

Николай Мурашко
Брестский инженерно-
строительный институт
Юрий Соболев, Светлана Ращепкина
Московский инженерно-
строительный институт
Веслав Нурек, Веслава Банахевич
Льблинский политехнический
институт

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТОНКОСТЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИЛОСОВ

I. Общая часть

Металлические цилиндрические силосы находят все более широкое применение во всех передовых странах, в том числе в СССР и ПНР. Металлические силосы по конструктивным особенностям решения стенки можно разделить на бескаркасные, панельно-каркасные, мембранно-каркасные и спирально-навивные. Бескаркасные, в свою очередь, делятся на панельные и рулонизируемые.

Панельные силосы собираются из отдельных гладких или рулонизируемых листов на болтах или сварке. Стенки силосов, собираемых из колец, как правило имеют различную толщину листов панелей в зависимости от номера кольца по высоте сооружения. Стенка рулонизируемого силоса представляет собой цилиндрическую оболочку постоянного или переменного по высоте сечения. Рулонизируемое полотнище состоит из отдельных листов, соединенных между собой на сварке.

Из-за гладких стенок бескаркасные силосы являются наиболее простыми в изготовлении и при монтаже, хотя для увеличения жесткости к стенкам могут прикрепляться стойки из гнутых профилей.

Таким образом, основным по массе элементом (75-80% от общего расхода металла) таких силосов является их стенка. Одним из главных недостатков гладких стенок представляется их сравнительно высокая металлоемкость, вызванная малой устойчи-

востью тонкостенных цилиндрических оболочек, испытывающих воздействие сжимающих нагрузок в продольном и кольцевом направлениях соответственно от вертикального давления кровли и сыпучего заполнителя, трущегося о стенку, а также от радиального давления ветра.

В целях снижения металлоемкости рассматриваемых конструкций цилиндрические стенки подкрепляются системой ребер в кольцевом и продольных направлениях, либо по винтовой линии. Вертикальные ребра (стрингера) могут встречаться с кольцевыми ребрами (шпангоутами), располагаясь при этом с произвольным, обычно регулярным шагом. Ребра могут находиться как снаружи, так и внутри оболочки и иметь различное поперечное сечение (прямоугольное, угловое или зетовое). При этом ребра могут прикрепляться к стенке с помощью сварки, пайки, болтов или образовываться путем вальцовки или дутья*. Большое разнообразие конструктивных решений стенок металлических силосов с ребрами свидетельствует об отсутствии в настоящее время четких нормативных указаний по вопросу оптимального проектирования таких стенок в виде ортотропных цилиндрических оболочек. Анализ 55 патентов разных стран (Польша, СССР, Франция, Великобритания, Австрия, Швейцария и ФРГ), зарегистрированных с 1965 года, показал в то же время явную недостаточность конструктивных работ тонкостенных металлических силосов с усилением стенок ребрами.

В Советском Союзе признано целесообразным массовое строительство спирально-навивных силосов из стальных или алюминиевых лент толщиной 2-4 мм и шириной 495 мм, непрерывно навиваемой по спирали и соединяемой по винтовой линии с образованием фальцевых ребер высотой около 40 мм. В результате из-за малого уклона (около 1°) фальцевые ребра могут рассматриваться в качестве кольцевых ребер слоистой структуры с весьма малым шагом - порядка 360-370 мм. Специфика конструктивного решения заключается в том, что указанные ребра не только повышают жесткость стенки тонкой цилиндрической оболочки (отношение толщины к радиусу оболочки $t/r < 1/1000$) на растяжение, сжатие и из-

* Изготовление и монтаж металлических силосов, подкрепленных объемными дутыми ребрами можно вести индустриальным методом

гиб в кольцевом направлении, но одновременно снижают жесткость вдоль образующей (в вертикальном направлении); малый шаг ребер вызывает возмущение безмоментного напряженного состояния с появлением существенных продольных изгибающих моментов, не имеющих характера затухания краевого эффекта. Из-за недостаточной жесткости стенки в вертикальном направлении внутри оболочки размещаются с определенным шагом вертикальные ребра, часть из которых не доводятся до верхней кромки стенки. Принципиальное конструктивное решение спирально-навивного металлического силоса и фальцевых ребер приведено на рис. 1. Таким образом, возникает вопрос, за счет чего повышается тонкостенность конструкции спирально-навивного силоса по сравнению с гладкостенным? Представляется, что за счет фальцев металлоемкость конструкции должна повыситься на 10-15% и кроме того ухудшается работа стенки при действии вертикальной нагрузки с точки зрения прочности и деформативности.

В действительности толщина стенки цилиндрической оболочки силоса определяется не из соображений прочности, а ее устойчивости главным образом от действия вертикальной сжимающей нагрузки. Поэтому эффективность конструктивного решения стенки силоса определяется тем, насколько возросло критическое напряжение стенки по сравнению с обычным инженерным решением в виде гладкой цилиндрической оболочки.

2. Оценка устойчивости стенки спирально-навивного силоса.

В нормах на проектирование стальных конструкций [1] критические напряжения осевого сжатия гладких цилиндрических оболочек определяются по формуле

$$\sigma_{кр1} = c E t / r, \quad (1)$$

где E - модуль упругости материала оболочки;

t и r - толщина и радиус стенки;

c - коэффициент, принимаемый по табл. 31 [1] или вычисляемый с достаточной степенью точности из выражения

$$c = 1,24 (t/r)^{3/8} \quad (2)$$

При этом по высоте стенки в момент потери ее устойчивости будет наблюдаться волнообразование с расстоянием между точками перегиба l_0 :

$$l_0 = \sqrt{12} \sqrt{r t} \quad (3)$$

Таким образом кольцевые ребра должны повысить критическое напряжение осевого сжатия цилиндрической оболочки благодаря двум обстоятельствам:

1. за счет уменьшения начальных погибей стенки при бандажировании оболочки кольцевыми ребрами;
2. внесением помехи в волнообразование, соответствующее минимальному значению критического напряжения, из-за заземляющего влияния ребер.

Рассматривая стенку ортотропную оболочку с приведенной толщиной в кольцевом направлении

$$t = \left(\frac{12J}{B} \right)^{1/3}, \quad (4)$$

где B - шаг фальцевых ребер;

J - момент инерции фальцевого ребра относительно вертикальной нейтральной оси, который может быть принят равным:

$$J = 0,09 B b^3 t \quad - \text{ для двойного стоячего фальца (рис. I, б);}$$

$$J = 0,13 B b^3 t \quad - \text{ для фальца с нащельником (рис. I, в);}$$

b - высота фальцевого ребра.

При этом с учетом $b = 10t$ из выражения (4) получим соответствующие значения приведенной толщины $\bar{t} = 4,7t$ и $\bar{t} = 5,1t$.

Тогда коэффициент C (2), учитывающий влияние гибкости оболочки должен быть заменен на коэффициент

$$\bar{C} = 1,24 (\bar{t}/t)^{3/8} = C (\bar{t}/t)^{3/8} \approx 1,8C \quad (5)$$

С учетом заземляющего влияния фальцевых ребер продольное критическое напряжение будет определяться из выражения [2]

$$\sigma_{\text{кр}} = \frac{D\lambda^2}{t} + \frac{E}{z^2\lambda^2} + \frac{K_0}{\lambda^2 t}, \quad (6)$$

где $D = \frac{E t^3}{12(1-\nu^2)}$; $\nu = 0,3$; $\lambda = \pi/l_0$; $K \geq 0$.

Установлено [3], что при отсутствии поворота фальцевых ребер расстояние между нулевыми моментными точками в пределах ширины ленты равно $l_0 = B/3$. Однако с учетом несовершенства конструктивной системы в запас устойчивости примем $l_0 = B/2$.

Тогда дополнительное повышение критического напряжения может быть оценено параметром

$$\beta = 6 \frac{z t}{B^2} + \frac{B^2}{24 z t}, \quad (7)$$

средняя величина которого может быть принята равной $\beta = 1,35$.

Итак, за счет фальцевых ребер устойчивость стенки спирально-навивного силоса может возрасти в $1,8 \times 1,35 = 2,4$ раза. Мож-

но показать [4], что критическое напряжение спирально-навивного силоса в кольцевом направлении возрастает в $(t/t_0)^{3/2} \approx 3,2$ раза по сравнению с гладкостенным

$$\sigma_{кр} = 0,55 \cdot E \cdot \frac{1}{H} \left(\frac{t}{t_0} \right)^{3/2} \quad (8)$$

В результате эквивалентная по устойчивости толщина стенки спирально-навивного металлического силоса может быть принята в продольном направлении в $2,4^{8/11} = 1,88$ раза, а в кольцевом - в $3,2^{2/3} = 2,16$ раза более тонкой, чем в случае гладкостенного силоса.

Практически (из-за градаций толщин листов) спирально-навивной силос может оказаться в 1,5-1,7 раза более тонкостенным, чем силос с гладкими стенками, за счет чего в целом на силос может быть снижен расход стали на 18-24%. Однако на практике заметные экономические и технологические преимущества строительства спирально-навивных силосов не находят должного воплощения из-за низкого качества изготовления конструкций.

3. Обследование металлических силосов

Натурные обследования построенных в СССР металлических силосов, возведенных методом навивки, показали, что основным дефектом в их конструкции является наличие необжатых фальцевых швов, имеющих пустоты и трещины, появившиеся в результате применения стальных лент повышенной твердости и отсутствия надлежащего контроля за работой навивочной машины. Установлено также, что коррозионная устойчивость стальных стенок силосов, особенно фальцованных швов конструкций, в настоящее время в той мере не обеспечивается. Например, натурные обследования состояния защитного лакокрасочного покрытия наружной поверхности металлического силоса элеватора в г.Клин, выполненное ЦНИИПроектстальконструкцией, показали, что к моменту осмотра, после 10 месяцев эксплуатации, в местах соединения листов лакокрасочное покрытие отслоилось и наблюдалась интенсивная коррозия основного металла [5]. Это связано с тем, что несмотря на имеющийся уклон в фальцах задерживается влага атмосферных осадков. Скорость коррозии под фазовой пленкой влаги, толщиной 1 мм составляет 0,15 мм/год. Учитывая, что толщина стенок силоса составляет не более 4 мм, то коррозия металла в местах соединения лент является особенно опасной.

Проведенные институтом ЦНИИПромзернопроект испытания фрагментов фальцевых швов и спирально-навивных силосов показали, что их стены обладают повышенной деформативностью, которая в сочетании с выявленными отклонениями формы силосов и неравномерной жесткостью фундаментов приводит к перераспределению усилий и может существенно отразиться на работе оболочки. В этих условиях внутренние вертикальные стойки силосов являются концентраторами напряжений, что может способствовать потере устойчивости листа между швами в зоне над стойками.

Низкое качество строительства опытных образцов спирально-навивного силоса не позволило до последнего времени в полной мере оценить надежность и прочностные свойства рассматриваемых сооружений листовых конструкций и организовать дальнейшее проектирование и широкое строительство металлических силосов. Тем не менее были высказаны ряд рекомендаций, важнейшими из которых являются следующие:

- в качестве материала лент следует применять стали с повышенной пластичностью, достигаемой специальными металлургическими обработками;
- целесообразно отказаться от установки вертикальных стоек в силосах, возводимых методом навивки, для чего увеличить до полутора раз толщину нижней части оболочки (4-7 мм);
- изменить конструкцию фундаментов с целью обеспечения равномерной передачи вертикальных усилий от оболочки;
- обеспечить коррозиестойкость металлических силосов, для чего наряду с использованием ленты из алюминиевых сплавов использовать защитные покрытия типа комбинированное эпоксидное с верхним фторлоновым слоем, эпоксидная эмаль ЭП-7105, металлизационные покрытия с нанесением на защищаемую поверхность (особенно тщательно в зонах швов как в построечных условиях, так и на заводе при изготовлении рулонной ленты) слоя цинка или алюминия с помощью электродуговых металлизаторов.

Важнейшей рекомендацией является повышение качества изготовления фальцевых швов. Плохо изготовленный фалец в процессе эксплуатации силоса под влиянием внутреннего давления сыпучей массы имеет тенденцию раскрываться вследствие возникновения местных пластических деформаций. Имеют место случаи, когда стенки с фальцевым стыком после года эксплуатации спирально-

навивного силоса перестали удовлетворять даже условию ее герметичности. Поэтому в последнее время плотности (герметичности) фальцевого стыка и способам его усиления уделяется особое внимание.

Одним из мероприятий по повышению плотности фальцевого стыка является введение дополнительных прутковых элементов (с небольшим предварительным напряжением), располагаемых на наружной стороне стенки и примыкающих с одной или с двух сторон фальца (возможно и внутри фальцевого стыка) [6]. Диаметр уплотняющего элемента принимается в 2-3 раза больше, чем толщина ленты, и он способен воспрепятствовать разуплотнению фальца и повысить его жесткость при угловой деформации, за счет чего уменьшается свободная длина обечайки - l_0 и тем самым возрастает устойчивость оболочки силоса. Расчеты устойчивости стенки с усиленными фальцевыми стыками показали возможность существенного улучшения работы спирально-навивного силоса в целом.

4. Экспериментальные исследования металлических силосов.

Для изучения работы фальцевого стыка и характера потери устойчивости спирально-навивного силоса в лаборатории Саратовского политехнического института были проведены модельные испытания четырех образцов, моделирующих в масштабе 1:10 крупногабаритный металлический силос высотой 18 м и диаметром 2,4 м. Модели были изготовлены из латунного листа толщиной 0,3 мм, фальцевые стыки выполнялись без усиления и с усилением навивкой проволоки вплотную с двух сторон фальца. Нагружение оболочек моделей осуществлялось приложением по торцам равномерно распределенного продольного давления, а заполнителем внутреннего пространства являлся песок.

Вертикальные и горизонтальные перемещения характерных точек оболочки замерялись с помощью индикаторов часового типа, а относительные деформации - с помощью проволочных тензодатчиков, которые располагались в середине обечайки, около фальцев и на фальцах. Измерения деформаций производились прибором ЦТМ-5.

В результате модельного испытания установлено, что усиленные фальцевые стыки имеют тенденцию к разуплотнению, в то время как усиленный фалец выполнял роль кольцевого ребра вплоть до потери устойчивости оболочки, что видно и на фото

(рис. 2 а,б). За счет этого уже в начальной стадии нагружения жесткость оболочки с усиленными фальцами по сравнению с оболочкой без усиления возросла на 20-25 %. Сопоставление результатов эксперимента по продольным деформациям оболочки спирально-навивного типа с усиленными и неусиленными фальцами приведено на графиках рис. 3 и 4 соответственно для случая пустой емкости и заполненной сыпучим материалом (песком). Как видно из графиков, влияние усиления фальцев методом навивки усиливающих элементов является существенным, позволяя принципиально решить вопрос герметичности и жесткости стыков. Несущая способность модели с усиленными фальцами по сравнению с оболочкой без усиления возросла в 1,2-1,4 раза, что согласуется с теоретическим представлением о соотношении критических нагрузок, вызывающих потерю устойчивости стенки.

Таким образом частое расположение достаточно жестких кольцевых ребер положительно сказывается на несущей способности оболочки металлического силоса, испытывающего сжатие в продольном направлении. Очевидно, что еще больший эффект следует ожидать от продольно поставленных ребер-стрингеров. При весьма редкой расстановки вертикальных ребер, когда возможность перехода к расчету ортотропной оболочки путем "размазывания" исключена, рассматриваемая задача представляет собой большие трудности для теоретического решения. Поэтому в настоящее время эту задачу пытаются решить экспериментальным путем на цилиндрических оболочках, подкрепленных ребрами. Однако поступающая информация об этих экспериментах затрагивает частные вопросы, что затрудняет разработку обобщенной методики расчета тонкостенных металлических емкостей в виде цилиндрических оболочек [7,8,9,10].

В целях ликвидации указанного пробела в Люблинском НИ была разработана многоэтапная экспериментальная программа исследований несущей способности цилиндрических оболочек с продольными ребрами, моделирующих конструкции легких силосов для сыпучих материалов, широко используемых в сельском хозяйстве ПНР. Ставилась задача по выявлению оптимального числа подкрепляющих ребер, а также влияния формы их поперечного сечения. В настоящее время испытано 42 цилиндрические модели, выполненные из латунного и стального листа разной толщины. Испытывались

как гладкие образцы, так и образцы подкрепленные продольными внутренними ребрами. Ребра, поставленные внутри и прикрепляемые к обшивке с помощью клееболтового или паяного соединения, отличаются друг от друга не только размерами, но и формой поперечного сечения. Диаметр и высота цилиндрических оболочек принимались равными соответственно 40 и 60 см, число продольных ребер принималось 6 и 8 штук. Для выявления совместной работы ребра и обшивки на одной из моделей было установлено 45 тензодатчиков (30 – на ребре и 15 – на обшивке); еще на одной из моделей были размещены 98 тензодатчиков, в том числе 14 – на ребре (расстояние между датчиками 20 мм) и 84 – на обшивке в продольном и кольцевом направлениях по осям смежных ребер и между ними на равных расстояниях 104,7 мм по дуге окружности.

Нагружение моделей осуществлялось с помощью гидравлического пресса типа П-250 в продольном направлении и давлением сыпучего материала изнутри – в радиальном направлении. При этом было предусмотрено большое разнообразие деформированного состояния моделей:

- осевое сжатие одного ребра с фрагментом обшивки;
- изгиб ребра с некоторым участком вовлекаемой в работу обшивки;
- внутреннее давление сыпучего заполнения на обшивку;
- осевое сжатие всех ребер.

С целью выявления оптимальных размеров сечения ребер жесткости было испытано 5 типов моделей общим числом в 25 образцов. Их характерным отличием было процентное отношение площади ребер (A_s) к площади поперечного сечения оболочки (A_0) – соответственно 10, 20, 30, 40 и 50 %. При осевом сжатии модели с помощью гидравлического пресса регистрировалась величина критической нагрузки в зависимости от относительной площади поперечного сечения ребер. Усредненный график этой зависимости представлен на Рис. 5.

На основе результатов выполненных экспериментальных исследований и проведенных расчетов на ЭВМ были запроектированы и построены два головных образца металлических силосов объемом 240 и 150 м³. Обшивка этих емкостей выполнена из оцинкованной листовой стали толщиной 1 мм, а пирамидальные воронки – тол-

щиной 4 мм. Обшивка подкреплена стрингерами зетобразного профиля. Соединения выполнены на болтах М8 и на клею. Поддерживающий опорный каркас силоса состоит из стоек коробчатого сечения из двух швеллеров С140. Указанные опытные образцы были подвергнуты всесторонним исследованиям, во время которых проводились замеры деформаций конструктивных элементов, обшивки, вертикальных ребер, нижнего опорного кольца и поддерживающих стоек с помощью 109 тензодатчиков и десяти механических тензосметров. Явления при этом кольцевые и продольные напряжения в обшивке представлены на рис. 6.

В результате модельных и натуральных экспериментальных исследований были сформулированы следующие выводы:

- для емкостей цилиндрической формы с соотношением размеров $\frac{D}{t} = 1-1,5$ и гибкостью стенки (обшивки) $\frac{z}{t} = 2000-3000$ оптимальным видом подкрепления оболочек являются вертикальные ребра в количестве 6-8 штук;
- площадь поперечного сечения ребер не должна превышать 30% от общей площади поперечного сечения оболочки, а их шаг - не превышать 3000 толщина листа стенки (обшивки);
- осевое сжатие на 85% воспринимается ребрами, а внутреннее давление в основном воспринимает обшивка;
- совместная работа ребер и обшивки определяется главным образом способом соединения этих элементов (при соединении сваркой и пайкой достигается максимальный эффект).

Литература

1. СНиП П-23-84*. Нормы проектирования. Стальные конструкции. М., Госстрой СССР, 1987. 24с.
2. Гольденберг Л.И. Устойчивость круговых цилиндрических оболочек силосов. Строительная механика и расчет сооружений. М., 1985, №1, с.60-64.
3. Расщепкина С.А. К расчету оболочек металлических спирально-навивных силосов. М. ВНИИТИ, деп. № 6868-1387, 1987, с.61-68.
4. Лессиг Е.Н., Лилеев А.Ф., Соколов А.Г. Листовые металлические конструкции. Стройиздат, М., 1970, 487 с.

5. Волкова Т.С. Рекомендации по защите от коррозии металлоконструкций зданий и сооружений сельскохозяйственного назначения. Заключительный отчет. № гос.регистрации 81080159, ЦНИИПСК, М., 1980, 232с.

6. Соболев Ю.З., Ращепкина С.А., Денисова А.П. Металлические силосы. Современное состояние и опыт строительства. Учебное пособие. СНИ. Саратов, 1988, 52с.

7. Амиро Н.А., Заруцкий В.А., Поляков П.С. Ребристые цилиндрические оболочки. Наукова думка, Киев, 1973.

8. Тишаев С.А. Устойчивость подкрепленных оболочек. Стройиздат, М., 1974.

9. Budiansky B. Compressive buckling of simply supported plates with transverse stiffeners. NASA T.M.X-1004, 1974.

10. Card W.F. Preliminary results of compression tests on cylinders with eccentric longitudinal stiffeners. NASA T.M.X-1004, 1974.

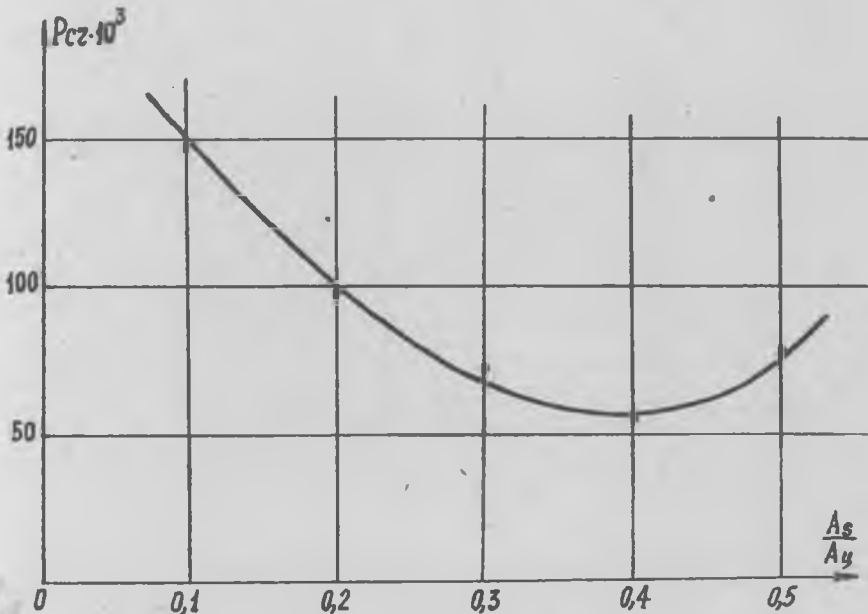


Рис. 5. График экспериментальной зависимости критической нагрузки (Н) от относительной площади ребристого сечения ребер

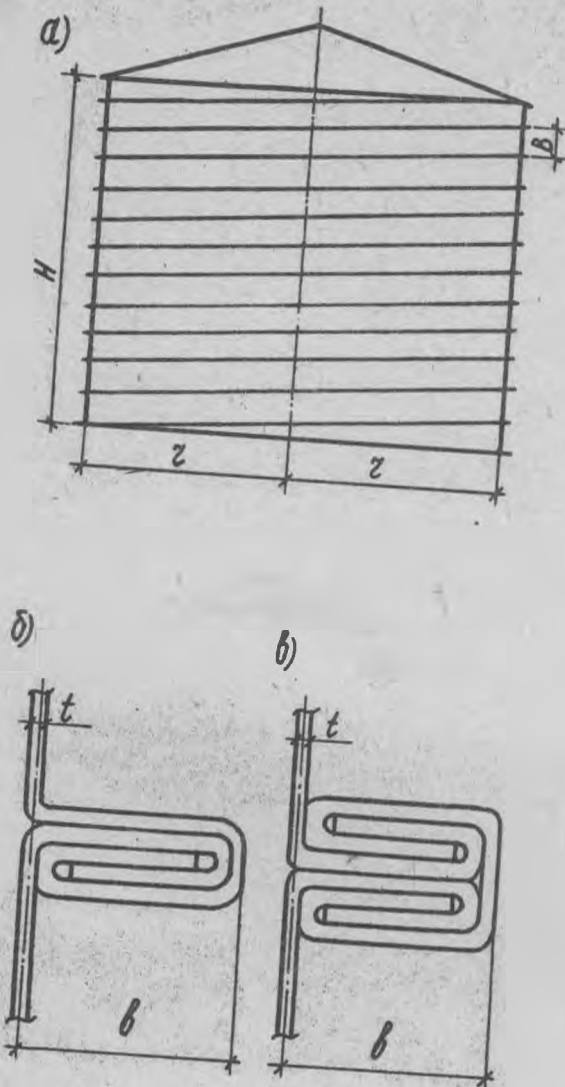


Рис. 1. Спирально-навивной силос

а)



б)



Рис. 2. Фрагменты модельных испытаний стыков силосов:
а) разуплотнение неусиленного фальцевого ребра;
б) усиленное фальцевое ребро

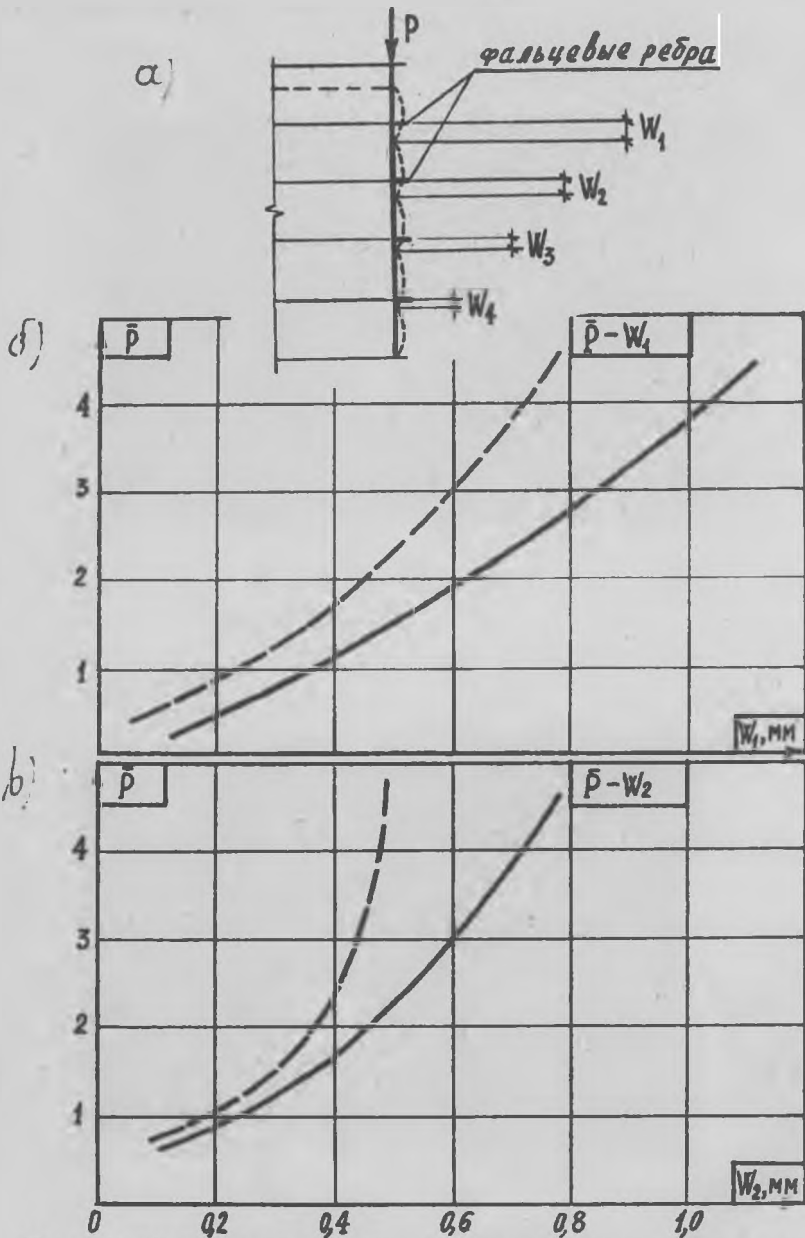


Рис. 3. Экспериментальные данные продольных деформаций незаполненной оболочки:

- при неусиленных фальцах;
- - - со специальным усилением

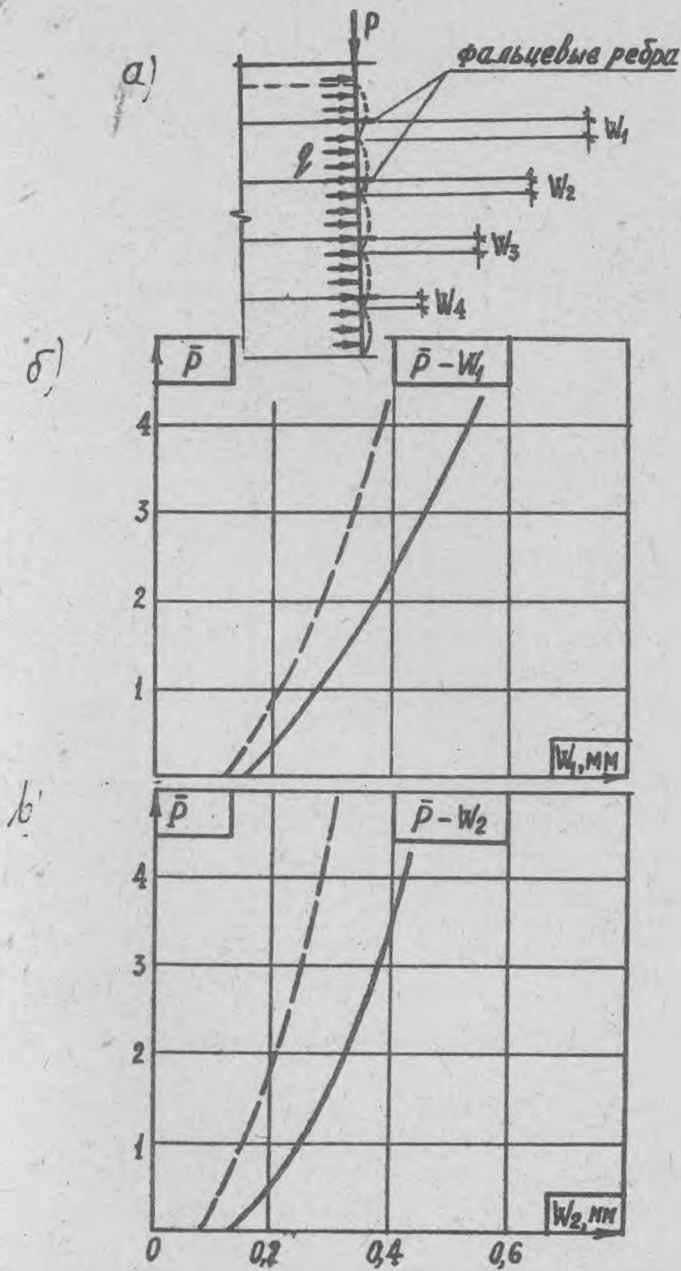


Рис. 4. Экспериментальные данные продольных деформаций оболочки, заполненной песком:

- при неусиленных фальцах;
 - - - со специальным усилением

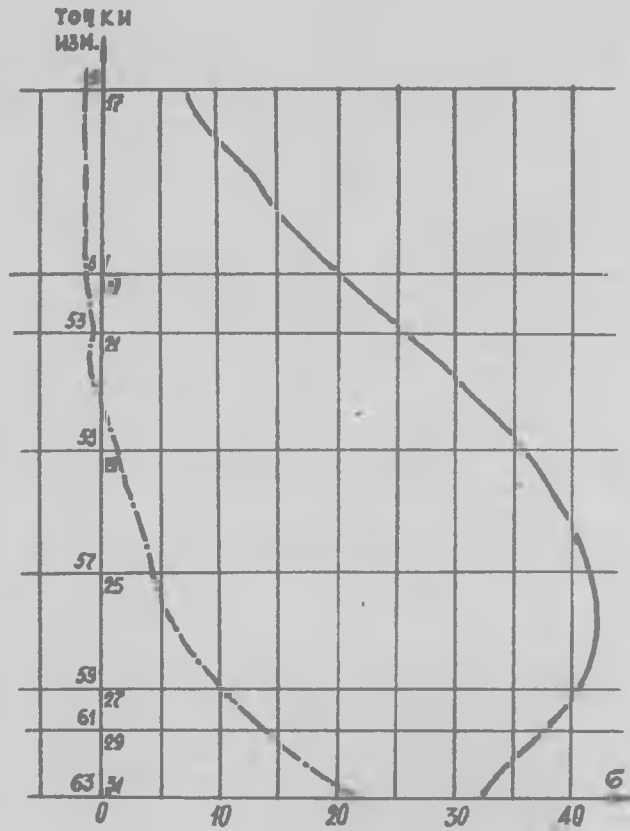


Рис. 6. Кольцевые и продольные напряжения (МПа) в обшивке оболочки:

— в кольцевом направлении;
 - - - в продольном направлении