

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ МНОГОПУСТОТНОЙ ПЛИТЫ ПЕРЕКРЫТИЯ

Шалобыта Н.Н., Коцюра И.П., Деркач Е.А.

Введение. Интенсивное строительство, которое началось Республике Беларусь с 2000-х годов, в первую очередь жилых и общественных зданий, определило два основных направления их конструктива: 1) безкаркасные, с несущими стенами из мелкоштучных каменных материалов; 2) каркасные, с несущими железобетонными конструкциями, в первую очередь в монолитном исполнении. Отличительной особенностью каркасных решений для гражданских зданий, является четкость и простота конструктивных форм, определяющая простоту и индустриальность возведения зданий: колонны — круглого или прямоугольного сечения; перекрытия — в основном безбалочные, обеспечивающие свободу в расстановке перегородок, т. е. свободу планировочных решений; вертикальные диафрагмы жесткости в таких зданиях упрощают конструкцию узлов сопряжения перекрытий с колоннами, работающими в этом случае только на вертикальные нагрузки; в перекрытиях производится укладка всех разводок труб для электро- и слаботочных устройств, что исключает необходимость в устройстве подвесных потолков или подсыпок под полы, в которых обычно размещают трубы [1]. Применяемое решение позволило при заданных пролетах между колоннами, в зависимости от величины полезной вертикальной нагрузки в безбалочных перекрытиях, изменять только толщину плиты и процент армирования их поперечного сечения. При этом основными недостатками безбалочных перекрытий являются ограниченные размеры их пролетов.

Учитывая, что конструктивно для монолитных каркасных зданий основная масса монолитного железобетона в основном сосредоточена в перекрытиях, наиболее рациональной областью материало- и ресурсосбережения является применение эффективных типов безбалочных перекрытий с простой плоской опалубкой и конструктивно простым армированием.

Особенностью строительства из монолитного железобетона является сборка и монтаж арматуры непосредственно на строительной площадке, что приводит к значительным трудозатратам и многократному перерасходу арматуры по сравнению с использованием плит перекрытий с предварительным напряжением, где расход арматуры на 1 м составляет от 12 до 17 кг против 20-40 кг для конструкций без предварительного напряжения. На данный момент по архитектурным соображениям или технологическим требованиям часто необходимо реализовывать монолитные большепролетные перекрытия пролетом более 7 метров. При проектировании большепролетных железобетонных перекрытий с пролетом больше 7-9 м оказывается, что выполнить эти конструкции в обычном железобетоне не представляется возможным и не имеет выгоды, что связано в первую очередь со снижением параметра жесткости этих конструкций и развития трещин в растянутой зоне.

Одним из наиболее перспективных направлений развития монолитного железобетона является применение при возведении пролетных конструкций преднапряжения с натяжением арматуры на бетон в построечных условиях (пост-напряжение). Преднапряжение может осуществляться как со сцеплением напрягаемой арматуры с бетоном, так и без сцепления. На данный момент технология со сцеплением арматуры с бетоном показала себя как наиболее эффективная при возведении мостовых пролетов и массивных балочных конструкций. Система без сцепления наиболее эффективна при возведении конструкций сравнительно небольшого сечения. Европейская и американская практика на протяжении 40 лет показывает, что в плитах перекрытий применение преднапряжения позволяет сократить толщину плиты с $1/30$ пролета до $1/40$ - $1/45$ пролета. Сокращение армирования при этом достигается на 1 м^3 до 35-45 кг ненапрягаемой арматуры и 10-15 кг напрягаемых канатов.

Отличие технологии «пост-напряжения» от широко известного «преднапряжения», заключается в том, что напрягаемая арматура натягивается после бетонирования и набора бе-

тоном достаточной передаточной прочности. Для того чтобы обеспечить возможность натяжения арматуры после твердения бетона, арматура должна иметь возможность свободного перемещения в бетоне, передача усилий на бетон осуществляется при помощи устанавливаемых на концы напрягаемых элементов анкерных устройств. Стоит отметить, что натяжение на бетон «со сцеплением» весьма трудоемко и требует высокой квалификации и ответственности инженеров и рабочих. Главной проблемой является качество инъецирования и защиты напрягаемой арматуры от попадания воды или воздуха и, соответственно, от коррозии. Причем, даже если удастся установить факт повреждения напрягаемой арматуры, ее замена без разборки конструкции не представляется возможной.

Эти обстоятельства послужили основными причинами повсеместного перехода на более простую и надежную технологию предварительного напряжения арматуры с натяжением ее на бетон. Эта относительно новая технология появилась в середине прошлого столетия. Принципиальное отличие состоит в том, что напрягаемые арматурные элементы покрываются защитной смазкой, которая обеспечивает им защиту от коррозии и отсутствие сцепления с бетоном. За счет этого напрягаемая арматура имеет возможность свободного перемещения относительно бетона, как в процессе натяжения, так и при эксплуатации конструкции. Напрягаемая арматура, как правило, располагается при этом в гладких полипропиленовых трубках, но может располагаться и на внутренних или внешних гранях железобетонного элемента.

В настоящее время технология преднапряжения в построечных условиях применяется практически во всех строящихся высотных зданиях из монолитного железобетона в США, Европе, Японии, Китае и других странах. Причем данная технология применяется в 80% случаев в жилищно-гражданском и дорожном строительстве и лишь в 20% случаев - при строительстве мостов, АЭС и др. уникальных сооружений.

Анализ, выполненный в работах [2, 3] пост-напряженных монолитных плит с напрягаемой арматурой, не имеющей сцепления с бетоном, обладают рядом преимуществ, которые особенно важно принимать во внимание при разработке проектов высотных зданий.

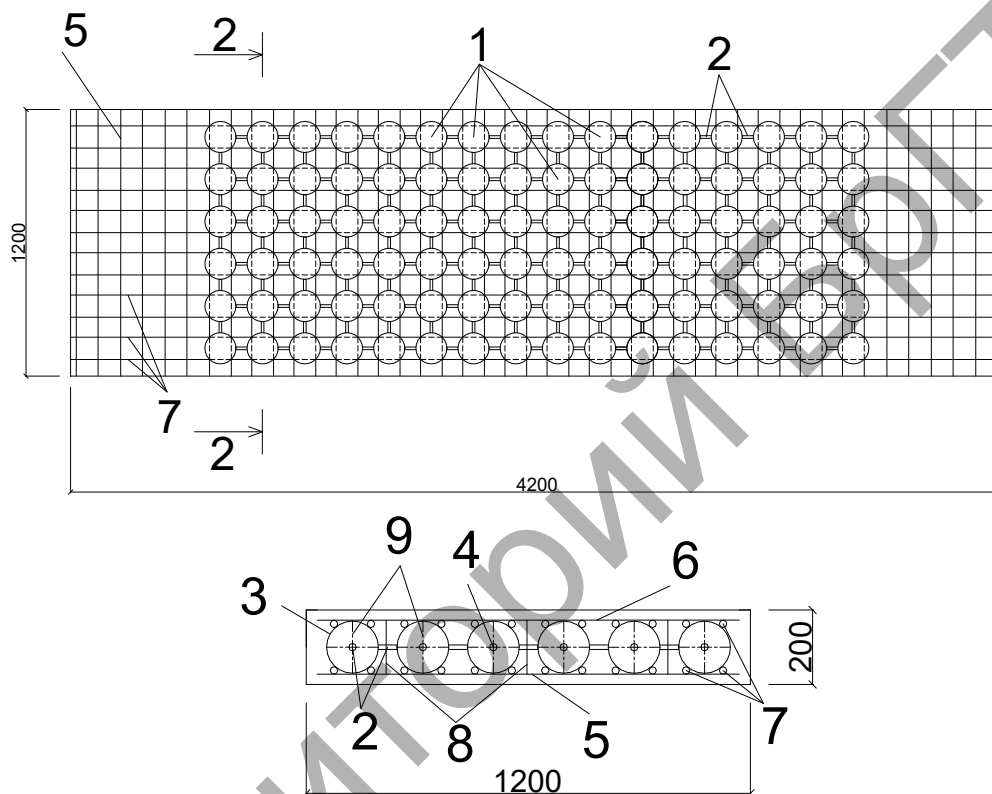
К этим важнейшим преимуществам следует отнести: улучшенные экономические показатели, включая снижение расхода материалов по сравнению с традиционными железобетонными и даже стальными конструкциями и как следствие снижение нагрузок от собственного веса перекрытий, что создает благоприятный эффект для наиболее нагруженных колонн нижних этажей и фундаментов; возможность создания больших пролетов при обеспеченных требованиях жесткости перекрытия; обеспечение высокой прочности на местный срез (продавливание) при соответствующем размещении напрягаемых арматурных элементов; сокращение сроков строительства и т.д.

Экспериментальные исследования балочного фрагмента монолитной пост-напряженной многпустотной плиты перекрытия.

В настоящее время специалистами Брестского государственного технического университета предложено эффективное решение монолитных перекрытий на основании разработанных собственных патентных решений пустотообразователей [4, 5, 6], главное предназначение которых заключается в снижении материалоемкости конструкции. Пустотообразователи представляют собой специальной конструктивной формы пластмассовые полые герметичные тела вращения (шары) с фиксаторами, расположенными снаружи сферы в ортогональных плоскостях перпендикулярных оси вращения и проходящей через центр плоскости. Преимуществом предлагаемого решения является то, что нет необходимости поштучной установки и фиксации пустотообразователей относительно арматуры, которая возникает в случае с пустотообразователями в виде труб или в виде легкобетонных вкладышей в форме прямоугольной призмы, что очень осложняет процесс установки. В представленном решении в специальных мастерских или на объекте пустотообразователи соединяются в блоки, что существенно облегчает их монтаж, снижает трудозатраты на установку и фиксацию. Блоки при этом формируются таких размеров, которые смогут обеспечить возможность их постановки на опалубку.

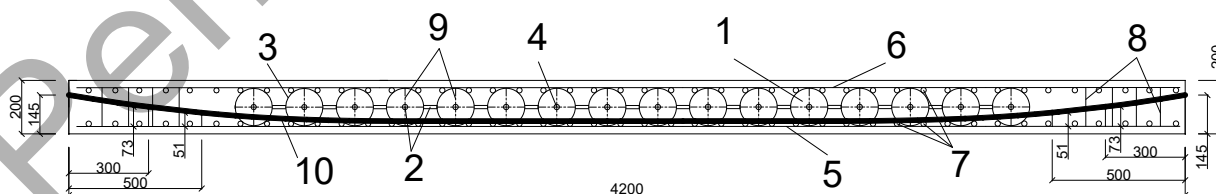
Проведенное технико-экономическое сравнение обычного и многопустотного перекрытия [7] показало что, применение данного решения позволяет сократить объем бетона более чем на 30 %, а, следовательно, и снизить собственную массу покрытий, что позволит уменьшить армирование при принятых пролетах плиты.

В статье приводится оценка напряженно-деформированного состояния предложенной конструкции эффективных перекрытий в варианте без предварительного напряжения и предварительно напряженной без сцепления арматуры с бетоном (пост-напряженной), конструкция которых представлены на рисунках 1 и 2 соответственно. Экспериментальные исследования балочных многопустотных плит перекрытия проводились в испытательном центре Брестского государственного технического университета.



- 1 – пустообразователь; 2 – фиксаторы (втулки, штыри); 3 – тело вращения; 4 – центр вращения тела; 5 – нижняя арматурная сетка с продольной рабочей арматурой $\varnothing 10S500$, шаг 200; 6 – верхняя арматурная сетка с продольной рабочей арматурой $\varnothing 6S500$, шаг 200; 7 – арматурные стержни; 8 – хомуты; 9 – ось вращения тела.

Рисунок 1 – Схема армирования плиты П-1



- 1 – пустообразователь; 2 – фиксаторы (втулки, штыри); 3 – тело вращения; 4 – центр вращения тела; 5 – нижняя арматурная сетка с продольной рабочей арматурой $\varnothing 6S500$, шаг 100; 6 – верхняя арматурная сетка с продольной рабочей арматурой $\varnothing 6S500$, шаг 100; 7 – арматурные стержни $\varnothing 6S500$; 8 – хомуты; 9 – ось вращения тела; 10 – семипроволочный канат в пластиковой оболочке Y1860S7 $\varnothing 15.7$ (2 шт).

Рисунок 2 – Схема армирования плиты П-2

Плита П-1 армировалась двумя вязаными сетками из арматуры класса S500: нижняя сетка с продольной рабочей арматурой $\varnothing 10S500$, установленной с шагом 200 мм и верхняя – с продольной рабочей арматурой $\varnothing 6S500$, установленной также с шагом 200 мм. В поперечном направлении верхней и нижней сеток установлены с шагом 200 мм арматурные стержни $\varnothing 6S500$. Для обеспечения несущей способности по наклонным сечениям и для фиксации положения арматурных сеток в приопорной зоне длиной 1000 мм с шагом 100 мм установлены арматурные шпильки из арматуры $\varnothing 6S240$.

Плита П-2 армировалась двумя сварными арматурными сетками из арматуры класса $\varnothing 6S500$. В продольном направлении были уложены два семипроволочных каната Y1860S7 $\varnothing 15.7$ в пластиковой оболочке по параболической траектории («трассе») на расстоянии 400 мм от краев плиты (1/3 от ширины плиты). После твердения бетона канаты подверглись натяжению при помощи домкрата-натяжителя арматуры. Плиты П-1 и П-2 имели пустотообразователи в виде полых шаров диаметром 140 мм, установленные с шагом 200 мм. Процент эффективного использования объема конструкции составляет 16.1%. Размеры сечения плит 1200x200(h), длина составляла 4,2 м.

Таблица 1 – Краткая программа испытаний

Серия плиты	Наличие преднапряжения	Размеры $b \times h \times L$, м	Средняя прочность бетона при сжатии f_{cm} , МПа ¹⁾	Армирование				
				количество	площадь, мм ²		Коэффициент армирования	
					A_{st}	A_{sp}	ρ_{st}	ρ_{sp}
П-1	Нет	1.2x0.2x4.2	33.43	6 $\varnothing 10S500$	471	--	0.196	--
П-2	Пост-напряжение	1.2x0.2x4.2	30.02	12 $\varnothing 6S500$ 2 $\varnothing 15.7Y1860S7$	339	274	0.141	0.114

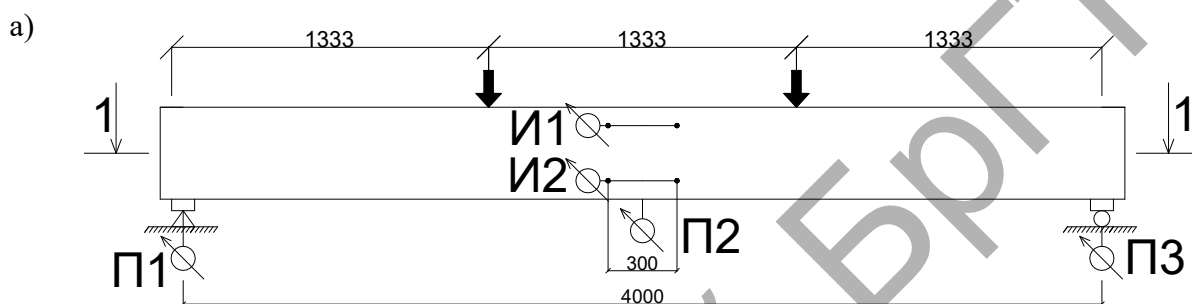
Примечание: ¹⁾ средняя прочность бетона при сжатии определена при испытании образцов-кубов

Загружение осуществлялось двумя сосредоточенными силами в 1/3 пролета, нагрузка прикладывалась ступенями по 0.5 т. Перед началом испытаний плиты в течение 10 минут подвергались пригрузу нагрузкой 5 кН в каждом пролете. После снятия пригруза осуществлялось рабочее нагружение, которое проводилось этапами, составляющими примерно 1/10 от ожидаемой разрушающей нагрузки, с выдержкой на каждом из них 10-15 мин. За это время снимались показания индикаторов, прогибомеров, фиксировалось образование и развитие трещин, замерялась ширина их раскрытия. Показания приборов на каждом этапе снимались дважды - сразу же после приложения нагрузки и после выдержки. Нагрузку создавали в силовых рамах гидравлическими домкратами, а величину прикладываемого усилия определяли по показаниям манометра. Общий вид плиты на опытной установке показан на рисунке 3.

Прогибы плит замерялись прогибомерами ПАО-6 в серединах пролетов, под грузами и над всеми опорами (для учета осадки опор). Измерение деформаций на верхней и нижней гранях плиты осуществлялось с помощью индикаторов перемещений часового типа с ценой деления 0,01 мм на базе 300 мм. Снятие показаний с приборов, как отмечалось, производилось на всех этапах нагружения. Непосредственно перед разрушением балок удавалось записать показания динамометра, что позволяло во всех случаях достоверно определить величину разрушающей нагрузки. На каждом этапе нагружения, вплоть до разрушения, на боковой поверхности опытных балок отмечали появление и зарисовывали развитие нормальных и наклонных трещин. Ширину раскрытия наиболее характерных трещин замеряли с помощью микроскопа МПБ-2 с ценой деления 0,05 мм. После исчерпания несущей способности опытные балки разгружались, производили снятие показаний со всех приборов, фиксировали остаточную ширину раскрытия трещин.

При проведении экспериментальных исследований определялись основные параметры, связанные с прочностью сечения, деформативностью, образованием и раскрытием трещин в плитах при изгибе, перераспределением усилий в элементе.

В результате экспериментальных исследований установлено, что плиты разрушились вследствие исчерпания несущей способности по нормальным сечениям. Плита П-1 с армированием стальной арматурой разрушилась в результате достижения предела текучести в стальной арматуре растянутой зоны. Плита П-2 с армированием двумя сварными сетками и двумя семипроволочными канатами с пост-напряжением разрушилась вследствие исчерпания прочностных и деформационных свойств бетона сжатой зоны. Для первой плиты П-1 разрушение произошло при нагрузке $F=65$ кН, для плиты П-2 разрушение произошло при нагрузке $F=45$ кН.



а) – схема испытания опытных плит; б) – общий вид испытательной установки
Рисунок 3 – Схема испытания и расстановки приборов

В результате испытаний установлено, что первые трещины в плите П-1 наблюдались в зоне чистого изгиба, в середине пролета, при изгибающем моменте 16.8 кН·м. Момент трещиностойкости нормальных сечений, определённый с использованием расчетной модели для

плиты П-1 $M_{cr,calc}$ составляет 17,4 кН·м. Отношение $\frac{M_{cr,test}}{M_{cr,calc}} = \frac{16.8}{17.4} = 0.96 > 0.95$, что соответствует принятой расчетной модели. Как видно из графика (рисунок 4) для плиты П-1 значение предельной нагрузки, при которой напряжения в растянутой арматуре достигают значений, соответствующих пределу текучести стальной арматуры, составляет $M_{sd,test} = 66.5 \text{ кН} \cdot \text{м}$.

Вместе с тем, несущая способность нормальных сечений плиты составляет $M_{rd,calc} = 55.3 \text{ кН} \cdot \text{м}$, отношение $\frac{M_{rd,test}}{M_{sd,calc}} = \frac{66.5}{55.3} = 1.2 \geq 0.95$.

Первые трещины в плите П-2 наблюдались в зоне чистого изгиба, в середине пролета, при изгибающем моменте 20 кН·м. С дальнейшим ростом нагрузки трещины отдалялись от зоны чистого изгиба. Образовывались трещины нормальные к продольной оси элемента. Ширина раскрытия существующих трещин увеличивалась. При разрушении произошло резкое раскрытие трещины, нормальной к оси испытываемого элемента.

В результате проведенных экспериментальных исследований опытных образцов установлено, что все испытанные плиты разрушились вследствие исчерпания несущей способности по нормальным сечениям.

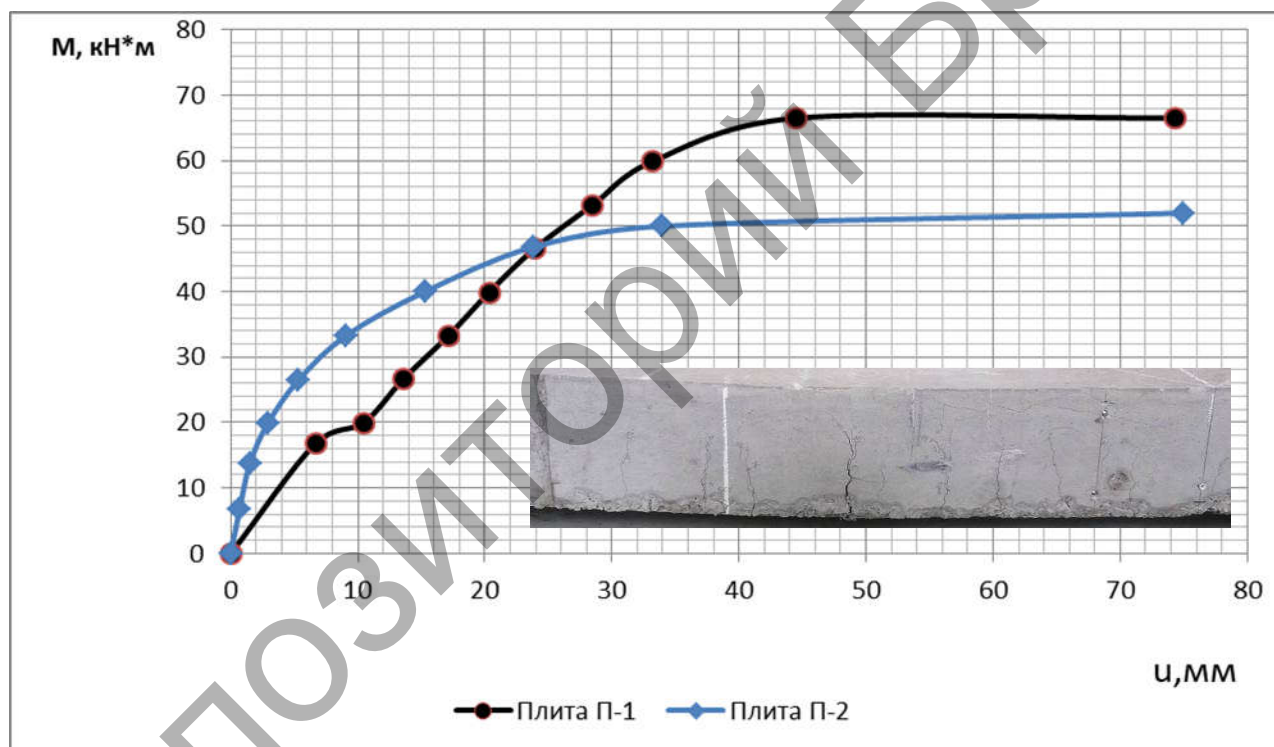


Рисунок 4 – Диаграмма зависимости прогиба от изгибаемого момента для плит П-1 и П-2

Выводы. Проведенное экспериментальное исследование позволило сделать следующие выводы:

1. Плиты перекрытий, имеющие предварительное напряжение, выполненное с натяжением напрягаемой арматуры на бетон или, так называемые, пост-напряженные конструкции, обладают целым рядом преимуществ и благодаря чему составляют значительную долю в мировой практике проектирования зданий и сооружений.

2. Внедрение новой конструктивной системы многопустотного перекрытия позволит не только значительно сократить расход материалов, но и снизить собственную массу конструкций перекрытий. Применение пустотообразователей значительно упрощает и ускоряет их монтаж непосредственно на конкретном объекте, что приводит к снижению экономических затрат на строительство.

Список источников

1. Сагадеев, Р.А.. Современные методы возведения монолитных и сборно-монолитных перекрытий. Учебное пособие/ Р.А. Сагадеев. – Москва, 2008 г. – 35с.
2. Тур, В. В., Образцов, О. Л. Комбинированно преднапряженные железобетонные конструкции с напрягаемой арматурой, не имеющей сцепления с бетоном// Строительная наука и техника, №2, 2007 – с. 17 – 31.
3. Тур, В. В., Карабанюк С., А. Проектирование параметров предварительного напряжения пост-напряженных плоских плит перекрытия // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2008. – № 1: Строительство и архитектура. – С. 179–184.
4. Пустотообразователь безбалочной плиты перекрытия: пат. 8418 Респ. Беларусь, Н.Н. Шалобыта, В.В. Тур, П.С. Пойта, Т.П. Шалобыта, Н.С. Цепаева, В.Н. Пчелин: заявитель Брест. гос. техн. ун-т. U 20120036: заявл. 16.01.2012, опубл. 16.04.2012 // Афицыйны бюл. / Нац. Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – С. 5.
5. Безбалочная монолитная плиты перекрытия: пат. 8475 Респ. Беларусь, Н.Н. Шалобыта, В.В. Тур, П.С. Пойта, Т.В. Пчелина, Н.С. Цепаева, В.Н. Пчелин: заявитель Брест. гос. техн. ун-т. U 20120106: заявл. 06.02.2012, опубл. 15.05.2012 // Афицыйны бюл. / Нац. Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – С. 5.
6. Безбалочная монолитная плиты перекрытия: пат. 8475 Респ. Беларусь, Н.Н. Шалобыта, В.В. Тур, П.С. Пойта, Т.В. Пчелина, Н.С. Цепаева, В.Н. Пчелин: заявитель Брест. гос. техн. ун-т. U 20120107: заявл. 06.02.2012, опубл. 15.05.2012 // Афицыйны бюл. / Нац. Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – С. 5.
7. Н.Н. Шалобыта, Е.А. Деркач // Экспериментальное исследование деформированного состояния плоского многпустотного железобетонно перекрытия с применением элементов системы VST. Вестник Брестского государственного технического университета. – 2014. – № 1(85): Строительство и архитектура. – С. 97–102.
8. Мельник, І.В. Конструктивно-технологічні особливості бетонних і залізобетонних конструкцій з ефективними вставками / І.В. Мельник // Міжвідомчий наук.-техн. зб.: Київ: 1999р. – Вип. 50. – с. 164-171.