

Х. ЛАУЛ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОБОЛОЧЕК В ЭСТОНСКОЙ ССР

Железобетонные оболочки, благодаря экономичному расходу материалов и некоторым архитектурным преимуществам, часто применяются для сооружения покрытий производственных, общественных, складских и др. зданий. Однако вопросы технологии возведения, а также расчета железобетонных оболочек требуют еще значительной доработки. Говоря о проблемах расчета, следует отметить, что недавно в нашей стране были введены новые инструкции по проектированию железобетонных тонкостенных конструкций [1]. Однако и этот выдающийся документ строительной науки оставляет открытыми такие важные вопросы, как расчеты оболочек с отрицательной гауссовой кривизной и оболочек с предварительно натянутой арматурой. Дает он лишь некоторые предварительные данные и по такой важной проблеме, как оценка разрушающего состояния оболочки. Следует отметить, что высказанные замечания ни в коем случае не умаляют значения работы составителей инструкции, а только показывают, что в деле исследования железобетонных оболочек предстоит еще большой труд.

Расчет железобетонных оболочек имеет ряд особенностей по сравнению, например, с металлическими оболочками.

1. В случае последних, как правило, вследствие сверхгибкости оболочки возникает проблема устойчивости, почти не имеющая места при железобетонных оболочках. В Эстонской ССР в течение 15 лет проведены испытания около 40 моделей железобетонных оболочек и ни разу не отмечалось явлений выпучивания. Необходимо отметить, что инструкция [1] требует при расчете очень пологих оболочек двойкой кривизны исходить из деформированной срединной поверхности (если  $f : \delta < 6$  — довольно редкий случай), т. е. учитывать возможность потери устойчивости оболочки. Кроме того, формулы, приведенные в [1], редко дают ощутимые результаты для других видов оболочек. Хотя в последнее время толщина сборных оболочек уменьшается (до 3—4 см), элементы, как правило, обрамляются ребрами, вследствие чего приведенная толщина значительно возрастает. Таким образом разрушение железобетонной оболочки является фактически разрушением по прочности, а не вследствие потери устойчивости (выпучивания). Отсюда вытекает, что первоочередной задачей при расчете железобетонных оболочек является нахождение разрушающей нагрузки по прочности, исходя из какой-либо разрушающей картины (полученной, например, при помощи экспериментов на моделях).

2. Вторым важным отличием является необходимость учитывать влияние трещин в железобетоне. Зачастую арматура не укладывается в некоторые растянутые направления оболочки либо в целях уменьшения расхода стали (например, часто допускается возникновение трещин в цилиндрических оболочках от низа бортового элемента, т. е. от арматуры-стрингера, почти до гребня оболочки), либо исходя из конструктивных соображений (например, при отказе от учета восприятия крутящих моментов в криволинейной части оболочки). Очевидно, что в теории железобетонных оболочек необходимо иметь в виду два вида трещин: во-первых, такие, которые пересекаются расчетной арматурой, и, во-вторых, такие, которые пересекает только конструктивная арматура. В первом случае все же иногда применима обыкновенная теория оболочек, но во втором случае распределение усилий искажается до неузнаваемости.

3. Третьей особенностью является вопрос краевых элементов. Железобетонные оболочки обычно обрамляются более или менее мощными краевыми элементами (бортовой элемент, стрингер, диафрагма и т. д.). Последние, будучи подвергнуты сдвигающим усилиям оболочки, нередко накапливают значительно больше потенциальной энергии внутренних сил, чем вся остальная конструкция. Поэтому расчет оболочки с допущением, что последняя имеет идеализированные краевые условия (в силах или в перемещениях), приводит при реальных краевых элементах к значительному искажению распределения усилий как в самой оболочке, так и в краевом элементе. Разумеется, в таком случае нет смысла исследовать простой краевой эффект. Так как возникающая сложная контактная задача (оболочка и краевой элемент) в общем еще не решена, то иногда представляется уместным находить усилия в краевом элементе с большей точностью (т. е. при определении нагрузки краевого элемента — сдвигающих усилий оболочки — учитывать также минимум потенциальной энергии в самом краевом элементе), допуская в то же время некоторые неточности при вычислении усилий в оболочке. Обычный путь, т. е. определение нагрузки краевого элемента при помощи идеализированных, нереальных краевых условий оболочки, нередко приводит к значительной переоценке усилий в краевых элементах.

В связи с краевыми элементами железобетонных оболочек необходимо еще отметить, что вряд ли возможно предполагать защемленность оболочек в краевых элементах, так как краевые моменты защемления (крутящая нагрузка краевого элемента) обуславливали бы в краевом элементе значительные крутящие моменты, восприятие которых, как правило, не обеспечено.

4. В качестве четвертой особенности железобетонных оболочек следует назвать то, что они часто имеют в известных направлениях поле усилий, созданное предварительно натянутой арматурой, противодействующее усилиям, обусловленным внешней нагрузкой. В связи с этим возникает ряд сложных проблем как статика, так и более принципиального характера.

Учитывая, что теория железобетонных оболочек имеет еще ряд не отмеченных здесь особенностей, становится ясным, что она должна идти своим особым путем во многих вопросах. Необходимо отметить, что названные, а также неназванные особенности иногда упрощают, а зачастую и усложняют расчет оболочек. Однако, без учета их влияния (т. е. при ведении расчета по обыкновенной теории оболочек), нередко получается значительно искаженное распределение усилий. Чаще всего при этом совершается ошибка в пользу запаса, и конструкция назначается с излишней прочностью, особенно в части краевых элементов.

Ниже даем краткий обзор исследований цилиндрических оболочек положительной и отрицательной кривизны, проведенных в Таллине начиная с 1947 г.

### Исследование цилиндрических оболочек

Для расчета железобетонных цилиндрических оболочек в Таллинском политехническом институте разработан инженерный метод расчета — так наз. метод аппроксимации сдвигающих сил [2, 3, 16]. Приращение сдвигающих сил вдоль образующей цилиндра (в направлении оси  $x$ )  $\xi = \frac{\partial S}{\partial x}$  аппроксимируется здесь при помощи степенного и тригонометрического рядов в криволинейной части, а также в бортовых элементах. Ряд содержит от 3 до 6 постоянных коэффициентов — параметров  $a_r$ , которые связаны между собой некоторыми условиями равновесия и совместности деформаций. При помощи последних можно исключить ряд зависимых параметров и для определения остальных, так наз. независимых параметров (числом от 1 до 3), применяются условия минимума потенциальной энергии внутренних сил по методу Кастильяно-Ритца. При разработке расчетной схемы:

а) использовалась так наз. полубезмоментная теория. Продольные изгибающие моменты  $m_l$  малы в сравнении с поперечными изгибающими моментами; крутящие

моменты  $m_{12}$ , как правило, имеют в углах оболочки величину порядка  $m_2$ , но, как уже сказано выше, восприятие их в железобетонных оболочках не обеспечено;

б) предполагалось, что приращение сдвигающих сил  $\xi = \frac{\partial S}{\partial x}$  изменяется в продольном направлении оболочки аффинно нагрузке. Как правило, в случае цилиндрических оболочек решающей схемой нагрузки является максимальная постоянная нагрузка вдоль образующей. Таким образом и  $\xi$  является постоянной в продольном направлении.

В соответствии с предположением б) можно в середине оболочки, после определения параметров в ряду  $\xi$ , найти максимальные продольные силы по формуле

$$\max T_1 = \frac{L^2}{8} \frac{\partial \xi}{\partial s}, \quad (1)$$

где  $s$  — поперечная координата,  $L$  — продольный пролет оболочки.

Максимальные сдвигающие силы у диафрагмы

$$\max S = -\frac{L}{2} \xi. \quad (2)$$

В соответствии с принятыми предпосылками поперечные изгибающие моменты  $m_2$  также постоянны вдоль оболочки, так как вызывающие их изменения крутящие моменты  $m_{12} \approx 0$ .

Для упрощения вычисления  $m_2$  и интегралов типа  $\int m_i m_k ds$  разработан обширный табличный материал [8, 16].

При помощи изложенного метода решен ряд важных практических задач круговых цилиндрических оболочек и призматических складок. Кроме задач круговой оболочки с бортовыми элементами, нагруженной симметрично [8] и кососимметрично [3], решены еще следующие задачи.

1. Оболочка с подпертыми продольными краями [5]; здесь бортовые элементы можно часто рассматривать в расчете в виде растянутых стрингеров [4]. Необходимо отметить, что в случае висячего продольного края даже при незначительной высоте  $b_0$  бортового элемента последний следует рассматривать в расчетах в виде грани.

2. Оболочка с поперечными трещинами [6]; на протяжении всей трещины  $T_1 = 0$  и в соответствии с (1),  $\xi$  постоянно и в поперечном направлении. Анализ результатов решения рассматриваемой задачи показывает, что при обычном расположении арматуры (расчетная продольная арматура находится в бортовом элементе) нагружение одиночной оболочки в районе ее гребня может вызвать аварию. Однако значительную экономию арматуры дает расчет с учетом поперечной трещины в случае внутренних панелей — оболочек покрытий [1, 16].

3. Разные типы складчатых конструкций, применяемых в виде покрытий, объемистых бункеров и т. д. [9], где можно предполагать, что в пределе одной грани продольные напряжения распределяются линейно в поперечном направлении.

4. Разные задачи кручения усиленных стрингерами складчатых призматических оболочек замкнутого сечения изучены Э. Соонурмом.

Был рассмотрен тонкостенный стержень, на который действует нагрузка, приложенная перпендикулярно оси стержня и равномерно распределенная в продольном направлении. При помощи метода аппроксимации сдвигающих сил получено распределение усилий складчатой оболочки с шарнирно опертыми диафрагмами [27]. Далее для каждой грани складчатой оболочки была применена гипотеза о линейном распределении нормальных напряжений и методика расчета распространена и на многозамкнутые сечения [28]. В случае складчатой оболочки, имеющей в поперечном сечении изменяющийся замкнутый прямоугольный контур с двумя осями симметрии, при помощи вариационного управления Эйлера получены решения для любой поперечной на-

грузки и любых условий закрепления концов складчатой системы. Для четырех важных комбинаций составлены номограммы, значительно упрощающие вычисления усилий [29].

5. Цилиндрические оболочки с предварительно натянутой арматурой [7]. Оказывается, что уложенная в краевые элементы натянутая арматура не в состоянии значительно облегчить восприятие поперечных изгибающих моментов  $m_2$  и сдвигающих сил  $S$  в криволинейной части оболочки. Варианты с натянутой арматурой в криволинейной части легко поддаются расчету, но вопросы их возведения решены еще не полностью.

Этой же проблемой занимался А. Сумбак [13–15], который после проведения испытаний серии моделей приспособил метод расчета цилиндрических оболочек В. В. Новожилова для расчета оболочек с предварительно натянутой арматурой. Был разработан обширный табличный материал для упрощения расчета. А. Сумбак установил, что при эксплуатационных нагрузках, вследствие отсутствия трещин в бортовых элементах, жесткость последних относительно кручения и горизонтального изгиба значительно возрастает. Таким образом, одиночные цилиндрические оболочки из напряженного бетона имеют на продольных краях дополнительные геометрические связи по сравнению с железобетонными оболочками. Разумеется, что в стадии разрушения названное преимущество отпадает. Кроме названных задач, в Таллине занимались еще рядом важных вопросов цилиндрических оболочек. Так, У. Нигул [11, 12] исследовал экспериментальным путем, а также теоретически напряженное состояние круговых цилиндрических оболочек при учете деформаций сравнительно гибких рамных диафрагм. В связи с этим им была разработана методика расчета открытых круговых цилиндрических оболочек в поперечных тригонометрических рядах. Было установлено, что в некоторых случаях возмущения в распределении усилий, вызванные деформациями диафрагмы, распространяются на значительное расстояние от последней. У. Нигул впервые при экспериментальном исследовании моделей использовал систему зеркал для измерения поворота касательных поперечного сечения оболочки и разработал соответствующую теорию.

В. Отсмаа провел испытания большой серии моделей с целью исследования сопротивления поперечной силе цилиндрической оболочки как «большой балки». Было установлено, что после появления наклонной трещины происходит существенное перераспределение усилий (особенно в районе диафрагмы — в так наз. критическом блоке) по сравнению с упругой стадией работы оболочки. Выяснилось, что в предельном состоянии схема расчета железобетонных балок по поперечной силе принципиально применима и для цилиндрических оболочек. При этом схема расчета [1], не учитывающая наличия поперечной силы  $Q_6$ , воспринимаемой бетоном, неправильно отражает действительность, так как существование  $Q_6$  установлено позднее экспериментами В. А. Отсмаа. Для отдельных случаев сделана попытка составить формулы для определения величины  $Q_6$  [23, 24].

Некоторые вопросы проектирования и возведения железобетонных оболочек освещает в своих трудах Ю. Тярно [25, 26].

### Исследование оболочек положительной гауссовой кривизны

Исследование работы сферических куполов [10] показало, что при обычной конструкции, т. е. когда главная часть кольцевой арматуры расположена в опорном кольце, меридиальные трещины, пересекающие опорное кольцо, простираются в определенных случаях довольно далеко от края оболочки и обуславливают значительные меридиальные изгибающие моменты. Вследствие этого краевой эффект перестает быть локальным. На этой основе пришли к заключению, что арматуру в опорном кольце купола необходимо предварительно натягивать. Тогда оказывается возможным избежать подавляющую часть краевого эффекта, а также изгибающие моменты в опорном кольце.

Весьма тщательный эксперимент модели сборной пологой оболочки двойкой кривизны с предварительно натянутой арматурой провел в Академии наук ЭССР А. Немвальц [30]. Эксперимент показал хорошую грузоподъемность таких оболочек, при чем выяснились следующие интересные факты.

Можно полагать, что существует возможность определяющие грузоподъемность районы — углы — предварительно напрягать для восприятия главных растягивающих напряжений, укладывая натянутую арматуру по внешней поверхности оболочки, а не по срединной поверхности, как это в общем принято. В рассматриваемом эксперименте, где натянутая арматура проведена по внешней поверхности (важное технологическое упрощение), углы оболочки вследствие перераспределения усилий оказались практически центрально сжатыми.

В дальнейшем, по-видимому, не является существенным проводить расчет таких оболочек по моментной или безмоментной теориям, а важнее учитывать работу краевых элементов.

Этот факт имеет особое значение при одностороннем напряжении оболочки. В таком случае сдвигающие силы, найденные по безмоментной теории, обуславливают в краевых элементах изгибающие моменты, примерно в два раза превышающие измеренные экспериментально. Отсюда вытекает, что работа самого краевого элемента влияет на передаваемую ему оболочкой нагрузку в благоприятном для него направлении. Соответствующая упрощенная расчетная схема предложена А. Немвальцем и автором [16]. Согласно этой схеме распределение сдвигающих сил между оболочкой и краевым элементом определяется при помощи условия минимума потенциальной энергии внутренних сил только в краевом элементе. Таким образом получаются требуемые величины как для расчета краевых элементов — диафрагм, так и для расчета главных растягивающих напряжений в углах. Остальная арматура, как правило, назначается конструктивно.

### Исследование оболочек отрицательной гауссовой кривизны

В последние годы в Таллинском политехническом институте проводились исследования разного вида оболочек с отрицательной гауссовой кривизной: гиперболических параболоидов, коноидальных оболочек, сводов, оболочек типа однополосного гиперблойда.

Для покрытия одноэтажных складских и промышленных зданий прямоугольного планового очертания в некоторых случаях применяют коноидальные железобетонные оболочки, так как серпообразное окно на покрытии позволяет равномерно распределить естественное освещение по ширине всего помещения. Обычно панель — оболочка покрытия окаймляется в торцах двумя пологими двухшарнирными арочными диафрагмами с затяжкой. Поверхность оболочки образуется движением образующей прямой параллельно краю по диафрагмам — направляющим. Получаемая линейная коноидальная поверхность может быть использована при конструировании оболочки, которая имеет сравнительно маленькие бортовые элементы; в случае однопролетных зданий прямые края часто оперты. Обычно пролеты в плоскости диафрагмы больше продольных пролетов. Такие оболочки-покрытия рассчитываются, в общем, согласно безмоментной теории, возникающие при этом дифференциальные уравнения, как правило, решаются применением методов конечных разностей. В результате решения получают в направлении образующих продольные силы  $T_1$ , в поперечном направлении — продольные нормальные силы  $T_2$  и сдвигающие силы  $S$ . Однако при помощи изложенного решения невозможно удовлетворить граничные условия. Главный недостаток метода состоит в том, что  $T_1$  можно приравнять к нулю лишь у одной диафрагмы, так как вторая должна воспринимать значительные нагрузки перпендикулярно своей плоскости, к чему она явно не способна. Следовательно, безмоментная теория не в состоянии описать хотя бы приблизительно распределение внут-

ренных сил в этой конструкции, моментная же теория до сих пор не дала численных результатов.

Экспериментальные исследования на моделях, проведенные А. Н. Лавровым [13], показывают, что работа такой конструкции в основных своих чертах напоминает работу цилиндрических оболочек. При сравнительно малой нагрузке в четвертях пролета низкой диафрагмы систематически наблюдались вертикальные трещины, которые при дальнейшем нагружении не расширялись и не определяли несущую способность конструкции. Создается впечатление, что оболочка вначале пытается работать согласно безмоментной теории и позже, когда диафрагма не в состоянии воспринять нагрузку  $T_1 \neq 0$ , переходит к работе, соответствующей моментной теории, так что  $T_1$  у диафрагмы равно нулю. Разработана схема расчета пологих коноидальных оболочек на основе метода аппроксимации сдвигающих сил [20]. При этом рассматривалась поперечная полоска в середине оболочки, предполагая, что  $\frac{\partial T_1}{\partial x} = 0$ . Применяя полубезмоментную теорию, поперечные изгибающие моменты  $m_2$  можно вычислять так же, как при цилиндрических оболочках. Кроме того установлена целесообразная аппроксимация  $\xi$ -диаграммы. Трудной проблемой является восприятие главных растягивающих сил в углах оболочки у низкой диафрагмы, где обычно решается несущая способность всей оболочки.

Применение оболочек со срединной поверхностью по гиперболическому параболоиду, приспособленных для покрытия зданий прямоугольного планового очертания и обрамленных со всех сторон прямыми краевыми элементами, в последние годы значительно возросло. Следует отметить, что в ближайшие годы и в Таллине ряд общественных зданий будет покрыт такими оболочками. В Таллинском политехническом институте экспериментальным исследованием гиперболических параболоидов на моделях занимались М. Лейбур, В. Хюкси и М. Вайк.

Как известно, расчет таких оболочек обычно ведется по безмоментной теории. При этом возникает краевой эффект, так как краевой элемент имеет значительные сжимающие, а соседние волокна оболочки — нулевые напряжения. Эта контактная задача в общем еще не решена, если не считать некоторые попытки с использованием метода конечных разностей. Дан инженерный макростатический метод [17] расчета оболочек, очерченных по гиперболическому параболоиду, в котором учтены результаты экспериментов на моделях [18]. При этом оболочка рассматривается в направлении диагонали, соединяющей нижерасположенные опорные точки, как «большая арка» с изменяющимся поперечным сечением, а по другой диагонали конструкция работает практически консолями, так как вышележащие опоры почти не воспринимают нагрузку. Оказывается, что арматуру для восприятия макростатических консольных моментов (или, по безмоментной теории, — главных растягивающих усилий) можно укладывать без значительного перерасхода стали в направлениях, параллельных краям, т. е. в направлении образующих поверхности. Необходимо отметить, что в направлении больших консолей искажение усилий происходит значительно сильнее, чем в случае безмоментной теории, что обусловлено возникновением трещин в направлении большой арки уже в сравнительно ранней стадии нагружения. Указанные трещины возникают в большом количестве, вследствие чего они сильно не открываются. Далее из экспериментов выяснилось, что почти вся поверхность оболочки подвергается положительным изгибающим моментам, кроме узких зон у краев, где отмечались отрицательные изгибающие моменты. Возникающие при этом изгибающие моменты в направлении растянутой диагонали оказывались такими, что они в состоянии сдвигать главные диагональные, растягивающие силы из срединной поверхности вниз на уровень арматуры. Таким образом оказывается, что в большей части поверхности рабочее поперечное сечение (арматура) после возникновения трещин является центральным растянутым. Наконец, при помощи экспериментов установлено, что краевые элементы не подвергаются значительным изгибающим моментам, однако в районах вышележащих опор имеют место некоторые растягивающие усилия.

Продолжается уточнение расчетных методов, а также исследование гиперболических параболоидов с предварительно натянутой арматурой и выяснение влияния ползучести при длительных нагрузках на распределение усилий.

М. Лойтве исследовала экспериментально работу бочарных сводов со срединной поверхностью по однополосному гиперboloиду на моделях [21] и дала инженерный метод расчета таких оболочек [22]. В продольном направлении ( $L$ ) конструкция работает как двухшарнирная круглая арка с затяжкой; поперечное сечение арки представляет гиперболу шириной  $l \ll L$ . Расчет такой оболочки ведется либо по безмоментной теории (без учета работы краевых элементов), либо в соответствии с сопротивлением материалов (без учета работы поперечных моментов  $m_2$ ). При одностороннем нагружении (на протяжении  $L/2$ ) одиночного свода-оболочки можно при помощи сопротивления материалов определить сначала перенаправляющие силы  $T_1 : R$  и приращения сдвигающих сил  $\xi$ , а затем, с учетом внешней нагрузки, найти в поперечной полоске изгибающие моменты, т. е.  $m_2$ . Оказывается, что в нагруженной половине оболочки  $m_2$  положительные, независимо от того, расположена ли нагрузка в поперечном сечении вдоль оси арки, или по краям. Далее, если  $L : l < 10$ , то величины  $m_2$  нередко оказываются значительными, и оболочку в поперечном направлении трудно конструировать.

Попытка улучшить распределение усилий согласно условию минимума потенциальной энергии при помощи метода аппроксимации сдвигающих сил показала, что поперечные изгибающие моменты  $m_2$  в данном случае не подвергаются такому кардинальному уменьшению, как, например, в случае цилиндрических оболочек. Этот факт нашел подтверждение также при экспериментах на моделях, где в сравнительно ранней стадии нагружения обнаружили трещины в направлении оси арки. Очевидно, что при таких оболочках необходимо предусматривать дополнительные горизонтальные связи краев.

### Заключение

В изложенном кратком обзоре представлены некоторые результаты исследования железобетонных оболочек, полученные в Эстонской ССР начиная с 1947 г.; при этом необходимо подчеркнуть плодотворность содружества с учеными братских республик. Отметим, что в рассматриваемой отрасли науки ведутся интенсивные исследования как в СССР, так и за рубежом. Однако, как вытекает из вышесказанного, ряд важных вопросов еще ожидают своего решения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по проектированию железобетонных пространственных покрытий и перекрытий, НИИЖБ и ЦНИИСК, М., 1961.
2. Лаул Х. Х., Применение метода Кастильяно-Ритца к расчету длинных цилиндрических оболочек, Труды Таллинского политехнического института, Серия А\*, № 33 (1949).
3. Лаул Х. Х., Расчет длинных цилиндрических оболочек при антисимметричной нагрузке по методу Кастильяно-Ритца, Тр. ТПИ, А, № 35 (1950).
4. Лаул Х. Х., Расчет цилиндрических оболочек со стрингерами, Тр. ТПИ, А, № 39 (1952).
5. Лаул Х. Х., Расчет цилиндрических оболочек с опертыми бортовыми элементами, Тр. ТПИ, А, № 39 (1952).
6. Лаул Х. Х., Цилиндрические железобетонные оболочки с трещинами в растянутой зоне, Тр. ТПИ, А, № 45 (1953).
7. Лаул Х. Х., Цилиндрические железобетонные оболочки с предварительно напряженной арматурой, Тр. ТПИ, А, № 45 (1953).
8. Лаул Х. Х., Расчет цилиндрических оболочек с криволинейными частями, очерченными по окружности, Тр. ТПИ, А, № 50 (1953).
9. Лаул Х. Х., Расчет призматических складок, Тр. ТПИ, А, № 56 (1954).

\* В дальнейшем сокращенно — Тр. ТПИ, А.

10. Лаул Х. Х., О расчете шаровых железобетонных куполов, Тр. ТПИ, А, № 63 (1956).
11. Лаул Х. Х. и Нигул У. К., Экспериментальное исследование цилиндрических железобетонных оболочек, Тр. ТПИ, А, № 82 (1956).
12. Нигул У. К., О расчете открытых круговых цилиндрических оболочек в поперечных тригонометрических рядах, Тр. ТПИ, А, № 82 (1956).
13. Сумбак А., Расчет предварительно напряженных цилиндрических железобетонных оболочек, Тр. ТПИ, А, № 159 (1959).
14. Сумбак А., Расчет предварительно напряженных цилиндрических железобетонных оболочек с учетом жесткостей кручения и горизонтального изгиба бортовых элементов, Тр. ТПИ, А, № 161 (1959).
15. Сумбак А., Расчет предварительно напряженных оболочек с предварительно напряженными стрингерами, Тр. ТПИ, А, № 200 (1963).
16. Laul H. H., Raubbetoon II, Tallinn, 1962.
17. Лаул Х. Х. и Лейбур М. Х., Практический метод расчета квадратичных в плане железобетонных оболочек вида гиперболического параболоида, Тр. ТПИ, А, № 200 (1963).
18. Лейбур М. Х., Экспериментальное исследование квадратичных в плане железобетонных оболочек вида гиперболического параболоида, Тр. ТПИ, А, № 200 (1963).
19. Лавров А. И., Экспериментальное исследование параболических коноидальных оболочек, Тр. ТПИ, А, № 218 (1965).
20. Лаул Х. Х. и Лавров А. И., О расчете коноидальных железобетонных оболочек, Тр. ТПИ, А, № 218 (1965).
21. Лойтве М. А., Экспериментальное исследование железобетонных сводов-оболочек, Тр. ТПИ, А, № 218 (1965).
22. Лаул Х. Х. и Лойтве М. А., Практический метод расчета пологих железобетонных сводов-оболочек отрицательной кривизны, Тр. ТПИ, А, № 218 (1965).
23. Отсмаа В. А., Экспериментальное исследование предельного состояния железобетонных цилиндрических оболочек, Тр. ТПИ, А, № 202 (1963).
24. Отсмаа В. А., К расчету на поперечную силу длинных кругоцилиндрических железобетонных оболочек, Тр. ТПИ, А, № 218 (1965).
25. Тярно Ю. А., О проектировании оболочек Нарвской мебельной фабрики, Тр. ТПИ, А, № 218 (1965).
26. Тярно Ю. А., Опыт строительства оболочек Нарвской мебельной фабрики, Тр. ТПИ, А, № 218 (1965).
27. Соонурм Э. Ю., Стесненное кручение тонкостенных конструкций с замкнутым контуром, Тр. ТПИ, А, № 65 (1965).
28. Соонурм Э. Ю., Расчет тонкостенных стержней многозамкнутого сечения на кручение, Тр. ТПИ, А, № 171 (1960).
29. Соонурм Э. Ю., Расчет тонкостенных стержней замкнутого сечения на кручение, Тр. ТПИ, А, № 200 (1963).
30. Nemvalts A. S., Monteeritavad pingebetoonist positiivse kõverusega võlvkoorikud suurte ruumide sildekonstruktsioonidena, Ehitus ja ehitusmaterjalid, nr. 3/4, 1961.

Таллинский политехнический институт

Поступила в редакцию  
23/III 1965

H. LAUL

## RAUBBETOONKOORIKUTE UURIMINE EESTI NSV-S

Artiklis antakse ülevaade nii teoreetilisest kui ka eksperimentaalsest raubbetoonkoorikute uurimisest Eestis.

Töö esimeses osas tutvustatakse raubbetoonkoorikute ja elastsete koorikute arvutamise peamisi erinevusi.

Teises osas esitatakse silindriliste koorikute uurimise tulemused. Kirjeldatakse üht tehnilist arvutusmeetodit (aproksimatsioonimeetodit) ja esitatakse tulemusi pragudega koorikute ning eelpingestatud koorikute kohta.

Kolmandas osas tuuakse andmeid positiivse kõverusega koorikute uurimisest.

Neljasa osa käsitleb negatiivse kõverusega koorikuid, nagu konohoidseid pindu ja hüperboolseid paraboloide.

Käsitletud uurimustes on teoreetilised kaalutlused seostatud laialdase mudelite katsetamisega. Katsetulemuste põhjal loodi mõnede koorikutüüpide jaoks arvutusmeetod.

H. LAULA

### RESEARCH ON REINFORCED CONCRETE SHELLS IN THE ESTONIAN S.S.R.

A survey of the research on reinforced concrete shells carried out in the Estonian S.S.R. is given. Both the theoretical and experimental aspects of the subject are treated.

In the first part the main differences of reinforced concrete shells computation problems from those in the theory of elastic shells are shown.

In the second part the results of investigations on cylindrical shells are presented. A technical computation method (an approximation method) is described in brief and some results for cracked and prestressed shells are given.

In the third part some results for shells having positive curvature are presented.

The fourth part is devoted to shells with a negative curvature, such as conoids, hyperbolic paraboloids, etc.

In the investigations described, model testing has been widely used alongside with theoretical considerations. For some types of shells the approximate computation methods have been built up with the application of experimental results.