

# Строительные конструкции, здания и сооружения

УДК 624.046; 624.07

DOI: 10.14529/build200301

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОПУСТОТНЫХ ПАНЕЛЕЙ ПЕРЕКРЫТИЯ РАЗЛИЧНЫХ ДЛИН

**А.С. Васильев, Е.А. Плеханова**

*Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема,  
г. Биробиджан, Россия*

Известно, что многопустотные панели для упрощения при расчетах представляют в форме двутавровых (тавровых) балок и считают по балочной теории. Однако такое представление тем не менее может искажать результаты расчетов. Цель данной работы – изучить, как форма поперечного сечения многопустотных панелей для образцов различной длины влияет на несущую и деформативную способность, а также на нагрузку начала трещинообразования. Рассматривались образцы панелей различных длин, свободно опертых и работающих на изгиб, с поперечным сечением в естественной форме, в сопоставлении с образцами аналогичных длин в двутавровой форме. На образцы последовательно прикладывалась нагрузка с шагом 1 кН до достижения предела текучести арматурой в растянутой зоне.

Выполнено численное исследование многопустотных панелей в нелинейной постановке с образованием пластического шарнира в середине пролета. Получены графики нагрузка – прогиб при моделировании соответствующих длин образцов с естественной и двутавровой формой сечения. Получены и сопоставлены результаты для нагрузки появления трещин, прогибов в середине пролета при разрушающей нагрузке. Выяснено, что длина панели оказывает влияние на результаты расчетов рассматриваемых форм, и чем длина меньше, тем более ярко выражено отклонение в графиках нагрузка – прогиб. С увеличением длины образцов коэффициент корреляции растет и стремится к единице, что говорит об увеличении связи между графиками нагрузка – прогиб. Предложены поправочные коэффициенты для уточнения расчетов плит по образованию трещин, деформациям и разрушающим нагрузкам.

*Ключевые слова: многопустотные панели перекрытия, форма поперечного сечения, нагрузка образования трещин, разрушающая нагрузка, прогиб.*

### Введение

Пустотные плиты представляют собой сборные конструкции из напрягаемого или ненапрягаемого бетона, обычно используемые при строительстве полов в многоэтажных жилых зданиях. Особую популярность такие плиты имели в странах Северной Европы, а также бывшего Советского Союза. Популярность сборного железобетона актуальна в первую очередь для зон с небольшой сейсмичностью. Также применение сборных железобетонных панелей характеризуется экономичностью из-за быстрой сборки зданий и уменьшения собственного веса конструкций. Сборная железобетонная пустотная плита имеет трубчатые пустоты, проходящие по всей длине плиты, обычно с диаметром, равным примерно двум третьим или трем четвертым толщины плиты. Это делает плиту намного легче, при этом увеличивается полезная нагрузка и снижаются материальные и транспортные расходы. Такие плиты обычно имеют ширину в среднем 1200 мм и стандартную толщину обычно от 150 до 500 мм.

Стальная арматура в растянутой зоне плиты обеспечивает сопротивление изгибу.

Основное преимущество пустотных панелей – сравнительно небольшой вес, позволяющий увеличивать полезную нагрузку на перекрытия или использовать более длинные перекрытия для больших пролетов. При этом некоторые авторы предлагают новые конструкции пустотных плит с более легкими и экологичными материалами. Такими свойствами, например, обладают плиты системы «Собіах», испытанные и предложенные в работе [1]. В труде А.А. Аль-Аззави и С.А. Абед [2] выполнено исследование поведения железобетонных пустотных плит с различными физико-механическими и геометрическими характеристиками. Исследовалась прочность пустотных плит на сдвиг. Были проведены натурные эксперименты и соответствующие нелинейные расчеты методом конечных элементов (МКЭ), чтобы доказать, что прочность на сдвиг многопустотных плит составляет не менее 50 % от сдвиговой прочности аналогичной сплошной плиты.

## Строительные конструкции, здания и сооружения

Исследование плит перекрытия численными методами, в том числе МКЭ, с использованием теорий механики железобетона было выполнено российскими исследователями Н.И. Карпенко [3, 4], С.Ф. Клованичем [5, 6]. На основе моделей механики железобетона, разработанных и описанных вышеуказанными исследователями, с применением современных программных комплексов и численных методов поведение железобетонных плит под нагрузкой исследовал А.С. Васильев [7–9]. М.Ф. Джавед и др. [10] в своей работе исследовали эффективность работы стальных, заполненных бетоном, труб. Многие авторы, такие как Юаньли Ву [11], Г.М. Чен [12], М.Л. Беннегади [13], исследовали методы усиления многопустотных плит на основе композитов. Напряженное и деформированное состояние железобетонных плит с предварительно напрягаемой арматурой представлено в исследованиях П. Канкери [14], Аль-Негхаймиш [15], В. Альберо [16]. В работе Канкери большое внимание уделялось усилению многопустотных плит после образования трещин в бетоне.

Известно, что для упрощения расчетов пустотных плит и представления их в форме стержневых балочных конечных элементов используется именно двутавровая форма. В рамках теории расчета железобетонных конструкций, учитывается

не только наличие арматуры внутри бетона (т. е. наличие армирующего материала внутри армируемого), но также и перераспределение усилий между этими материалами при появлении трещин и разрушении бетона. При этом геометрические параметры сечения также могут оказывать влияние на результаты расчетов железобетона при перераспределении усилий и образовании пластического шарнира в конструкции.

### Материалы и методы

В работе рассматриваются многопустотные плиты перекрытий различных длин, взятых по ГОСТ 9561-91. За основу исследования приняты стандартные панели: высота 220 мм, круглые пустоты диаметром 159 мм. Ширина была принята фиксированной и составила 1000 мм. Данный тип плит перекрытий предназначен для опирания по двум сторонам. При численных расчетах рассматривалось  $9 \times 2$  вариаций плит в зависимости от длины. Эти вариации приведены в табл. 1.

Материалы: бетон тяжелый класса В25 ( $E_b = 3 \cdot 10^4$  МПа,  $R_{bt} = 1,05$  МПа,  $R_b = 14,5$  МПа); рабочая продольная арматура А400 ( $R_s = 365$  МПа,  $E_s = 2 \cdot 10^5$  МПа) – 6 стержней диаметром по 12 мм. Защитный слой бетона 30 мм. Сечения рассматриваемых образцов приведены на рис. 1.

Рассматриваемые образцы

Таблица 1

№	Длина, мм	Естественная форма	Форма двутавровых балок
1	2400	Образец 1.1	Образец 1.2
2	2700	Образец 2.1	Образец 2.2
3	3000	Образец 3.1	Образец 3.2
4	3300	Образец 4.1	Образец 4.2
5	3600	Образец 5.1	Образец 5.2
6	3900	Образец 6.1	Образец 6.2
7	4200	Образец 7.1	Образец 7.2
8	4500	Образец 8.1	Образец 8.2
9	4800	Образец 9.1	Образец 9.2

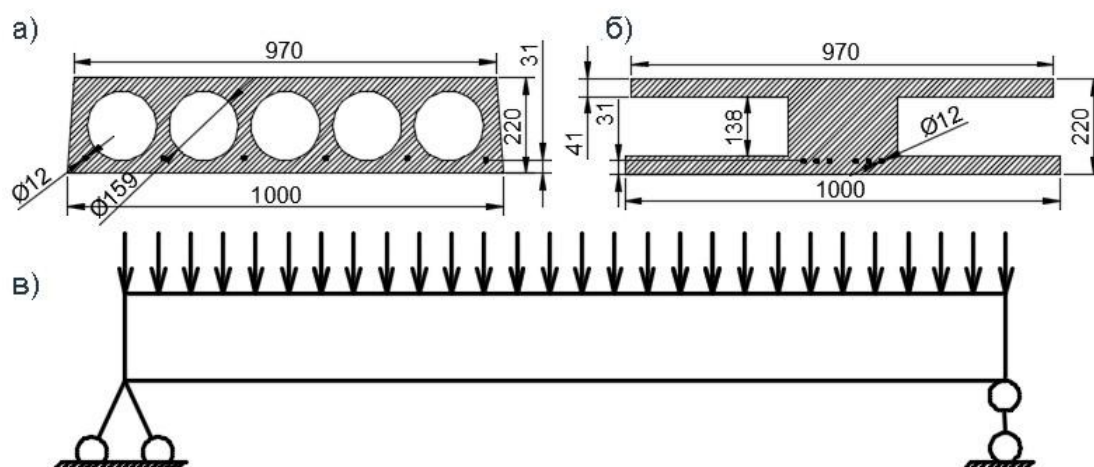


Рис. 1. Геометрические характеристики панелей: а – поперечное сечение панели в естественной форме, б – поперечное сечение панели в форме двутавровой балки, в – типичная расчетная схема плиты

Расчеты выполнены в программном комплексе ANSYS 19R2. Дискретные модели насчитывали от 70000 до 150000 ячеек и от 100000 до 200000 узлов в зависимости от типа сечения и длины образца (рис. 2). Конечные элементы – в форме гексаэдра, максимальный размер 20 мм. Для уменьшения концентрации напряжений по краям, были смоделированы круглые опоры в местах опирания.

Каждый образец при проведении численного эксперимента последовательно нагружали, начиная от нулевой нагрузки, с шагом нагрузки  $\Delta F = 1$  кН, до разрушения, происходившего от действия изгибающего момента в середине пролета образцов, при достижении предела текучести арматурой в растянутой зоне. На каждом шаге нагрузки получали соответствующий ей прогиб. Поведение бетона моделировалось на основе крите-

рия прочности Willam-Warnke [17], на основе конечного элемента SOLID 65. На основе использованной модели, трещины образовывались по площадке, нормальной к главным напряжениям, при превышении ими заданного предела прочности при растяжении. Также учитывалось объемное напряженное состояние.

### Результаты и их обсуждение

Из рис. 3 видно, что с увеличением длины образцов графики нагрузка – прогиб коррелируют значительно сильнее. Также на графиках можно заметить, что при сопоставлении более коротких образцов появление трещин у образцов в двутавровой форме наступает раньше. Это подтверждается рис. 4, где представлены изополя напряжений в образцах при численных расчетах.

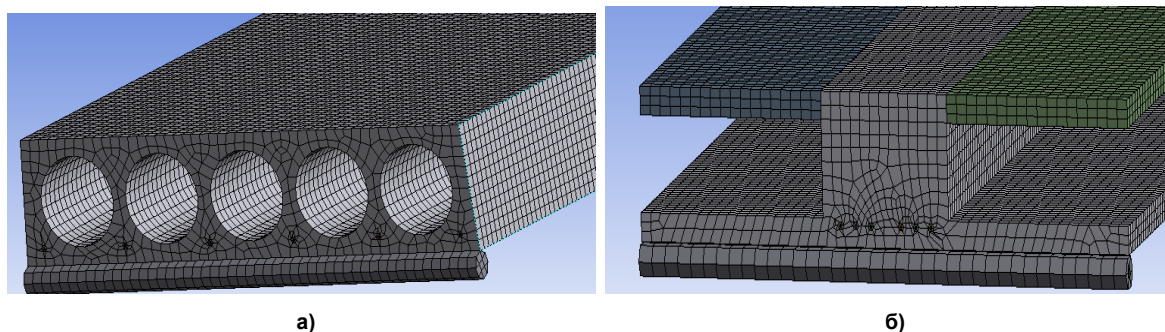


Рис. 2. Конечно-элементная сетка плит (ANSYS): а – естественная форма, б – двутавровая форма

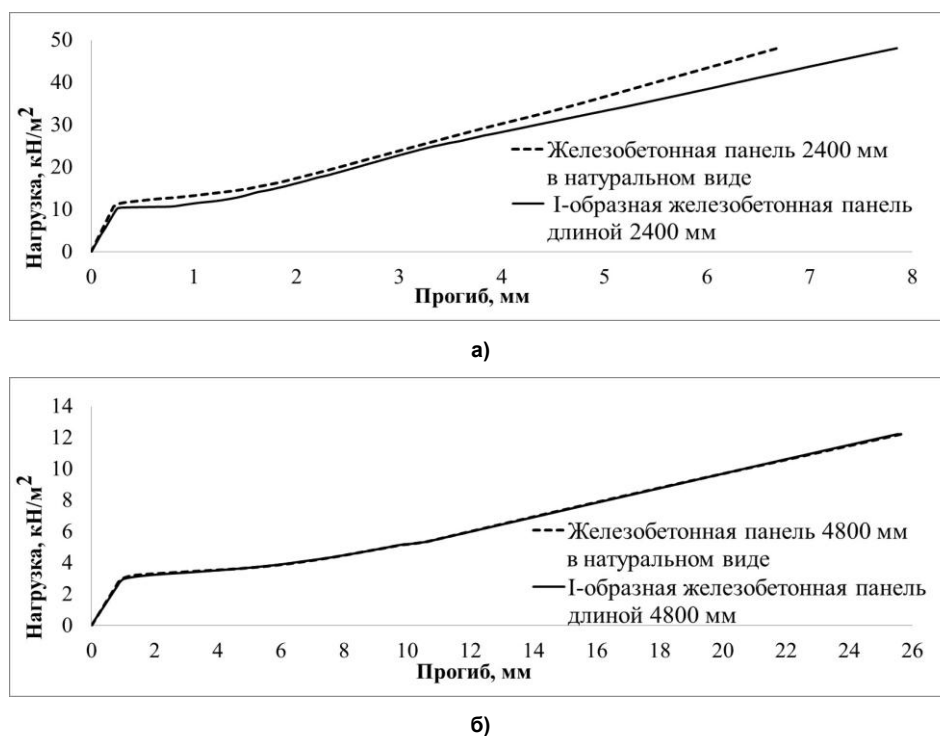


Рис. 3. Сравнение результатов расчетов отклонения нагрузки для образцов в виде двутавровых и естественных сечений: а – образцы длиной 2400 мм, б – образцы длиной 4800 мм