

## ИЗГИБ МНОГОПУСТОТНЫХ ПЛИТ В УСЛОВИЯХ СТЕСНЕННЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

В плоском сборно-монолитном диске перекрытия каркаса [1] многопустотные плиты при изгибе от вертикальной нагрузки работают в условиях стесненных горизонтальных деформаций, обусловленных реакциями связей с примыкающими к плитам конструкциями — монолитными ригелями и швами омоноличивания. По характеру работы эти связи могут быть односторонними, работающими на сжатие и двухсторонними, воспринимающими усилия сжатия-растяжения. Причем двухсторонние связи в контактных сечениях смежных конструкций придают им свойство неразрезности, а односторонние, воспринимая только усилия сжатия, вызывают в плоскости плиты действие реакции горизонтального распора, приложенного к опорным сечениям с эксцентриситетом относительно срединной поверхности. Так, например, многопустотные плиты по торцам жестко сопряжены в одном уровне с монолитными ригелями посредством бетонных шпонок, входящих в пустоты на глубину  $100 \pm 20$  мм, а по межплитным швам — шарнирно — на выштамповках или продольных пазах, образованных при формовании плит в заводских условиях. В первом случае шпоночное сопряжение плит с ригелями следует рассматривать как двухстороннюю связь, работающую на растяжение-сжатие, а во втором — как односторонне сжимаемую связь. Объединение монолитным железобетоном пакетов сборных многопустотных плит в единый диск вовлекает их в пространственную схему работы, при которой плиты, следуя за деформациями прогиба поперечных ригелей, подвержены вынужденному поперечному изгибу. В этом случае вследствие специфики геометрических характеристик ортогональных сечений многопустотных плит и их армирования в продольном направлении, при поперечном изгибе диска по нижней грани плит существует вероятность образования продольных трещин вдоль пустот 2,3. Поэтому для учета пространственной работы плит в составе дисков перекрытий каркасной системы в БелНИИС были проведены экспериментальные исследования на отдельных образцах плит и фрагментах дисков, выявлено напряженно-деформированное состояние плит в ортогональных направлениях и установлены их расчетные схемы.

Чтобы при проектировании диска назначать реальную расчетную схему его составных элементов, необходимо представлять, чем отличается неразрезная схема работы конструкций от распорной и какие условия и свойства являются необходимыми и достаточными для реализации той или иной схемы.

Общеизвестно, что в балочных конструкциях при поперечном изгибе происходит поворот опорных сечений, укорочение верхних граней и удлинение нижних, вызывая их горизонтальное смещение. Наложение ограничений на это смещение приводит к возникновению распора, впервые выявленным в 1938 году А.А. Гвоздевым и изучавшимся многими авторами [4, 5, 6, 7]. В работе [4] появление распора объясняется образованием к моменту разрушения балок и плит пластических шарниров (трещин) на опорах и в пролете, за счет чего происходит удлинение их геометрической оси [5, 6]. В [7] содержится вывод о том, что при ограниченном армировании опорных сечений заземленных балок, в том числе в узлах с ограниченной несущей способностью, следует учитывать возможность возникновения распорных усилий при условии восприятия их опорными конструкциями. Следовательно, при рассмотрении схемы работы конструкций при изгибе следует иметь ввиду следующие предпосылки. Если укорочению верхних граней при повороте опорных сечений не препятствуют (отсутствуют) горизонтальные связи, воспринимающие растягивающие усилия, или эти связи настолько незначительны, что ими можно пренебречь, то конструкция при изгибе под нагрузкой будет работать с распором. Возникающий при этом опорный изгибающий момент

определяется равнодействующей усилия горизонтального давления сжатой части бетона относительно геометрической оси (распорная система). Наоборот, введение по высоте торцевого сечения горизонтальных связей, воспринимающих усилия растяжения, например, верхней арматуры, либо иных соединений, жестко сопряженных с изгибаемой конструкцией, превращает распорную систему в неразрезную, т.к. опорный момент от внешней нагрузки в сечении воспринимается парой сил. При этом в обоих случаях опоры должны быть несмещаемыми и обеспечивать сопротивление действующим усилиям (кручению с изгибом, продольным и поперечным силам). На схеме (рис. 1) представлен принцип классификации изгибаемых элементов на распорные и неразрезные системы в зависимости от условий опорных закреплений.

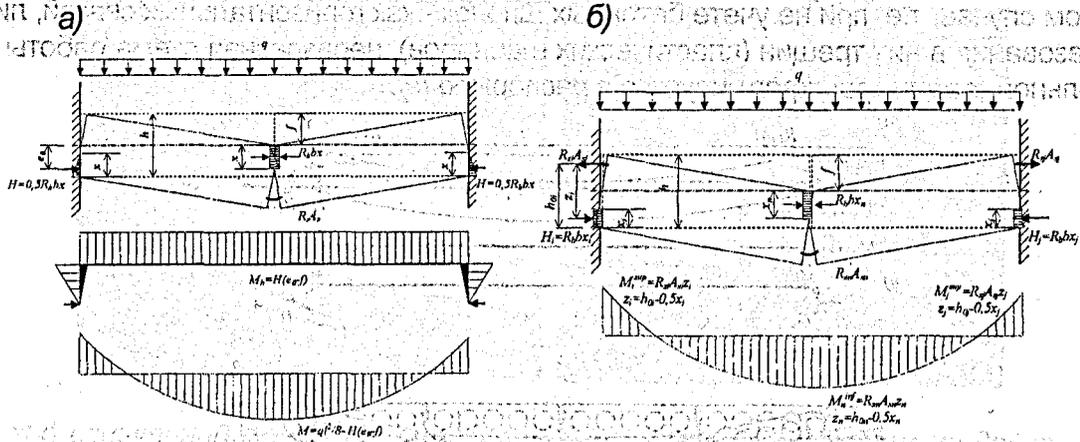


Рис. 1.

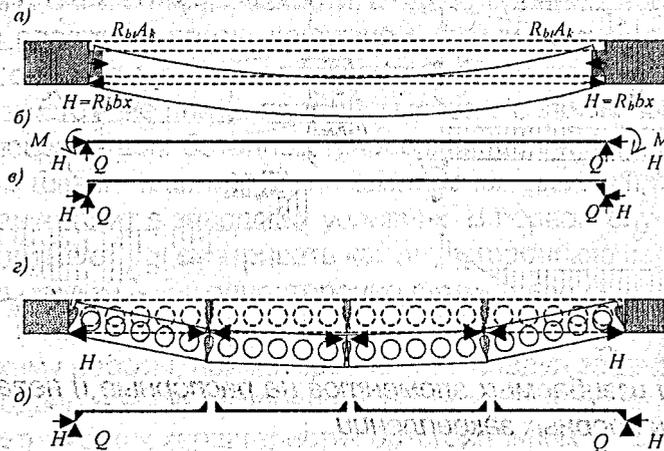
Принцип классификации изгибаемых элементов на распорные и неразрезные системы в зависимости от условий опорных закреплений  
 а – распорная система, б – неразрезная система

На схеме, изображенной на рис. 1а видно, что изгибаемая конструкция, вплотную прилегающая к опорам с односторонне сжимаемой горизонтальной связью, при изгибе под нагрузкой своими торцами оказывает давление на опоры, встречая при этом реакцию распора  $H$ . В этом случае на опорах возникают отрицательные изгибающие моменты  $M_0$ , которые разгружают пролетные, однако из-за отсутствия двухсторонних горизонтальных связей между конструкцией и опорами представить эти моменты парой сил не представляется возможным. Такая система может быть классифицирована как распорная, а ее расчетная схема аппроксимирована стержневым или плитно-оболочечным конечным элементом с эксцентричной передачей на опорные конструкции усилий от горизонтального распора по торцам. В неразрезной же системе (рис. 1б) опорные моменты  $M_0^{sup} = R_A A_s z_i$  и  $M_0^{inf} = R_B A_s z_j$  из условий равновесия сечений можно представить парами сил, действующих в двухсторонних горизонтальных связях. При этом плечо внутренних пар сил в зависимости от армирования и высот сжатых зон в рассматриваемых сечениях отыскиваются по выражениям:  $z_i = h_0 - 0,5x_i$ ;  $z_j = h_0 - 0,5x_j$ .

Таким образом, с учетом изложенного можно предположить, что распорными следует считать однопролетные изгибаемые конструкции с односторонне сжимаемыми горизонтальными связями по их боковым граням, приложенными к несмещаемым опорам с эксцентриситетом относительно срединной плоскости, а неразрезными – изгибаемые конструкции с двухсторонними растянуто-сжатыми горизонтальными связями в опорных сечениях.

Согласно такому определению, становится очевидным, что сборные плиты в составе плоских сборно-монокристаллических перекрытий работают по неразрезно-распорной схеме. Причем в эксплуатационной стадии неразрезность системы проявляется в продольном (рабочем) направлении плит, за счет их жесткого сопряжения с монолитными ригелями на

шпонках (многопустотные плиты) либо выпусках арматуры из плит сплошного сечения, а распорная – в поперечном направлении. На рис. 2 представлены схемы продольного (а) и поперечного (г) деформирования сборно-монолитного диска перекрытия из многопустотных плит и соответствующие им идеализированные продольно-поперечные аппроксимации плит стержневыми либо плитными конечными элементами, адекватные условиям их работы. При продольном изгибе (а) бетонные шпонки, входящие в пустоты, работают на срез с отрывом и представляют собой двухсторонние горизонтальные связи по торцам плит. Расчетная схема плиты вдоль рабочего пролета в этом случае может быть представлена стержнем (б) с жесткими узлами. Такая схема реализуется до образования трещин в бетонных шпонках, что является необходимым и достаточным условием работы плит по неразрезной схеме. В противном случае, т.е. при неучете бетонных шпонок - как горизонтальных связей, либо после образования в них трещин (пластических шарниров), неразрезная схема работы плит в запредельной стадии трансформируется в распорную (в).



**Рис. 2.**

Схемы продольно-поперечного деформирования сборно-монолитного диска перекрытия из многопустотных плит и примеры их расчетных ортогональных аппроксимаций стержневыми конечными элементами

а) продольное деформирование плит; б) неразрезная расчетная схема плиты вдоль ее рабочего пролета; в) распорная схема работы плиты при неучете бетонных шпонок в качестве горизонтальных связей; г) поперечное деформирование диска перекрытия в пределах ячейки каркаса; д) распорная аппроксимация пакета плит в поперечном направлении диска дискретными эксцентрично опертыми элементами

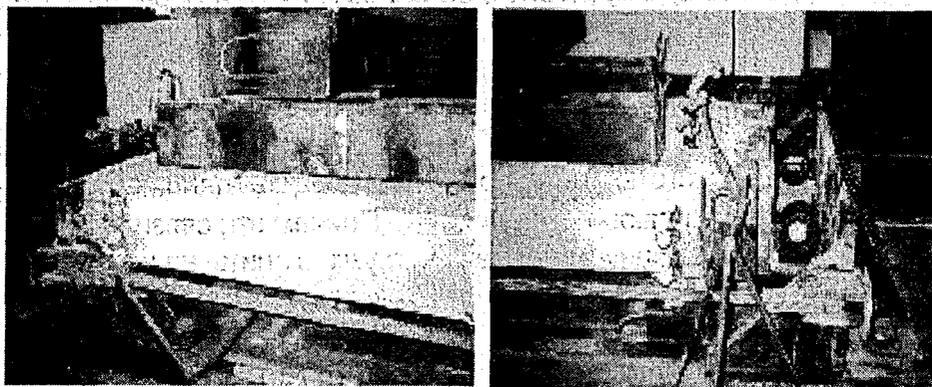
Характер деформирования диска перекрытия в поперечном направлении плит (г) представляется распорным в чистом виде, т.к. бетон межплитных швов на растяжение не работает и является связью плит, функционирующей в виде одной или нескольких одно- или двухсторонне сжимаемой горизонтальной связи, а расчетные схемы плит в поперечном направлении представляются дискретными стержнями с эксцентричной передачей распорных усилий на смежные элементы (д).

Для подтверждения вышеизложенных предположений и исследования условий возникновения распорных усилий при изгибе многопустотных плит от действия вертикальной нагрузки, в БелНИИС были проведены испытания двух серий опытных образцов.

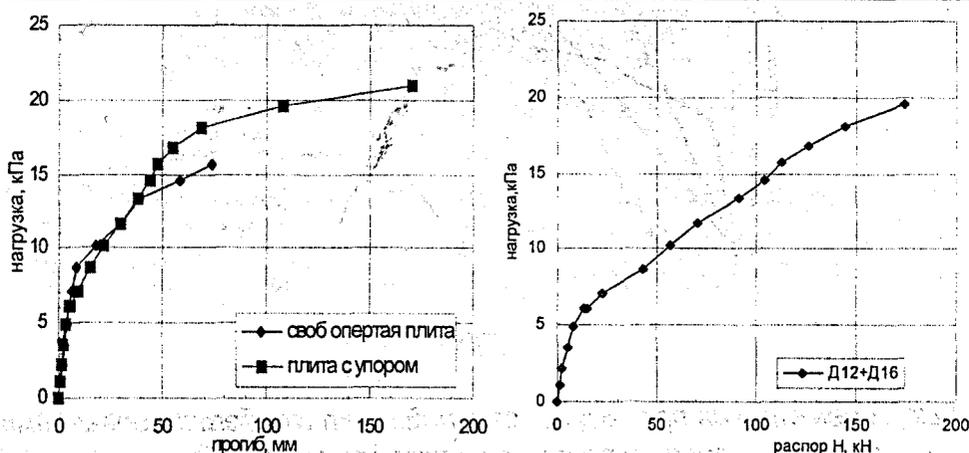
Первая серия состояла из двух отдельных сборных многопустотных плит, испытанных по балочной схеме при свободном опирании, причем одна из плит была выполнена с добетонированными по торцам участками монолитных ригелей, сопряженных с плитой на бетонных шпонках и выпусках рабочей арматуры.

Вторая серия также состояла из двух плит, испытанных по балочной схеме, но с упорами по торцам, объединенными в одном случае стальными затяжками, а в другом - связываемыми ригелями, образующими с участками монолитных ригелей по торцам плиты железобетонную обойму. При этом плита в обойме с монолитным железобетоном была объединена только по торцам посредством бетонных шпонок.

При испытании плиты в стальных упорах, было установлено, что в нижней части опорных сечений (рис. 3) возникает реактивное распорное усилие, повышающее несущую способность. Это подтверждается графиками роста прогибов и величины распора, измеренного кольцевыми протарированными динамометрами (рис. 4).



**Рис.3.** Общий вид испытаний многоспустотной плиты с упорами по торцам на действие вертикальной нагрузки



**Рис 4.** Вертикальные перемещения плит под нагрузкой и изменение величины горизонтальной реакции распора  $H$  плиты, испытанной в стальных упорах

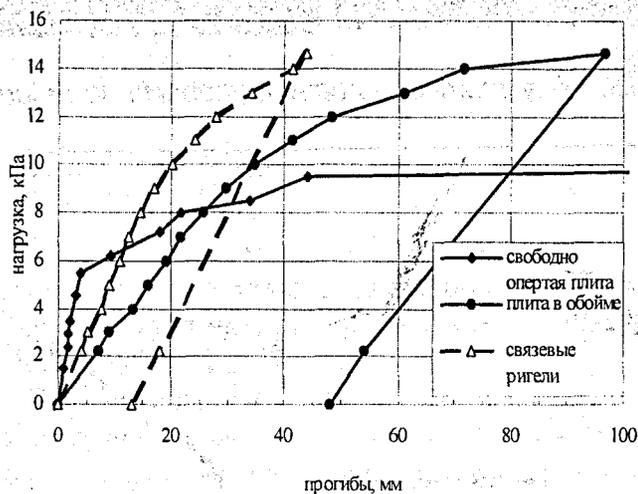
Первые трещины с шириной раскрытия  $a_{от} = 0,05$  мм образовались при нагрузке  $q = 10,23$  кПа. По контактам торцов плиты и упоров вследствие отсутствия между ними горизонтальных связей, воспринимающих растягивающие усилия, образовались зазоры шириной раскрытия по верхней грани от 0,3 0,6 мм до 5,64 мм перед разрушением. Это свидетельствует о повороте опорных сечений плиты с образованием пластических шарниров, которые являются условием возникновения горизонтального распорного усилия.

До появления трещин влияние горизонтального распора  $H$  (рис. 4) на жесткость плиты на первых ступенях нагружения было незначительным, что можно объяснить податливостью опор. После обжатия контактов по торцам плиты и образования трещин в пролетных сечениях плиты происходил более интенсивный рост усилия распора, величина которого к

концу нагружения достигла значения  $H = 174,6$  кН. Нагрузка на плиту при этом составила  $q = 19,55$  кПа, что на 24,4 % превышает нагрузку  $q = 15,72$  кПа, полученную при испытании плиты по балочной схеме.

Из этого следует, что при продольном изгибе плит, зажатых торцами в упруго податливых опорах, их несущая способность увеличивается примерно на 25 % за счет влияния внутреннего распора, а опорные изгибающие моменты, разгружающие пролетные, можно представить распорным усилием  $H$ , приложенным к упорам с эксцентриситетом  $e_0$  относительно срединной поверхности. Данным опытом подтверждается распорная схема работы плиты с односторонними горизонтальными связями по торцам, воспринимающими усилия сжатия, что является достаточным условием ее аппроксимации расчетной схемой, приведенной на рис. 2в.

При испытаниях плиты с добетонированными по торцам участками монолитных ригелей и такой же плиты с упором торцами в железобетонную обойму из несущих и связевых ригелей 9 был установлен характер работы плиты по неразрезной схеме (рис. 5), т.к. бетонные шпонки, входящие в пустоты плиты по торцам представляли собой горизонтальные связи, воспринимающие растягивающие усилия 10. Причем эти связи были настолько значительными, что обеспечивали полную передачу нагрузки с плиты на незагруженные ригели с вовлечением их в работу и передачей усилий крутящих моментов, от которых впоследствии произошло разрушение торцевых ригелей обоймы.



**Рис. 5.**

*Вертикальные перемещения пролетных сечений плит с добетонированными по торцам участками монолитных ригелей и плиты в железобетонной обойме.*

Прочность шпоночных сопряжений определялась по результатам испытаний 10 с учетом возможных форм поперечного сечения, приведенных в таблице.

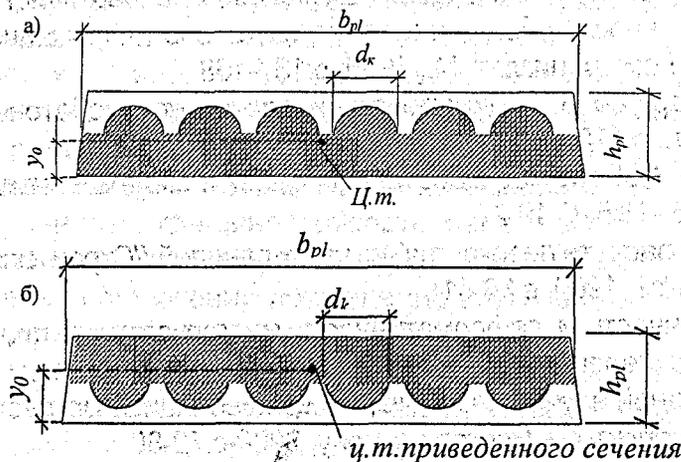
Из таблицы следует, что наилучшую сходимость с опытом дает форма поперечного сечения, включающая полное сечение шпонок и часть плиты, расположенную ниже центра сопротивления сечения. При этом адгезия сборного бетона плиты и монолитного бетона ригелей не учитывается. Следовательно, в расчете 11 шпоночного сопряжения плиты с ригелем следует учитывать работу бетонных шпонок как изгибаемого бетонного элемента сечением соответствующей формы (рис. 6).

В расчетах на упругой стадии и отсутствии трещин в шпоночном соединении расчетная схема плиты в продольном направлении имеет вид согласно рис. 2б.

**Таблица.**

Результаты определения прочности шпоночного соединения многопустотной плиты с монолитным ригелем на действие изгибающего момента

Форма поперечного сечения шпоночного сопряжения	$M_{ult}$ кНм	$W$ $M^3$	$W^{sup}_{pl}$ $M^3$	$\sigma_{bt}$ , МПа	$R_{bt}$ , МПа	$\sigma_{bt}/R_{bt}$
	22.73	$9.61 \cdot 10^{-3}$	$16.45 \cdot 10^{-3}$	1.38	3.87	0.356
	22.73	$2.368 \cdot 10^{-3}$	$4.736 \cdot 10^{-3}$	4.8	3.87	1.238
	22.73	$3.374 \cdot 10^{-3}$	$5.9045 \cdot 10^{-3}$	3.85	3.87	0.993



**Рис. 6.**

Формы поперечного сечения шпоночного сопряжения многопустотной плиты с монолитным ригелем, учитываемые в расчете по прочности при вычислении моментов сопротивления относительно верхней  $W^{sup}_k$  (а) и нижней  $W^{inf}_k$  (б) растянутых граней.

**ВЫВОДЫ**

1. При изгибе под нагрузкой многопустотных плит, упертых торцами в упруго податливые опоры, ограничивающие горизонтальное смещение нижних и допускающие свободное перемещение верхних частей опорных сечений при их повороте, несущая способность увеличивается примерно на 25% за счет влияния внутреннего распора.
2. Шпоночное сопряжение торцов многопустотных плит с монолитными железобетонными ригелями представляет собой двухстороннюю связь, воспринимающую опорный изгибающий момент и поперечную силу и придает системе «плита-ригель» свойство неразрезности до исчерпания прочности бетона шпонок на растяжение.
3. В плоском сборно-монолитном диске перекрытия распорная схема работы плит под нагрузкой в большей степени реализуется в поперечном направлении, а в продольном направлении – после образования трещин в пролетных и опорных сечениях с выключением в них из работы горизонтальных растянутых связей, создающих неразрезность системы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ №2118430. Каркас многоэтажного здания. МКИ<sup>6</sup> E04B1/18, E04H 9/02. Патентообладатель БелНИИС, БИ № 24, 1998.
2. Семченков А.С. Расчет ригелей и пустотных панелей с учетом совместной работы элементов каркаса. /В сб.: Экспериментальные и теоретические исследования сборных железобетонных конструкций. М., Госгражданстрой, 1983, с.41-61.
3. Айвазов Р.Л. Сборное панельное перекрытие, опертное по контуру. Теоретические исследования // Пространственная работа железобетонных конструкций.-Сб.№90.- МИСИ, 1970,- с.77-87.
4. Крылов С.М. Экспериментальное исследование работы железобетонных перекрытий каркасных зданий. /В кн. Исследование свойств бетона и железобетонных конструкций// труды НИИЖБ, вып.4, под ред.А.А.Гвоздева, Госстройиздат, М., 1959, с.276-334.
5. Зайцев Л.Н. Влияние распора на распределение усилий, несущую способность и деформативность статически неопределимых железобетонных балок. /В кн. Трещиностойкость и деформативность обычных и предварительно напряженных конструкций. Под ред.А.А.Гвоздева, Госстройиздат, М., 1965, с.137-168.
6. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Динамический расчет железобетонных конструкций. М., Стройиздат, 1974 г., с.175.
7. Краснощеков Ю.В. Работа железобетонных балок с заземленными концами. //Бетон и железобетон.-1993.- №5.-С.19-21.
8. Кондратьев Р.Б. О расчете перекрытий из узких панелей. //Строительная механика и расчет сооружений. - №2, 1960, с.36-41.
9. Белевич В.Н. Прочность и деформативность многопустотных плит в составе сборно-монолитного диска перекрытия. //Бетон и железобетон в третьем тысячелетии: Материалы международной научно-практической конференции/Ростовский государственный строительный университет – Ростов-на-Дону, 2000-с.72-80.
10. Белевич В.Н. Прочность шпоночных сопряжений многопустотных плит в сборно-монолитном диске перекрытия каркаса //Материалы IV научно-технической конференции «Строительство в сейсмичных районах Украины». КиевЗНИИЭП, Ялта, 1999г, с.258..263.
11. Типовые строительные конструкции, изделия и узлы. Серия Б1.020.1-7. Сборно-монолитная каркасная система МВБ-01 с плоскими перекрытиями для зданий различного назначения: БелНИИС. Указания по проектированию.- Мн.:Минсктиппроект, 1999.

**Будюк В.Д.**

### **ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ЕМКСТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАПРЯГАЮЩЕГО БЕТОНА**

На многих объектах строительства в системах водоснабжения, канализации, теплоснабжения, в качестве резервуаров для хранения жидких материалов возводятся емкостные сооружения. Преимущественно сооружения проектируются прямоугольного в плане очертания из сборных плоских стеновых элементов. В таких конструктивных системах стенка работает как балка с пролетом на высоту сооружения и испытывает одноосное напряженное состояние, в силу чего вертикальный стык сборных стеновых элементов не испытывает каких-либо усилий, что существенно упрощает его устройство. В сооружениях цилиндрической формы стенка испытывает объемно-напряженное состояние, что позволяет с максимальным эффектом использовать прочностные свойства материала. В отличие от систем прямоугольного очер-