Труды Таллинского Политехнического Института, № 161, 1959.
7. Rabich, R. Die Statik der Schalenträger. Bauplanung-Bautechnik, Januar, 1956.
8. Rühle, H. Die Rationalisierung des Entwurfs und der Ausführung von Schalenbauten. Bauplanung-Bautechnik, März 1956.
9. Tetzlaff, W. Die praktischen Berechnungsverfahren für tonnen- und trogartige Schalen. VEB Verlag Technik, Berlin 1955.
10. Schmausser, G. Berechnung zylindrischer Schalendächer unter Längsvorspannung nach der Methode des «stellvertretenden Faltwerks». Die Bautechnik, Februar und Mai 1957.
11. Kirkland, C. W. The Design and Construction of a Large-Span Prestressed Concrete Shell Roof. The Structural Engineer, April 1951.
12. Haas, A. M. Ontwerp en berekening van shedschaaldaken in voorgespannen beton voor 2×40 m overspanning. Ingenieur, 1956, Nr. 15.

А. А. Сумбак

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО
НАПРЯЖЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ОБОЛОЧЕК

Таллинский Политехнический Институт

*

Редактор Х. Лауль

Технический редактор А. Тамм

Корректор М. Каска

Сдано в набор 3 VI 1959. Подписано к печати 20 VI 1959. Формат
бумаги $54 \times 84^{1/16}$. Печатных листов 1,25. По формату 60×92 печат-
ных листов 1,03. Учетно-издательских листов 0,68. Тираж 500.
МВ-06251. Заказ № 374.

Типография Управления Делами СМ ЭССР, Таллин.

Цена 50 коп.

Цена 50 коп.

С 1. 1961 г.

— 05

EESTI AKADEEMILINE RAAMATUKOGU



1 0200 00134328 8