

ИССЛЕДОВАНИЕ УЗЛОВ СОПРЯЖЕНИЯ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ СО СТЕНОВЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ

В. М. Чук¹, С. Б. Щербак²

¹ Директор РУП «Институт НИПТИС им. Атаева С.С.», Минск, Беларусь, niptis27@mail.ru

² Зам. декана строительного факультета БНТУ, Минск, Беларусь

Реферат

Появление на строительном рынке Республики Беларусь плит безопалубочного формования с высотой сечения 320, 350, 400, 450, 500 мм открывает новые возможности при проектировании зданий и сооружений [1]. При этом данные большепролетные многпустотные плиты перекрытия и покрытия пролетом ($L=10 \dots 16$ метров) в основном находят свое применение в каркасных системах со свободным опиранием на балки, прогоны и ригели. Данные конструктивные системы с однопролетными плитами и шарнирным опиранием на опорах хорошо изучены и понятны для инженеров, осуществляющих проектирование зданий и сооружений. Представляется вполне целесообразным расширить область применения большепролетных плит и для стеновых конструктивных систем зданий. Исследование напряженно-деформированного состояния узлов опирания плит на стеновые конструкции, влияние пригрузки в опорных узлах на работу большепролетных плит перекрытия, фактические значения углов поворота в сечениях при различных граничных условиях представляют большой практический интерес, которому посвящена данная статья.

Ключевые слова: модель, плита безопалубочного формования, изгиб

RESEARCH OF THE CONNECTIONS OF THE INTERFACE OF THE PLATES OF THE OVERLAPPING OF THE FORMING-FREE FORMING WITH WALL DESIGNS

V. M. Chik, S. B. Shcherbak

Abstract

The appearance on the construction market of the Republic of Belarus of formless molding plates with a section height of 320, 350, 400, 450, and 500 mm opens up new possibilities in the design of buildings and structures [1]. Moreover, these large-span multi-hollow floor slabs and overfloor coverings ($L = 10 \dots 16$ meters) are mainly used in frame systems with free support on beams, girders and crossbars. These structural systems with single span slabs and articulated bearings on poles are well studied and understandable for engineers engaged in the design of buildings and structures. It seems quite advisable to expand the scope of wide-span plates for wall structural systems of buildings. The study of the stress-strain state of the nodes supporting the plates on wall structures, the influence of the load in the support nodes on the operation of large-span floor slabs, the actual values of the rotation angles in the sections under various boundary conditions are of great practical interest, which this article is devoted to.

Keywords: model, formless plate, bend

Введение

В настоящее время на территории страны более десятка предприятий успешно наладили производство многпустотных плит безопалубочного формования. Два завода, КУП «ЗЭПК» и ООО «СБК», освоили выпуск плит высотой сечения более 220 мм. Такие плиты позволяют перекрывать пролеты до 16 метров с обеспечением восприятия расчетной нагрузки порядка 10 кПа (без учета собственного веса). Такие изделия востребованы при проектировании и возведении паркингов, торговых центров, производственных зданий, которые, как правило, запроектированы на базе сборного каркаса, состоящего из колонн и ригелей различных форм и пролетов. Внедрение новых, достаточно эффективных большепролетных плит вполне ожидаемо вызовет интерес со стороны заказчиков, что приведет к их использованию при проектировании жилых и общественных зданий и сооружений.

Одним из вариантов использования большепролетных плит в жилых зданиях является конструктивная система с широким шагом несущих стен, которая в среде проектировщиков носит лаконичное название «широкий шаг». Эта конструктивная система может быть как с продольным, так и с поперечным расположением несущих стен. Она достаточно хорошо известна, и в настоящее время несколько предприятий возводят жилые здания на базе этой системы. К несомненным плюсам конструктивной системы можно отнести возможность создания больших открытых пространств внутри квартир, что обеспечивает так называемую свободную планировку. К сожалению, ввиду необходимости дополнительных видов работ, данная конструктивная система незначительно проигрывает классическим зданиям КГД при возведении жилья в дешевом ценовом сегменте.

До настоящего времени здания, возводимые по системе «широкий шаг», проектировали с применением многпустотных плит перекрытия пролетом 6.0, 6.6, 7.2 метра. Появление большепролетных плит может вдохнуть новую жизнь в данную конструктивную систему.

В качестве одного из вариантов рассматривается возможность применения преднапряженных многпустотных безопалубочных плит пролетом 9.9 метров и высотой сечения 320 мм. С целью обеспечения требуемой глубины опирания в качестве несущих стен приняты железобетонные панели толщиной 200 мм.

Вышележащие стены, располагаемые на опорных участках плит, могут создавать защемление плиты на опорах. Влияние степени защемления необходимо оценить и учитывать при проектировании. При этом защемление не является жесткой заделкой плиты перекрытия в стене, так как с точки зрения строительной механики не ограничивает до нуля угол поворота конструктивного элемента на опоре. В реальности же податливость материала плиты перекрытия, стен, а также смятие растворной постели, приведут к некоторому повороту сечения. В данном случае речь идет о частичном или ограниченном защемлении, и именно степень этого защемления при различных граничных условиях и его влияние на работу большепролетных плит будем рассматривать в статье.

1. Моделирование работы платформенного стыка плит пустотного настила безопалубочного формования

1.1 Сборные элементы. Условия опирания

Для моделирования основных конструктивных элементов платформенного стыка была принята следующие железобетонные изделия.

1. Плиты перекрытия – железобетонные многпустотные предварительно напряженные плиты безопалубочного формования, изготавливаемые на оборудовании фирмы "ELEMATIC", шириной 1200 мм и высотой сечения 320 мм, с нижним армированием канатами по ГОСТ13840-68. Длина плит – 9900 мм. Расчетная допустимая нагрузка не ниже 600 кг/м² (рисунок 1).

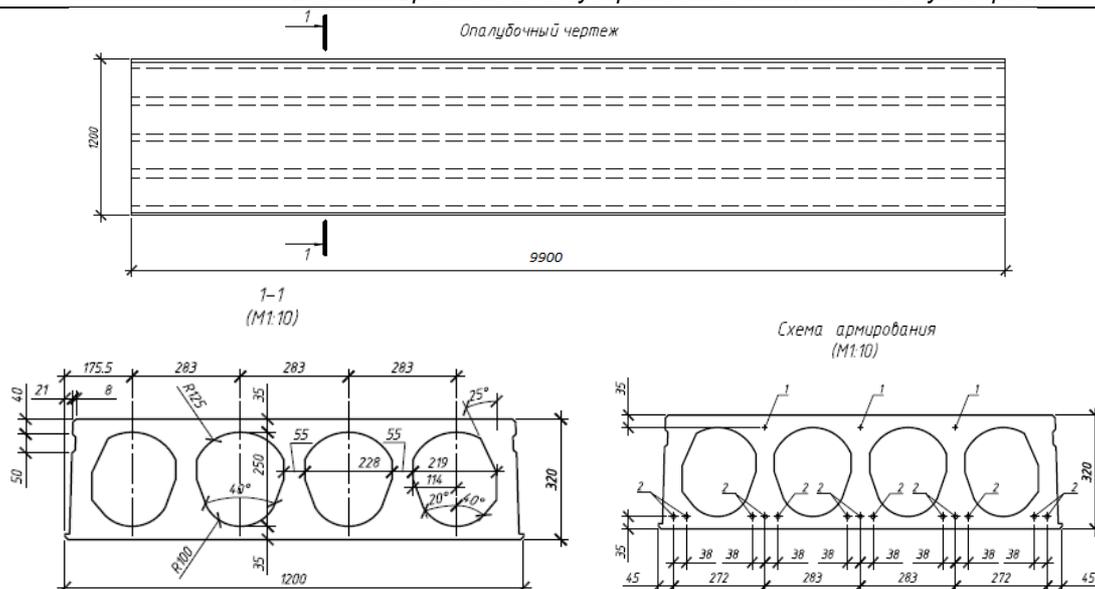


Рисунок 1 – Образцы плит перекрытий

2. Элементы стен имеют следующие размеры: ширина 1200 мм, высота 400 мм и толщина 200 мм. Выполнены из тяжелого бетона класса С16/20 и армированы арматурой класса S500 (СТБ 1704-2012) периодического профиля (рисунок 2).

3. Опорные вкладыши имеют размеры: ширина 1200 мм, высота 320 мм и толщина 100 мм. Выполнены из тяжелого бетона класса С16/20 и армированы арматурой класса S500 (СТБ 1704-2012) периодического профиля (рисунок 3).

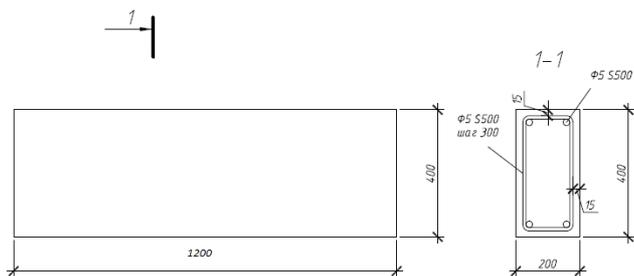


Рисунок 2 – Опытные образцы элементов стен

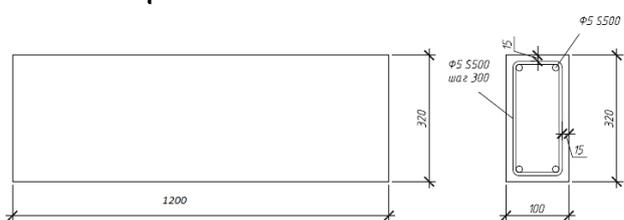


Рисунок 3 – Опытные образцы опорных вкладышей

В рассматриваемой конструктивной схеме малоизученным является платформенный стык опирания большепролетных многопустотных плит на поперечные стены по двум схемам:

1. Опирание плиты на глубину, равную толщине стены (на 200 мм) – для торцевых узлов.
2. Опирание плиты на участке глубиной до половины толщины стены (не менее 80 мм) – для внутренних узлов.

1.2 Численное моделирование

Целью исследования является изучение напряженно-

деформированного состояния (НДС) платформенного стыка многопустотных плит с опиранием на железобетонные стены с двумя схемами опирания, глубиной 200 и 80 мм и различным вертикальным пригрузом, который обеспечивает частичное защемление плит в узлах. Таким образом, создавая отрицательный изгибающий момент в опорной зоне, можно оценить его влияние на работу плиты на всех стадиях нагружения, в том числе с учетом изменения пригруза в опорном узле. Анализ результатов расчета свободнолежащей и защемленной на опоре плиты, на глубину 80 и 200 мм в предельной стадии равновесия, позволяет оценить влияние эффекта защемления, а также правильно обеспечить конструирование узлов опирания.

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния узлов сопряжения пустотных плит, изготовленных по технологии компании Elematic, и стеновых конструкций при кратковременном действии статических нагрузок проведено на основе метода внешних конечно-элементных аппроксимаций [1], который реализован в Altair SimSolid™ 2019. Этот программный продукт разработан специально для анализа сложных компонентов и сборок, а также используется для обработки контактных поверхностей с зазорами и перекрывающейся геометрией. В нем реализованы все основные модели контактного взаимодействия упругих твердых тел с учетом трения.

При разработке модели были учтены физико-механические свойства бетона пустотной плиты Elematic, опорных элементов, а также прослойка из мелкозернистого бетона (таблица 1).

3D-моделирование опытного фрагмента перекрытия, включающего два варианта платформенного стыка, проведено в ANSYS SpaceClaim 2019 R3.

С учетом геометрической симметрии исследуемых конструкций относительно вертикальных плоскостей и симметричного воздействия статических нагрузок при разработке моделей рассматривалась только 1/4 часть фрагмента перекрытия с узлами сопряжения. Это позволило существенно сократить размеры моделей, уменьшить объем вычислительных операций и повысить точность полученных результатов.

Модель JBAP 1-15-00 соответствует испытаниям свободно опертной плиты. На рисунке 4 представлены общие виды модели, указаны основные геометрические параметры, а также дана схема нагружения фрагмента.

Модель JBAP 2 соответствует испытаниям при частичном опирании плиты на стену ($I_{sup} = 80$ мм). На рисунке 5 представлены общие виды модели, указаны основные геометрические параметры, а также дана схема нагружения фрагмента.

Модель JBAP 3 соответствует испытаниям, когда площадка опирания плиты равна толщине стены (200 мм). На рисунке 6 представлены общие виды модели, указаны основные геометрические параметры, а также дана схема нагружения фрагмента.

Описание нагрузок, приложенных к расчетным моделям, и расшифровка принятых обозначений приведены в таблице 2.

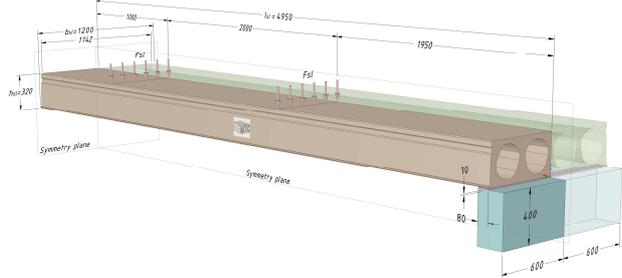


Рисунок 4 – Общий вид модели JBAP 1, основные геометрические параметры и схема нагружения

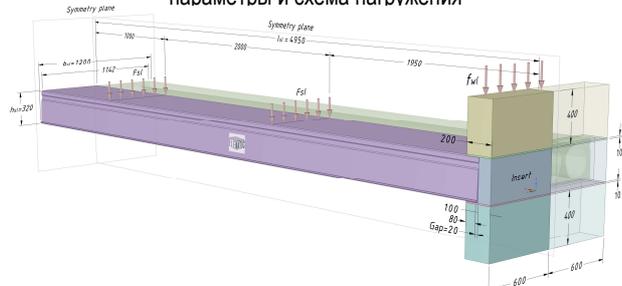


Рисунок 5 – Общий вид моделей JBAP 2. Основные геометрические параметры и схема нагружения

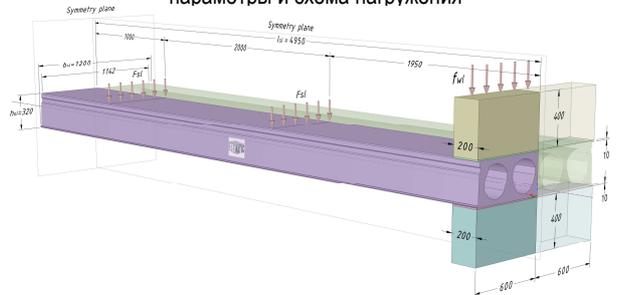
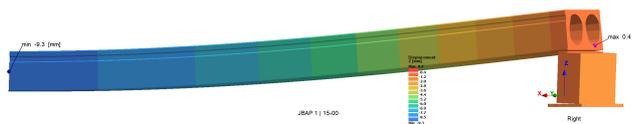


Рисунок 6 – Общий вид моделей JBAP 3. Основные геометрические параметры и схема нагружения

2 Результаты анализа НДС свободно опертой плиты на модели JBAP 1-15-00

Основные результаты анализа НДС модели JBAP 1-15-00, используемой для исследования работы узла опирания пустотной плиты при свободном опирании на стену, приведены на рисунках 7-8.



Max number of equations 149 000
 Number of adaptive solution passes 4
 Analysis type Structural with Separating Non-linear Contact

Рисунок 7 – Общий вид модели JBAP 1-15-00 в деформированном состоянии и поля вертикальных перемещений U_z , мм. Максимальный прогиб в середине плиты без учета преднапряжения – 9.3 мм

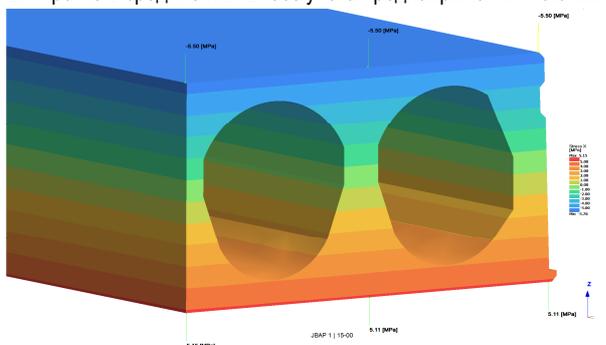
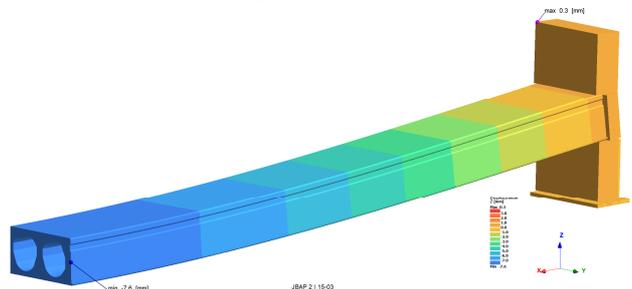


Рисунок 8 – Фрагмент модели JBAP 1-15-00. Характер распределения нормальных напряжений σ_x [МПа] по высоте среднего сечения плиты ($x = 4.95$ м), здесь величина изгибающего момента $M_y = 41.14$ кН*м, $N_x = 7.07$ кН и $V_z = 0$

3 Результаты анализа НДС моделей серии JBAP 2

Основные результаты анализа НДС моделей серии JBAP 2 при частичном опирании пустотных плит на стену с использованием вкладыша приведены на рисунках 9-18. узлов сопряжения для модели JBAP 1-15-00 приведены на рисунках 7-8, для моделей JBAP 2-15-03–JBAP 2-15-30 – на рисунках 9-10.



Max number of equations 172 900
 Number of adaptive solution passes 4
 Analysis type Structural with Separating Non-linear Contact
 Рисунок 9 – Общий вид модели JBAP 2-15-03 в деформированном состоянии и поля вертикальных перемещений U_z . Максимальные перемещения в середине плиты $U_z^{\max} = 7.6$ мм. В среднем сечении плиты ($x = 4.95$ м) действует изгибающий момент $M_y = 34.6$ кН*м, $N_x = -7.3$ кН и $V_z = 0$

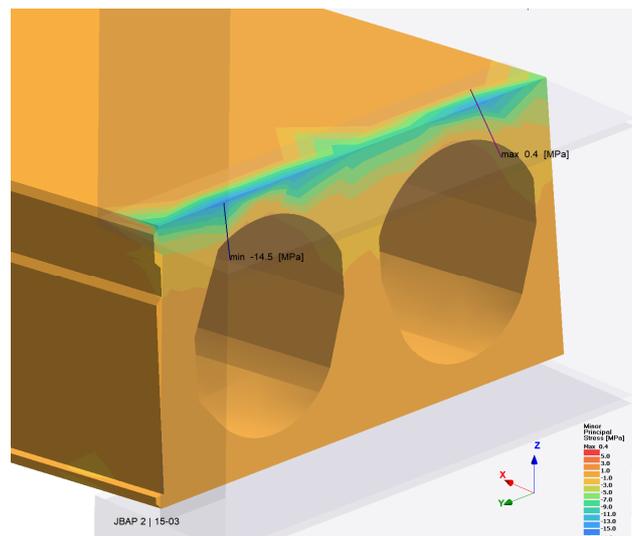
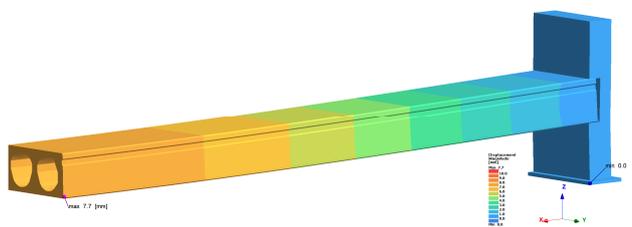


Рисунок 10 – Опорный фрагмент модели JBAP 2-15-03 в деформированном состоянии и поля главных сжимающих напряжений σ_{mc} , МПа. Условно показана только плита



Максимальное число уравнений 173-103
 Число проходов адаптивного решения 4
 Тип анализа Нелинейный с раздельными контактами
 Рисунок 11 – Общий вид модели JBAP 2-15-10 в деформированном состоянии и поля вертикальных перемещений U_z . Максимальные перемещения в середине плиты равны 7.7 мм. В среднем сечении плиты ($x = 4.95$ м) действует изгибающий момент $M_y = 32.9$ кН*м, $N_x = -19.3$ кН и $V_z = 0$

Таблица 1 — Упругие характеристики материалов, принятые при моделировании узлов сопряжения

Материал – моделируемая часть	Наименование упругой характеристики	Обозначение	Ед. изм.	Величина
Бетон тяжелый класса С40/50 – экструзионная пустотная плита (ELEMATIC Slab)	Модуль упругости	$E_{cm,sl}$	ГПа или кН/м ²	35
	Модуль сдвига	$G_{c,sl}$	ГПа	$\frac{E_{cm,sl}}{2(1+\nu_c)}$ $\approx 0.4E_{cm,sl}$
	Начальный коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона)	ν_c	–	0.2
Бетон тяжелый класса С16/20 – верхний и нижний фрагмент стены (Wall), вкладыш (Insert)	Модуль упругости	$E_{cm,wl}$	ГПа	29
	Модуль сдвига	$G_{c,wl}$	ГПа	$\frac{E_{cm,wl}}{2(1+\nu_c)}$
	Коэффициент Пуассона	ν_c	–	0.2
Бетон мелкозернистый (Fine Concrete) М200 – выравнивающие слои толщиной 10 мм между плитой, вкладышем и элементами стены	Модуль упругости	$E_{cm,FC}$	ГПа	$0.85 \times 27 = 23^*$
	Модуль сдвига	$G_{c,FC}$	ГПа	$\frac{E_{cm,FC}}{2(1+\nu_c)}$
	Коэффициент Пуассона	ν_c	–	0.2
Сталь прокатная S235 – фрагмент силового пола	Модуль упругости	E_s	ГПа	210
	Модуль сдвига	G_s	ГПа	$\frac{E_s}{2(1+\nu_s)}$
	Коэффициент Пуассона	ν_s	–	0.3

Примечание. Упругие характеристики материалов определены без учета длительности действия нагрузки.

* Значение модуля упругости снижено на 15 % в соответствии с требованиями СНБ 5.03.01–02 [1]

Таблица 2 — Описание нагрузок, приложенных к расчетным моделям

Поз. №	№ схемы испытания	Обозначение (шифр) модели ¹	Распределенная нагрузка на стену f_{wl} , тс/м	Длина моделируемой стены l_{wh} , м	Общая нагрузка на стену F_{wh} , кН	Нагрузка на плиту в точке F_{sh} , тс	Полная нагрузка на модель F_{tot}^2 , кН
1	1	JBAP 1-15-00	–	0.6	–	1.5/2	14.71
2	2	JBAP 2-15-03	3	0.6	17.65	1.5/2	32.36
3	2	JBAP 2-15-10	10	0.6	58.84	1.5/2	73.55
4	2	JBAP 2-15-20	20	0.6	117.68	1.5/2	132.39
5	2	JBAP 2-15-30	30	0.6	176.53	1.5/2	191.24
6	3	JBAP 3-15-03	3	0.6	17.65	1.5/2	32.36
7	3	JBAP 3-15-10	10	0.6	58.84	1.5/2	73.55
8	3	JBAP 3-15-20	20	0.6	117.68	1.5	132.39
9	3	JBAP 3-15-30	30	0.6	176.53	1.5	191.24

Примечания: 1. Схемы приложения нагрузок приведены на рисунках 2.1–2.3

2. Собственный вес моделируемых элементов в расчетах не учитывается.

1 Шифр состоит из следующих элементов:

JBAP — Joint Bearing Against Platform (платформенный стык)

1, 2, 3 — соответственно схема испытания № 1, 2 и 3

15 — величина точечной нагрузки на плиту, тс 10–1

00, 03, 10, 20, 30 — величина распределенной нагрузки f_{wl} от 0 до 30 тс

2 Полная нагрузка F_{tot} приведена для контроля нагрузжений при моделировании

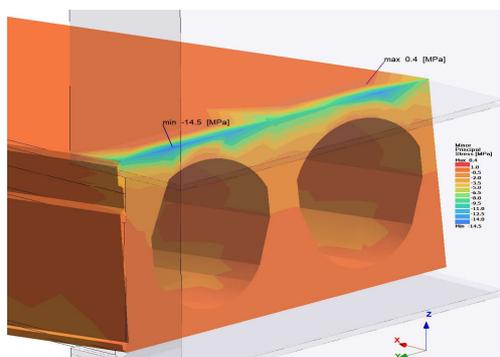
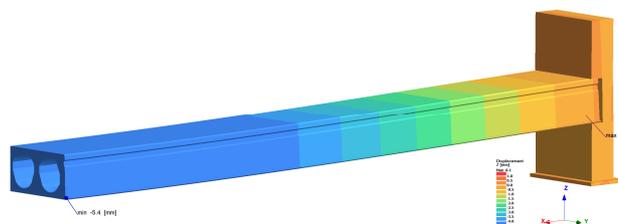


Рисунок 12 — Опорный фрагмент модели JBAP 2-15-10 в деформированном состоянии. Распределения главных сжимающих напряжений σ_{mc} [МПа] в плите. Величина максимальных напряжений $\sigma_{mc}^{max} = 14.5$ МПа



Максимальное число уравнений..... 176·103

Число проходов адаптивного решения... 4

Тип анализа..... Нелинейный с раздельными контактами

Рисунок 13 — Общий вид модели JBAP 2-15-20 в деформированном состоянии и поля вертикальных перемещений U_z . Максимальные перемещения в середине плиты $U_z^{max} = 5.4$ мм. В среднем сечении плиты ($x = 4.95$ м) действует изгибающий момент $M_y = 25.9$ кН*м, $N_x = -19.7$ кН и $V_z = 0$

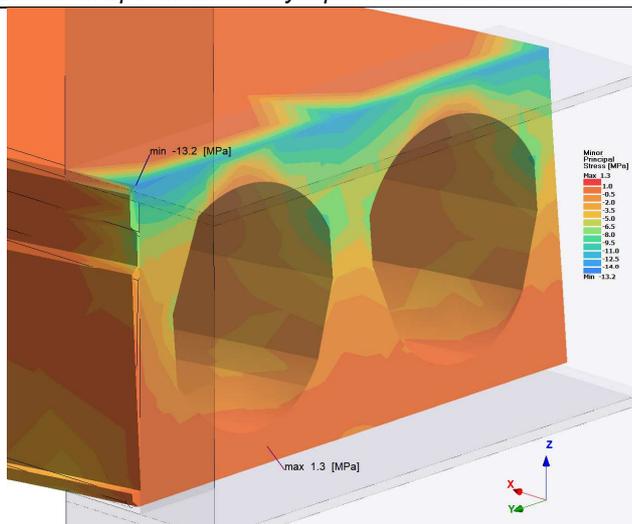
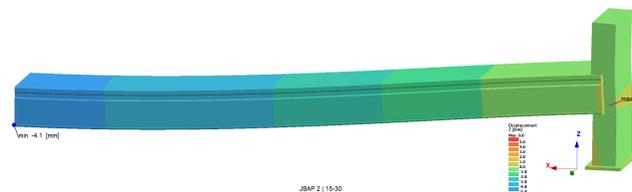


Рисунок 14 – Опорный фрагмент модели JBAP 2-15-20 в деформированном состоянии. Распределения главных сжимающих напряжений σ_{mc} [МПа] в плите. Величина максимальных напряжений $\sigma_{mc}^{\max} = 13.2$ МПа



Максимальное число уравнений176 640
 Число проходов адаптивного решения...4
 Тип анализа Нелинейный с раздельными контактами
Рисунок 15 – Общий вид модели JBAP 2-15-30 в деформированном состоянии и поля вертикальных перемещений U_z . Максимальные перемещения в середине плиты $U_z^{\max} = 4.1$ мм. В среднем сечении плиты ($x = 4.95$ м) действует изгибающий момент $M_y = 21.5$ кН*м, $N_x = -24.7$ кН и $V_z = 0$

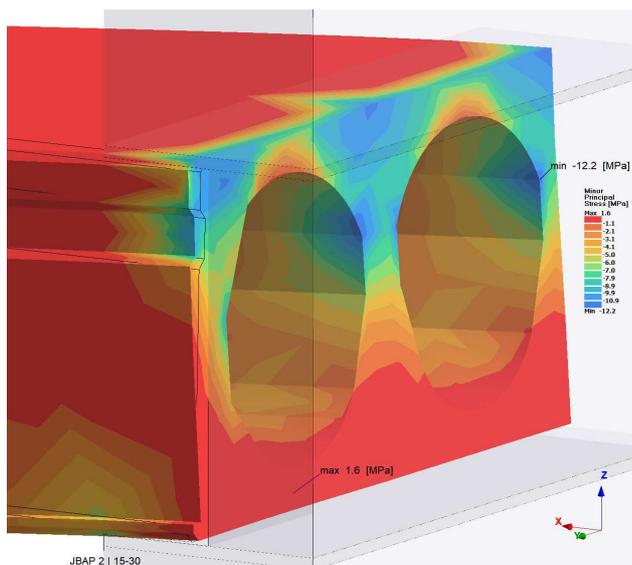


Рисунок 16 – Опорный фрагмент модели JBAP 2-15-30 в деформированном состоянии. Распределения главных сжимающих напряжений σ_{mc} [МПа] в плите. Величина максимальных напряжений $\sigma_{mc}^{\max} = 12.2$ МПа

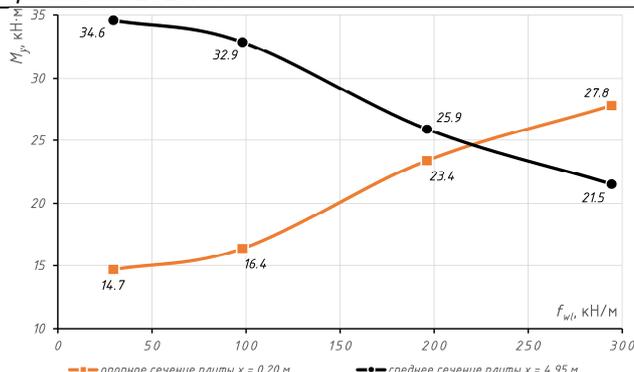


Рисунок 17 – Зависимость изгибающих моментов M_y , действующих в сечениях плиты, от нагрузки на стену f_{wl} для моделей JBAP 2

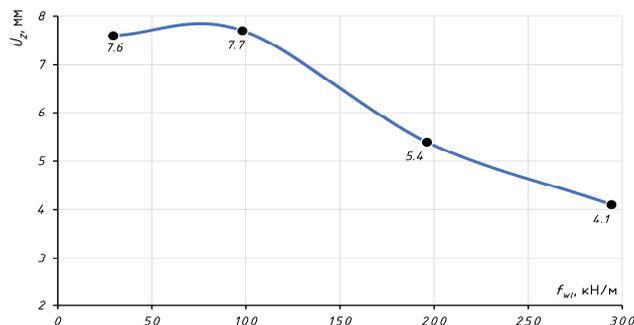
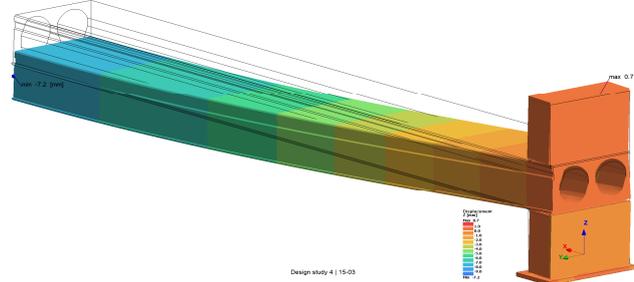


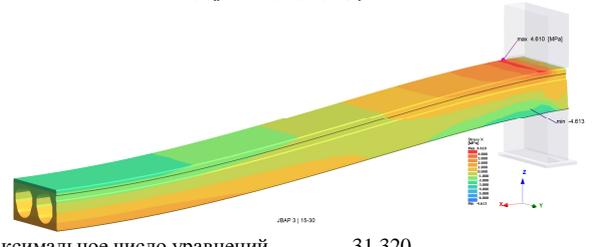
Рисунок 18 – Зависимость максимального прогиба плиты U_z^{\max} от нагрузки на стену f_{wl} для моделей JBAP 2

4 Результаты анализа НДС моделей серии JBAP 3

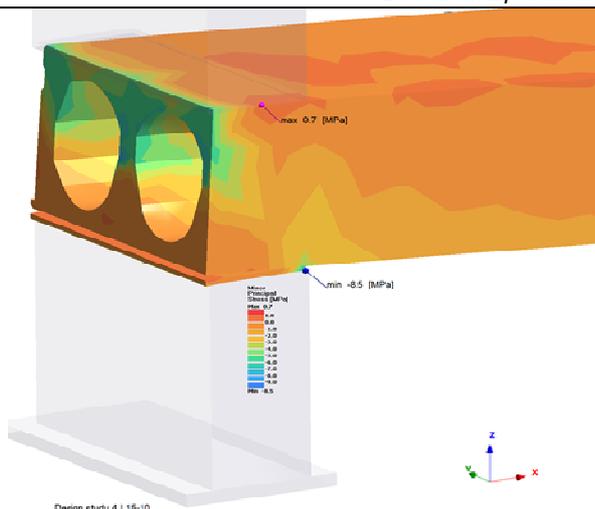
Основные результаты анализа НДС моделей серии JBAP 3 при полном опирании пустотных плит на стену приведены на рисунках 19-22, а зависимости « $M_y - f_{wl}$ » и « $U_z - f_{wl}$ », полученные численным моделированием показаны на рисунках 23-24.



Максимальное число уравнений 30 800
 Число проходов адаптивного решения...4
 Тип анализа Нелинейный с раздельными контактами
Рисунок 19 – Общий вид модели JBAP 3-15-03 в деформированном состоянии и поля вертикальных перемещений U_z . Максимальные перемещения в середине плиты $U_z^{\max} = 7.2$ мм. В среднем сечении плиты ($x = 4.95$ м) действует изгибающий момент $M_y = 34.3$ кН*м, $N_x = -10.9$ кН и $V_z = 0$

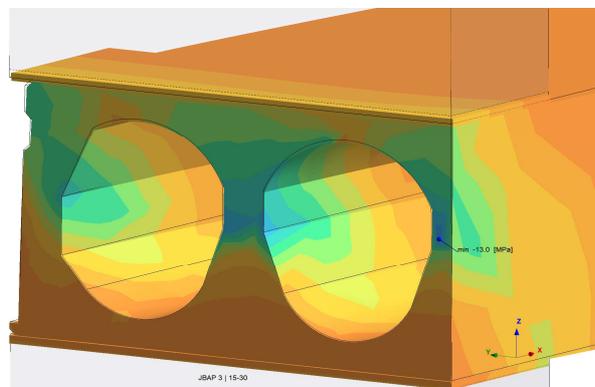


Максимальное число уравнений 31 320
 Число проходов адаптивного решения...4
 Тип анализа Нелинейный с раздельными контактами
Рисунок 21 – Общий вид модели JBAP 3-15-30 в деформированном состоянии и поля нормальных напряжений σ_x . Максимальные перемещения в середине плиты $U_z^{\max} = 2.7$ мм. В среднем сечении плиты действует изгибающий момент $M_y = 16.3$ кН*м и $N_x = -18.7$ кН



Design study 4 | 15-10

Рисунок 20 – Опорный фрагмент модели JBAP 3-15-10 в деформированном состоянии и распределения главных сжимающих напряжений σ_{mc} . Изгибающий момент в плите $M_y = 23.5 \text{ кН*м}$



JBAP 3 | 15-30

Рисунок 22 – Опорный фрагмент модели JBAP 3-15-30 в деформированном состоянии. Распределения главных сжимающих напряжений σ_{mc} плите. Величина максимальных напряжений $\sigma_{mc}^{\max} = 13.0 \text{ МПа}$

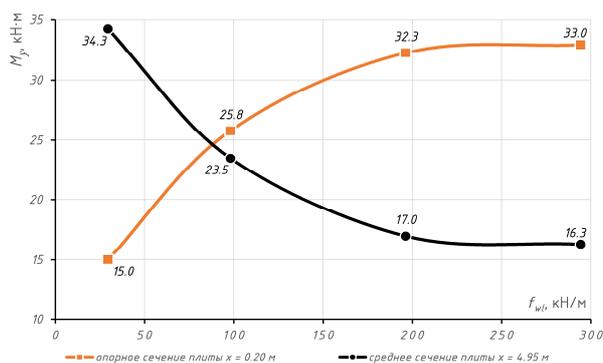


Рисунок 23 – Зависимость изгибающих моментов M_y , действующих в сечениях плиты, от нагрузки на стену f_{wl} для моделей JBAP 3

5 Анализ результатов

Анализ выполненного математического моделирования узлов сопряжения многопустотных плит перекрытия безопалубочного формирования со стеновыми конструкциями выявил четкую зависимость изменения характера работы платформенного стыка при приложении к нему вертикальных нагрузок, моделирующих натурные условия работы узла в системе (пригруз и частичное защемление). Наиболее очевидно влияние вертикального пригруза опорного узла на работу всей системы, которое проявляется в изменении деформаций и изгибающих моментов в середине пролета многопустотной плиты. Четко выявлено влияние напряженно-деформированного состояния платформенного стыка на повышение жесткостных параметров плиты.

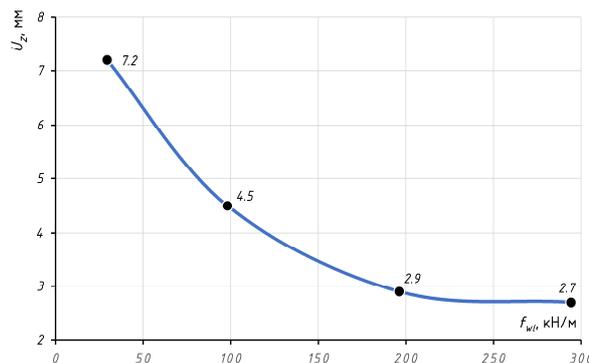


Рисунок 24 – Зависимость максимального прогиба плиты U_z^{\max} от нагрузки на стену f_{wl} для моделей JBAP 3

При проведении исследований в пролетной части плит прикладывалась неизменная нагрузка эквивалентная распределенной 6.0 кН/м^2 , включающая нагрузку от веса конструкций пола, перегородок и функциональную нагрузку (нагрузка от собственного веса конструкций не учитывалась). При этом изменялись условия опирания и величина пригруза плит на опоре.

При свободном опирании плиты (без защемления) изгибающий момент в плите составил 41.14 кН*м при прогибе 9.3 мм .

При увеличении нагрузки, пригружающей опорный узел, до 300 кН/м в середине пролета моделируемой плиты перекрытия получены следующие результаты:

- при опоре плиты перекрытия на 80 мм – уменьшение прогиба на величину до 56% , уменьшение момента на величину до 48% (рисунки 17, 18);
- при опоре плиты перекрытия на 200 мм – уменьшение прогиба на величину до 70% , уменьшение момента на величину до 60% (рисунки 23, 24);
- анализ эпюр напряженно-деформированного состояния узла опирания плиты на 80 мм подтвердил включение в работу добрного элемента (рисунок 13);
- распределение главных сжимающих напряжений по низу опорного сечения плиты четко показывает связь с переменной жесткостью многопустотной плиты по ширине сечения (наличие пустот и ребер).

Заключение

Результаты математического моделирования узлов платформенных стыков многопустотных плит высотой 320 мм с их опиранием на стены толщиной 200 мм с глубиной опирания плит 80 мм и 200 мм позволили разработать методику лабораторных испытаний узлов, максимально приблизив ее к условиям эксплуатации конструкций.

С целью проверки результатов математического моделирования и оценки сходимости планируется проведение лабораторных испытаний рассматриваемых в статье образцов. Результаты испытаний будут рассматриваться в следующих статьях.

Список цитированных источников

1. Чик, В. М. Крупнопанельное домостроение в Республике Беларусь // Проблемы современного строительства : материалы Международной научно-технической конференции. – Минск : БНТУ, 2019. – 397 с.
2. Апанович, В. Н. Метод внешних конечно-элементных аппроксимаций / В. Н. Апанович. – Минск : Вышэйш. шк, 1991. – 171 с.
3. Бетонные и железобетонные конструкции : СНБ 5.03.01-02. – Минск : Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2003. – 139 с. (с изм. № 1–5).

References

1. Chik, V. M. Krupnopanель'noe domostroenie v Respublike Belarus' // Problemy sovremennogo stroitel'stva : materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii. – Minsk : BNTU, 2019. – 397 s.
2. Apanovich, V. N. Metod vneshnih konechno-elementnyh approksimacij / V. N. Apanovich. – Minsk : Vyshejsj. shk, 1991. – 171 s.
3. Betonnyye i zhelezobetonnyye konstrukcii : SNB 5.03.01-02. – Minsk : Minstrojarkhitektury Respubliki Belarus', 2003. – 139 s. (s izm. № 1-5).

Материал поступил в редакцию 20.01.2020