

УДК 624.014.2

## Действительная работа тонкостенных оболочек промышленных трубопроводов на поперечную нагрузку

Любин А.Е., к.т.н.

Корпорация «Промстальконструкция», Украина

**Анотація.** Розглянуті питання дійсної роботи тонкостінних оболонок трубопроводів на поперечне навантаження. Показані особливості напружено-деформованого стану, викликаного зміною кругової форми поперечного перетину оболонки під впливом неосесиметричного навантаження. Визначені граничні умови геометричних параметрів оболонки, відповідних певному характеру її роботи. Наведені результати експериментальних досліджень оболонок реальних розмірів. Показані впливи проміжних шпангоутів на стабільність кругової форми поперечного перетину оболонки.

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы действительной работы тонкостенных оболочек трубопроводов на поперечную нагрузку. Показаны особенности напряженно-деформированного состояния, вызванного изменением круговой формы поперечного сечения оболочки под действием неосесимметричной нагрузки. Определены граничные условия геометрических параметров оболочки, соответствующих определенному характеру ее работы. Приведены результаты экспериментальных исследований оболочек реальных размеров. Показано влияние промежуточных шпангоутов на стабильность круговой формы поперечного сечения оболочки.

**Abstract.** The questions of actual work of the thin-walled shells of pipelines are considered under the transversal loading. The features of tense-deformed state are shown caused by change of circular form of cross-section of shell under influence of the non-axis-symmetrical loading. The scope terms of shell geometrical sizes are determined corresponding to certain character of pipeline work. Results of experimental researches of real size shells are cited. Influence of transverse frames on stability of circular cross-sectional shape of the shell is shown.

**Ключевые слова:** Трубопровод, оболочка, поперечные нагрузки, пространственная работа, депланации контура, дополнительные напряжения, деформации.

Оболочки промышленных трубопроводов работают, как правило, при низком внутреннем давлении и на значительные вертикальные поперечные нагрузки. Они представляют собой пространственные конструкции, оценка напряженного состояния которых достаточно сложна.

Результаты теоретических исследований в области строительной механики и теории упругости в этой области, а также полученные зависимости весьма громоздки и, как правило, справедливы лишь для идеальных схем.

Действительная работа таких оболочек при определенных параметрах не корреспондируется с представлениями, основанными на известных расчетных гипотезах и предположениях.

Основным отличием в работе тонкостенной оболочки трубопровода являются деформации контура поперечного сечения и нарушение его круговой формы, возникающие при определенных типах нагрузки и геометрических параметрах трубопровода.

Нагрузки, приложенные к оболочке трубопровода, по характеру воздействия можно разделить на два типа:

- осесимметричные нагрузки, не вызывающие деформирование кругового контура поперечного сечения;
- неосесимметричные нагрузки, вызывающие деформирование кругового контура поперечного сечения.

К симметричным относительно продольной оси можно отнести только нагрузки от внутреннего давления, собственного веса, футеровки, полного заполнения трубопровода транспортируемым продуктом или отложениями.

Именно при воздействии неосесимметричных нагрузок проявляются деформации контура поперечного сечения и нарушение его круговой формы, что приводит к существенному отличию напряженного состояния оболочки трубопровода от тонкостенной балки.

Эти явления связаны с многими факторами, в том числе, в первую очередь, с характером нагрузок и геометрическими параметрами трубопровода.

По методу, предложенному в [1], напряженное состояние оболочки представляется в виде двух состояний:

- элементарное напряженное состояние пустотелой балки, которая в данном случае является основной системой;
- дополнительное напряженное состояние, отражающее статическую неопределимость оболочки и характеризующее в сочетании с первым действительную ее работу.

При расчете на прочность от действия симметричных нагрузок, трубопроводы рассчитывают по балочной схеме, как плоскую конструкцию – балку кольцевого сечения.

Расчет оболочек трубопроводов по плоской схеме на неосесимметричные нагрузки не отвечает действительному напряженному состоянию, так как при действии на оболочку таких нагрузок теряет силу закон плоских сечений. При действии неосесимметричной нагрузки тонкие оболочки трубопроводов работают не как плоские конструкции, а как пространственные системы (оболочка с жесткими кольцами), находящиеся в условиях двухосного напряженного состояния.

На действие таких нагрузок оболочки трубопроводов рассчитывают на основе технической (полубезмоментной) теории оболочек и определяют величину дополнительных нормальных напряжений, вызванных изменением круговой формы контура поперечного сечения оболочки.

Исследование зависимости величины дополнительных нормальных напряжений от геометрических параметров оболочки позволило получить их экстремальные значения, соответствующие определенному характеру работы оболочки.

Геометрические параметры оболочки характеризовались ее относительной длиной  $\lambda = l/r$ , где,  $l$  – полуудлина оболочки,  $r$  – радиус оболочки.

Установлены граничные значения относительной длины оболочки  $\lambda$ , соответствующие ее работе, как пространственной конструкции или, как балки кольцевого сечения.

На рис. 1–5 показаны графики зависимости дополнительных нормальных продольных напряжений  $\sigma_{\text{хдоп}}$  от диаметра  $D$  оболочки для различных относительных длин оболочек в интервале  $\lambda = 4-20$ , наиболее часто применяемых при строительстве трубопроводных систем.

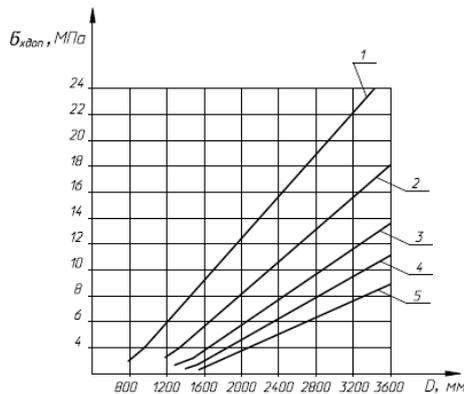


Рис. 1. График зависимости дополнительных напряжений от диаметра оболочки  $D$  при  $\lambda = 4$   
1, 2, 3, 4, 5 – толщина оболочки, соответственно  $t = 4, 6, 8, 10, 12$  мм

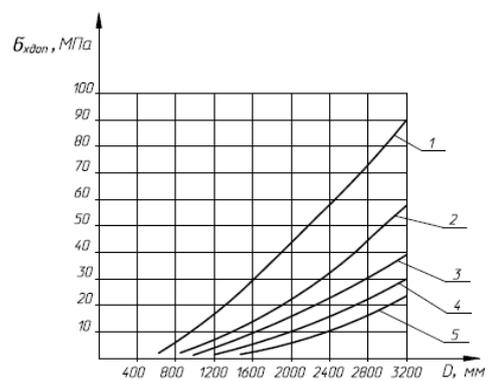


Рис. 2. График зависимости дополнительных напряжений от диаметра оболочки  $D$  при  $\lambda = 8$   
1, 2, 3, 4, 5 – толщина оболочки, соответственно  $t = 4, 6, 8, 10, 12$  мм

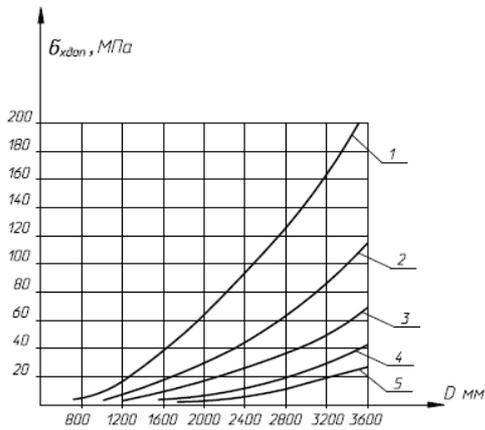


Рис. 3. График зависимости дополнительных напряжений от диаметра оболочки  $D$  при  $\lambda = 12$   
1, 2, 3, 4, 5 – толщина оболочки соответственно  $t = 4, 6, 8, 10, 12$  мм

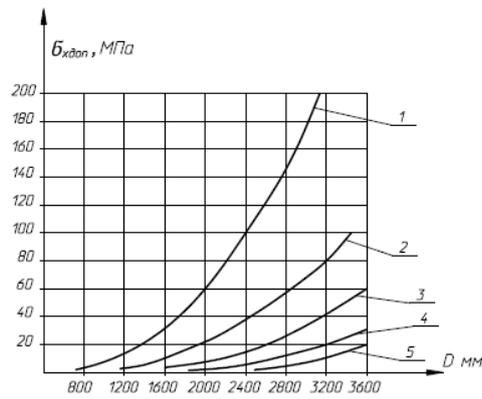


Рис. 4. График зависимости дополнительных напряжений  $\sigma_x$  от диаметра оболочки  $D$  при  $\lambda = 16$   
1, 2, 3, 4, 5 – толщина оболочки, соответственно  $t = 4, 6, 8, 10, 12$  мм

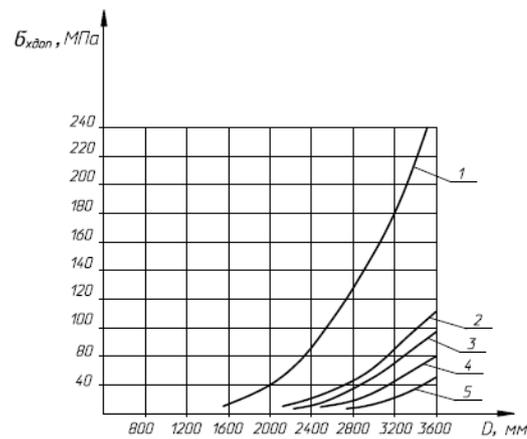


Рис. 5. График зависимости дополнительных напряжений от диаметра оболочки  $D$  при  $\lambda = 20$   
1, 2, 3, 4, 5 – толщина оболочки, соответственно  $t = 4, 6, 8, 10, 12$  мм

Как показали исследования, наибольшие дополнительные нормальные продольные напряжения  $\sigma_{хдоп}$ , вызванные изменением круговой формы поперечного сечения оболочки радиусом  $r$  и толщиной  $t$ , наступают при относительной ее длине  $\lambda = 0,82\sqrt{\frac{r}{t}}$ .

При значениях  $\lambda = 2,38\sqrt{\frac{r}{t}}$  работа таких оболочек описывается работой пустотелой балки кольцевого сечения.

Эти значения справедливы лишь для гладких оболочек, без ребер жесткости (шпангоутов), так как постановка в пролете 1–2 шпангоутов в значительной степени снижает деформирование контура поперечного сечения оболочки и приближает ее работу к балке кольцевого сечения.

Установлено также, что в гладких не подкрепленных оболочках диаметром до 2 м можно ограничиться учетом нормальных напряжений, как в балке кольцевого сечения.

Для изучения действительной работы таких оболочек и подтверждения полученных выводов были проведены экспериментальные исследования работы моделей оболочек реальной величины под действием поперечной нагрузки. Результаты этих исследований [2] позволили получить достаточно достоверную картину деформирования поперечного сечения оболочки под нагрузкой и соответствующую ей картину распределения напряжений в продольном направлении.

Экспериментальные исследования были проведены для оболочек больших диаметров, с относительной длиной  $\lambda = 10$  и  $\lambda = 20$  при соотношениях  $r/t = 125$  и различными вариантами подкрепления оболочки кольцевыми ребрами жесткости (шпангоутами).

Исследования проводились путем испытания двух базовых моделей, представляющих собой цилиндрические оболочки реальных размеров – диаметром 1000 мм со стенкой толщиной 4 мм и длиной соответственно 10 м и 20 м.

В процессе испытания на базовые модели приваривались промежуточные шпангоуты: на модель длиной 10 м – один шпангоут, на модель длиной 20 м – поэтапно два шпангоута. В местах опор оболочки укреплялись опорными шпангоутами. По торцам оболочек были предусмотрены листовые заглушки.

Схема испытанных моделей показана на рис.6, а их конструктивная форма – на рис.7.

Нагрузка создавалась внутренним заполнением водой, что практически полностью соответствует нагрузке от отложений конденсата и пыли. В табл. 1 приведены нагрузки, принятые при испытании.

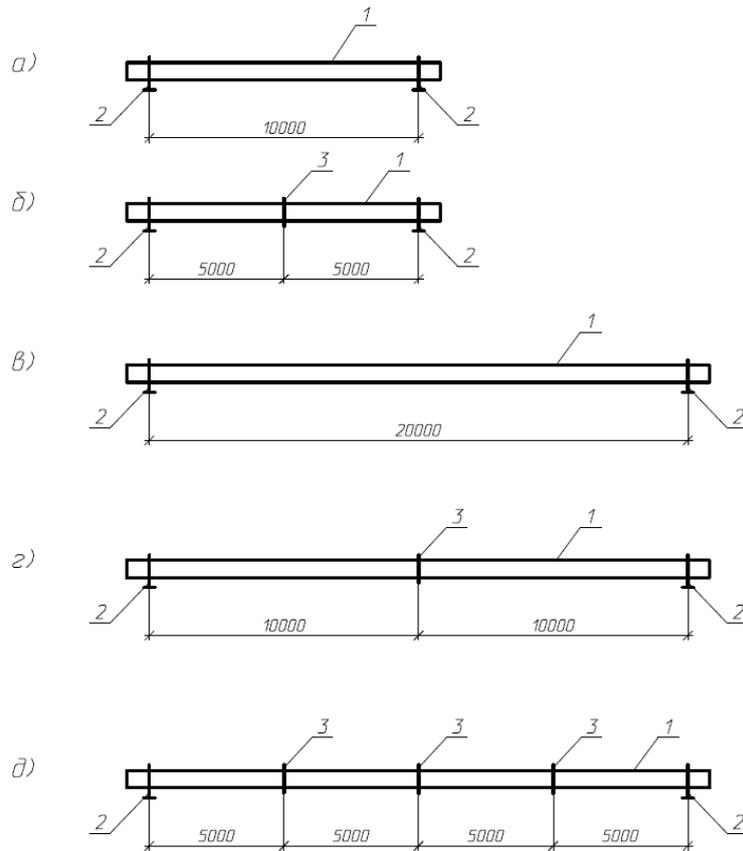


Рис. 6. Схемы испытанных моделей а, б, в, г, д:  
1 – оболочка, 2 – опорные шпангоуты, 3 – промежуточные шпангоуты

Таблица 1

Схема	Нагрузка, кН/м	$\alpha$		$\varphi^\circ$	% заполнения	H, мм
		градусы	радианы			
	1,96	113	1,98	134	25,5	302
	3,31	97	1,68	168	40	446
	3,62	89	1,56	182	60	500
	5,88	62	1,08	248	83,5	779
	7,69	0	0	360	100	1000

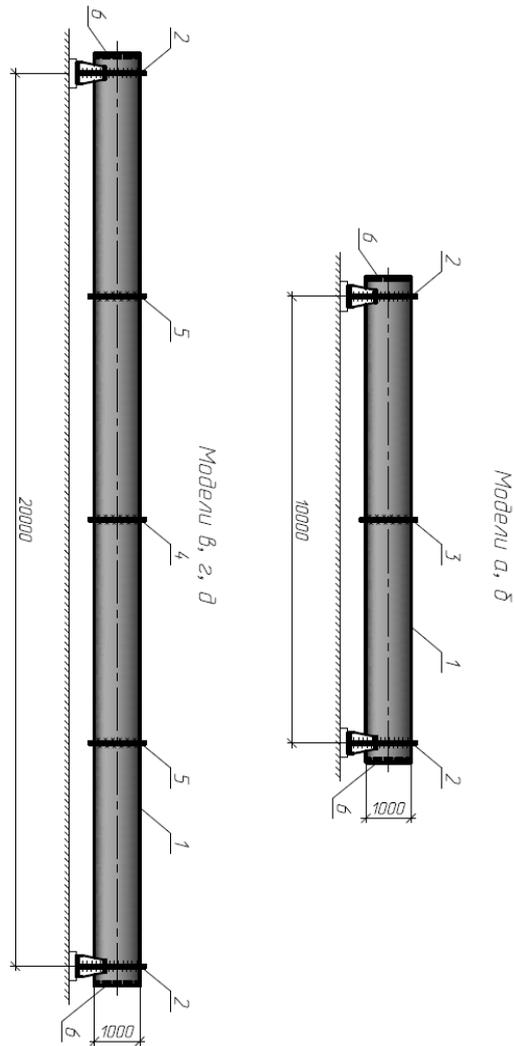


Рис. 7. Конструктивные формы испытанных моделей: 1 – оболочка трубопровода, 2 – опорные шпангоуты, 3 – промежуточный шпангоут только для модели б, 4 – промежуточный шпангоут только для модели з, 5 – промежуточные шпангоуты только для модели д, 6 – заглушка

Заполнению  $H = 446$  мм соответствует нагрузка, возникающая при резком нарушении технологического процесса, по классификации, принятой в [3].

Анализ результатов исследований позволил проследить характер работы конструкций и выработать ряд практических рекомендаций.

Действительный уровень напряженного состояния в целом соответствует предлагаемому расчетом уровню продольных и кольцевых напряжений. Некоторые наблюдаемые количественные расхождения опытных результатов – следствие факторов, присущих реальной конструкции: несовершенство геометрической формы, наличие дополнительной жесткости в местах сварных швов, влияние не учитываемых расчетом краевых эффектов, разброс модулей упругости материала и т. п.

Анализ распределения продольных и кольцевых напряжений показал наличие неодинаковых по длине модели отклонения напряжений от полученных по расчету, соответствующему гипотезе плоских сечений, а также зависимость отклонения от уровня нагрузки. В частности, отмечено, что продольные напряжения достигают максимальных отклонений от балочных в середине пролета модели, а кольцевые – в ее четверти.

Резкое отклонение напряженного состояния оболочки с  $\lambda = 10$  (рис 7, модель *a*) от гипотезы плоских сечений подтверждает, что существуют границы возможного расчета оболочек трубопроводов, как балок кольцевого сечения. Предложенная формула дает экстремальное значение относительной длины  $\lambda = 8,2$ , при которой наблюдается максимальное отклонение напряжений от гипотезы плоских сечений. Испытываемая оболочка, в которой зафиксированы наибольшие отклонения напряжений, имеет относительную длину  $\lambda = 10$ , близкую к экстремальному расчетному значению  $\lambda$ .

Исследования позволили сделать вывод, что для коротких неподкрепленных оболочек трубопроводов, нагруженных неосесимметричной нагрузкой, обязателен учет продольных напряжений, вызванных изгибом контура поперечного сечения. С увеличением пролета трубопровода влияние этого изгиба уменьшается, и работа оболочки становится близка работе балки кольцевого сечения. Что касается кольцевых напряжений, вызванных изгибом контура, то, ввиду их незначительности, в инженерных расчетах можно учитывать лишь кольцевые напряжения элементарного состояния.

Подкрепление оболочек трубопроводов промежуточными шпангоутами существенно меняет картину их напряженного состояния. Исследование трубопровода при  $\lambda = 10$  со шпангоутом в середине пролета (рис. 7, модель *b*) показало значительно большую равномерность распределения продольных и кольцевых напряжений по сравнению с неподкрепленным. Это свидетельствует о том, что короткие оболочки трубопроводов, подкрепленные одним шпангоутом, приближаются по своей работе к балкам кольцевого сечения.

В длинной подкрепленной оболочке трубопровода при  $\lambda = 20$  (рис. 7, модели  $\varepsilon$  и  $\delta$ ) распределение продольных и кольцевых напряжений еще ближе совпадает с распределением, соответствующим расчету по гипотезе плоских сечений. Постановка одного промежуточного шпангоута (рис. 7, модель  $\varepsilon$ ) позволяет рассматривать такие оболочки трубопроводов как балки кольцевого сечения и рассчитывать их в соответствии с гипотезой плоских сечений.

Изучение деформаций контуров поперечных сечений оболочек трубопроводов под действием поперечной нагрузки показало соответствие результатов испытаний изложенным выше выводам о влиянии этих деформаций на напряженное состояние.

Из эпюр деформации контуров поперечных сечений испытанных моделей видны значительные отклонения от окружности точек сечения в неподкрепленных моделях, превышающих по величине толщину стенки.

Анализ характера деформаций показал, что их значения меняются на разных этапах нагружения.

На рис. 8 схематически показан процесс деформирования контура поперечного сечения на примере короткой не подкрепленной модели (рис. 7, модель  $a$ ). Здесь первоначально выпучивается нижняя часть сечения с одновременным резким отклонением очертания деформированного контура от круга. Верхняя часть сечения в это время деформируется значительно меньше с сохранением деформированным контуром очертания окружности. Точки, лежащие на горизонтальном диаметре, начинают сближаться к центру.

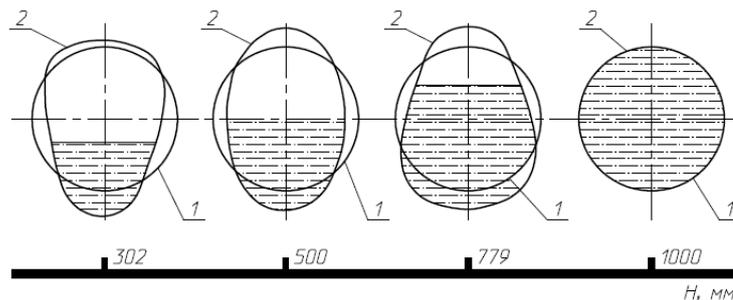


Рис. 8. Характер деформирования контура поперечного сечения оболочки трубопровода при изменении высоты  $H$  его заполнения  
1 – недеформированный контур; 2 – деформированный контур

В дальнейшем деформации нарастают и примерно при половинном заполнении деформации верхней и нижней частей выравниваются по размеру. Одновременно контур нижней части сечения стремится приобрести форму окружности.

После нагрузки, соответствующей уровню заполнения  $0,7 \dots 0,8 H$ , начинается достаточно быстрый возврат в первоначальное положение всего деформированного контура. При полном заполнении поперечного сечения контур вновь приобретает форму круга.

Исследование моделей со шпангоутами показало, что постановка одного шпангоута стабилизирует форму поперечного сечения. Характер деформаций остается тот же, однако значения их малы и не превышают  $(0,1 \dots 0,2)t$ .

Эти данные позволяют сделать вывод о том, что постановка одного шпангоута в середине пролета оболочки резко снижает деформативность поперечных сечений, приближая ее работу к балке кольцевого сечения.

Исследование действительной работы оболочек трубопроводов под воздействием поперечной вертикальной нагрузки позволяют сделать следующие выводы, которые могут быть использованы в инженерном проектировании.

1. При нагружении оболочки короткого трубопровода неосесимметричной нагрузкой наблюдаются значительные отклонения результатов от полученных при расчете оболочки как балки кольцевого сечения. В то же время, для оболочек длинных трубопроводов характерно близкое совпадение напряженного состояния с определенным по гипотезе плоских сечений. Это соответствует результатам анализа о границах возможного расчета оболочек трубопроводов как балок кольцевого сечения.
2. Кольцевые напряжения имеют незначительные отклонения от напряжений полученных с учетом гипотезы плоских сечений. Поэтому в инженерных расчетах можно учитывать лишь кольцевые моменты элементарного состояния.
3. Характер деформаций контура поперечного сечения и их значения меняются на разных этапах нагружения и, достигая максимума в средней части пролета, уменьшаются в его четверти на  $45 \dots 65 \%$ .
4. Максимальная деформация точек, определяющих общую несущую способность, наблюдается при нагрузке, близкой к половинному заполнению.

5. Постановка одного проміжучного шпангоута в середині прольета в значительній степені стабілізує форму поперечного сечення і зменшує відхилення напружень від балочних. Сохраняє обшій характер деформацій гладкої неподкрепленої оболочкы, значення их різко зменшуються, і контур поперечного сечення в цьому случає незначительно відхиляється від недеформованного, що підтверджує можливість расчета такої оболочкы трубопровода как балкы кільцевого сечення.

### **Выводы**

Гладкы тонкостенныє оболочкы трубопроводов при работє на поперечную нагрузку необхідно рассматривать как пространственныє конструкции і учитываь дополнителные нормальныє напруження, вызванныє деформациями контура их поперечного сечення і потерей им кругового очертаанья. При определенных геометрических параметрах оболочкы или при подкреплении ее проміжучными шпангоутами оболочка трубопровода может быь рассмотрена как плоская конструкция і без учета дополнителных нормальных напружений.

### **Литература**

- [1] Кан С. Н. Строительная механика оболочек : монография / С. Н. Кан. – М. : Машиностроение, 1966. – 505 с. : ил., табл. – Библиогр.: с. 503–506.
- [2] Казакевич М. И. Проектирование металлических конструкций надземных промышленных трубопроводов : коллект. монография / М. И. Казакевич, А. Е. Любин. – К. : Будівельник, 1989. – 157 с. : ил., табл. – Библиогр.: с. 156–157.
- [3] Рекомендации по определению нагрузок на отдельно стоящие опоры и эстакады под трубопроводы / Центр. науч.-исслед. ин-т строит. конструкций им. В. А. Кучеренко. – М. : Стройиздат, 1973. – 65 с. : ил., табл.

*Надійшла до редколегій 7.11.2014 р.*