

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ И РАСЧЕТОВ ФУНДАМЕНТОВ С СИСТЕМАМИ ЗАКРЫТЫХ ПОЛОСТЕЙ НА НЕОДНОРОДНЫХ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЯХ

Пойта П.С., Шведовский П.В., Клебанюк Д.Н.

Переход строительной индустрии на возведение многоэтажных зданий, связанный с ограниченностью свободных площадей застройки, обуславливает необходимость использования территорий с малоблагоприятными для строительства инженерно - геологическими условиями. Неоднородность деформационно - прочностных свойств грунтовых оснований приводит к перенапряжению в расчётных сечениях конструкций фундаментов и неравномерности их осадок, соответственно снижая прочность и долговечность отдельных частей и даже здания в целом. Это обуславливает необходимость поиска новых конструктивных решений и методов расчета в области фундаментостроения [1].

В настоящее время можно выделить ряд общих принципов развития, совершенствования и оптимизации фундаментных конструкций [2, 3]:

- снижение массы фундаментов и расхода материалов на единицу несущей способности;
- снижение трудоёмкости их устройства;
- создание конструкций, позволяющих вовлечь в работу максимальный объем грунта и получить более равномерное напряжённо - деформированное (НДС) состояние массива грунта в основании фундаментов и снизить концентрацию напряжений на границе «фундамент – основание»;
- разработка и уточнение расчётных схем грунтовых оснований.

Экспериментальные модельные исследования проведенные [4, 5] выявили специфическую особенности формирования НДС и соответственно вертикальных и горизонтальных перемещений грунтовых оснований и конструктивных элементов плитно-свайных фундаментов (ПСФ). На начальном этапе нагружения (строительство), когда нагрузки не превышают  $0,2N_{пр}$ , характерно незначительное равномерное уплотнение грунтового массива по всей глубине сжимаемой толщи, что обуславливает активное включение всех свай в работу.

При увеличении нагрузки до  $0,5N_{пр}$  начинается формирование уплотненной зоны в виде пирамиды под плитой-ростверком и противодействующей пирамиды в нижней части свайного поля, что вызывает перераспределение усилий между центральными, угловыми и краевыми сваями. При этом деформации центральных свай, расположенных в сильно уплотненной зоне, значительно замедляются.

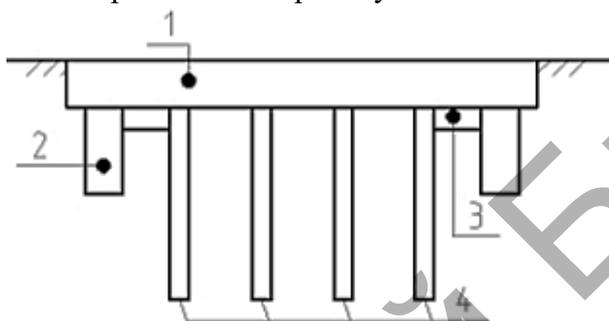
На этапе передачи полной проектной нагрузки резко возрастают деформации угловых и краевых свай, при практически полной стабилизации осадок центральных свай, что обуславливает значительную перегрузку угловых и крайних свай.

Аналогичную картину показывают и результаты компьютерного моделирования [6] на базе программного комплекса Plaxis 3D Foundation. Но при этом выявлены и некоторые другие особенности процесса восприятия фундаментом нагрузок. При нагружении до  $0,5N$  упругий массив грунта, вокруг центральных свай, перемещается практически параллельно со сваями и силы трения по боковой поверхности близки к нулю. Для краевых и угловых свай, у которых с одной стороны находится неподвижный массив грунта, характерно максимальное проявление сил трения, т.е. они воспринимают большую нагрузку чем центральные сваи. При дальнейшем нагружении перемещение грунта возникает уже около центральных свай, что обуславливает увеличение сил трения и создание пригрузки соседних зон, а это соответственно затрудняет выпор грунта и увеличивает лобовое сопротивление свай, т.е. большую часть нагрузки воспринимают центральные сваи. При этом нижняя граница зоны грунта, имеющая одинаковую осадку со сваями, перемещается с увеличением нагрузки снизу вверх. В зависимости от инженерно-геологических условий, конструкции и технологии погружения

свай, их длины, расстояния между ними и уровня нагрузки – эта зона может быть в пределах от 0,2 до 0,7 длины свай.

Петрухиным В.П. [4] также выявлено, что в случае достижения несущей способности краевой сваи по грунту, появляется обратный эффект, т.е. нагрузка на центральные сваи превышает нагрузку на крайние, при этом поверхность плиты-ростверка в крайних зонах выгибается, а материал в верхней зоне начинает работать на растяжение. В нижней же зоне плиты-ростверка проявляется обратный эффект. Отсюда при проектировании ПСФ учет эффекта «краевой сваи» обязателен. Конструктивно это обуславливает, в случае формирования в крайних и угловых зонах плиты-ростверка значительных изгибающих моментов, необходимость перехода к плитно-ребристым свайным фундаментам (рис.1).

Конструктивно этот фундамент является разновидностью ПСФ с периметральными вертикальными стенками, расположенными на некотором расстоянии от края плиты-ростверка и прилегающие к их внутренним граням безопорных участков.



- 1 – плита-ростверка; 2 – периметральная вертикальная стенка;  
3 – безопорные участки; 4 – свайное поле

Рисунок 1 – Конструктивная схема плитно-ребристого свайного фундамента

Вертикальные давления на грунт, которые концентрируются в краевой части плиты-ростверка обуславливают пригруз грунта основания, что приводит к существенному увеличению как активного, так и пассивного давления грунта на наружные грани стенки. Это приводит к формированию разгружающих моментов в краевой части плиты-ростверка и соответственно уменьшению ее прогиба. Безопорные участки способствуют уменьшению пригруза грунта у внутренних граней стенки и, соответственно, снижению активного давления грунта противодействующего разгружающим давлениям, что так же обуславливает уменьшение прогиба. Наибольшего эффекта можно достичь при нулевом активном и максимальном разгружающем давлении, т.е. когда безопорный участок выходит за пределы призмы обрушения, а расстояние от края плиты-ростверка до грани стенки перекрывает границу призмы выпирания. Как показывают расчёты для наиболее характерных инженерно-геологических условий и конструктивных решений многоэтажных зданий г. Бреста эти параметры следующие: высота стенки  $h_c = 0,8 + 0,9$  м; длина безопорного участка –  $0,9h_c$ ; расстояние от края плиты-ростверка до наружной грани стенки -  $1,6 + 1,9h_c$ .

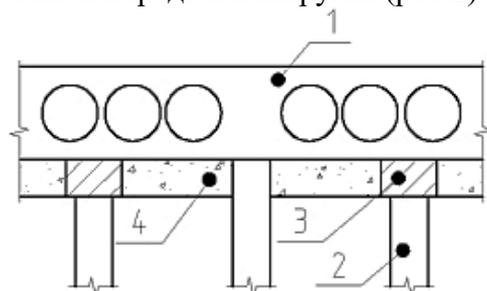
Одним из конструктивных решений по снижению материалоемкости и обеспечению минимального уровня неравномерности вертикальных напряжений и соответственно неравномерности осадок, является разнесенная схема размещения свайных рядов. Каждую из осей первого ряда свай расположенную со стороны поперечных стен, необходимо располагать относительно их оси со смещением определенным соотношением –

$$y = (0,05 + 0,1) \frac{a}{d} \cdot H + d, \quad (1)$$

где  $a$  – расчетный шаг размещения свай, м;  $d$  – диаметр свай, м;  $H$  – толщина фундаментной плиты, м.

При этом сваи следующих рядов также должны устанавливаться с меньшим шагом до линии проходящей через центральную часть здания. Величину уменьшения шага необходимо назначать в соответствии с изменением вертикальных напряжений в зоне сопряжения несущих элементов с ПСФ.

Целесообразно в качестве конкурентоспособного варианта рассматривать и конструктивную схему фундаментов с поэтапной передачей нагрузки (рис.2).



1 – плита-ростверк; 2 – сваи; 3 – полости заполненные низко модульным материалом; 4 – бетонная подготовка

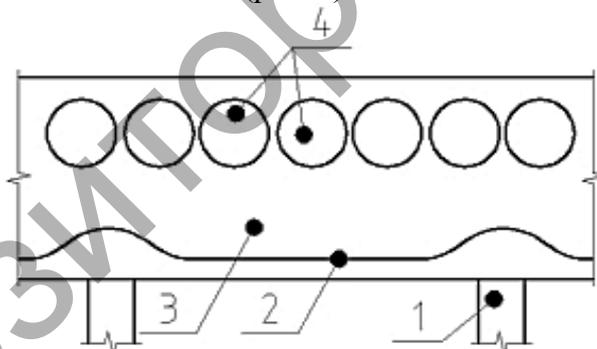
Рисунок 2 – Конструктивная схема фундамента с поэтапно циклической схемой передачи нагрузки

Их особенностью является то, что отдельные группы свай жестко объединены с плитой-ростверком, а все другие – через полости заполненные низко модульными материалами. Такая схема объединения позволяет на начальном этапе включить в работу не только плиту-ростверк, но и часть свайных групп, расположенных в зоне максимальных усилий.

Для еще более существенной передачи нагрузки на плиту-ростверк и соответственно снижения осадки целесообразно рассматривать и ПСФ с комбинацией коротких и длинных свай и с различной схемой их объединения – жесткая и полужесткая.

Длинные сваи располагают по осям несущих элементов (стен), а короткие – в промежутках между ними, при этом короткие сваи объединяют жестко с плитой-ростверком, а длинные – с образованием зазора, равного половине осадки, допустимой для конструктивной схемы здания, дополняя его легко сжимаемым материалом.

Достаточно эффективным может быть и конструктивное решение фундаментов из пост-напряженных плит на свайном основании (рис. 3).

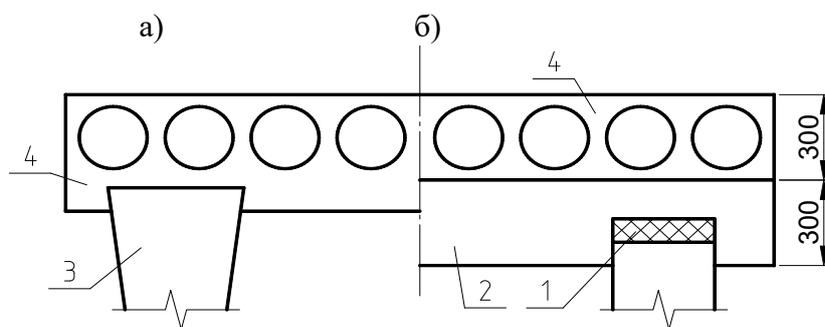


1 – сваи; 2 – напрягающий канат; 3 – плита-ростверк; 4 – система закрытых полостей

Рисунок 3 – Конструктивная схема фундамента из пост-напряженных плит на свайном основании

Применение напрягающих канатов, без сцепления с бетоном, способствуют формированию эквивалентных нагрузок, разгружающих плиту, что улучшает ее работу при продавливании, и создают сжимающие напряжения, компенсирующие растягивающие напряжения. Как показывают исследования [7], наиболее эффективно размещать напрягающие канаты на участках, непосредственно примыкающих к периметру колонн или несущих стен, с шириной  $b = c + h$ , где  $c$  – ширина колонны (несущих стен),  $h$  – толщина плиты-ростверка. Натяжение напрягающих канатов, согласно рекомендаций [7], осуществляется в два этапа: первый – 50% от фактического продавливающего усилия, при достижении передаточной прочности не менее 25 МПа и второй – полное натяжение при достижении проектной прочности.

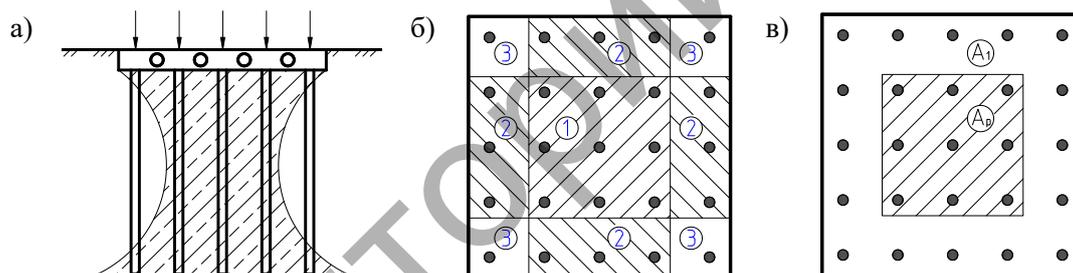
Не менее перспективными будут и конструктивные решения с применением свай с широкой пятой (рис. 4а), двухслойных плит (рис. 4б) с пластиковой подушкой и с силовой бетонной подготовкой.



1 – пластическая подушка; 2 – монолитный слой;  
3 – свая с широкой пятой; 4 – плита-ростверк

Рисунок 4 – Конструктивные решения плитно – свайных фундаментов:

Что касается методик расчётов, то большинство из них имеют общий недостаток - сложность, а зачастую неопределённость, учёта влияния особенностей формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового массива и межсвайного грунта на уменьшение жёсткости плитной части фундаментов. Как показывают экспериментально - теоретические исследования моделей ПСФ [2, 4, 6] при расчётах необходимо исходить из условия, что отпор грунта по подошве плиты-ростверка имеет форму пирамиды, основание которой отстоит от граней плиты на один шаг свай, что определяет необходимость её условного разделения на три зоны (рис. 5) и соответственно целесообразным конструктивным решением для фундаментов с системой закрытых полостей является раздельное сопряжение плиты-ростверка со сваями.



1 – расчетные зоны центральных; 2 – краевых; 3 – угловых свайных полей

Рисунок 5 – Расчётные схемы отпора грунта в основании (а) и схемы разбиения на расчетные зоны свайного поля (б) и плиты-ростверка (в)

Раздельное включение в работу плиты-ростверка и свай, при этом в начальный период загрузки в работу включается плита-ростверк, что обуславливает её возможность максимально продеформироваться и только затем в работу включаются сваи, что позволяет до 30% и более, от полной нагрузки, передать на плитную часть и существенно снизить материалоемкость фундаментов.

Такая схема работы, т.е. формирование двух сжимаемых толщ – под плитой-ростверком и нижними концами свай, определяет и соответствующую методику расчетов:

- определяются давления под плитой-ростверком  $P_{пл}$  –

$$P_{пл} = \frac{\alpha_1 + \sqrt{\alpha_1^2 + \frac{4S_{пл}E}{k\gamma\beta}}}{2} \cdot k\gamma \quad (2)$$

где  $\alpha_1$  – глубина заложения подошвы плиты-ростверка;  $S_{пл}$  – допустимая осадка плитной части;  $k$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от ширины плитной части;  $\beta$  – безразмерный коэффициент, определяющий поперечное расширение и боковое давление;  $\gamma$ ,  $E$  – усредненные характеристики грунтовой толщи;

- определяется расчетная нагрузка  $N$  на сваи длиной  $l > H_c$ , где

$$H_c = \frac{P_{пл}}{k \cdot \gamma} - d_1; \quad (3)$$

- определяется расстояние между осями свай по зависимости

$$l = \sqrt{\frac{1}{d^2} \cdot \frac{N}{P - P_{пл}}}, \quad (4)$$

с проверкой условия

$$P_N = P - P_{пл}, \quad (5)$$

где  $P_N$  – давление в уровне подошвы свай;  $d$  – диаметр свай;  $P$  – полное давление под подошвой плитной части;

- осуществляется проверка соответствия главному условию

$$S_{пл} + S_N \leq S_u, \quad (6)$$

где  $S_{пл}$  – осадка плитной части,  $S_N$  – осадка свай,  $S_u$  – предельно допустимая осадка фундамента.

Расчеты осадок выполняются по формулам для равномерно нагруженного слоя грунта.

Для определения усилий в плите-ростверке при точечных опорах (каркасные здания) рекомендуется использовать метод "заменяющих балок". Заменяющие балки образуются в двух взаимно перпендикулярных направлениях путем рассечения плиты-ростверка вертикальными плоскостями параллельными разбивочным осям колонн через середины смежных пролётов.

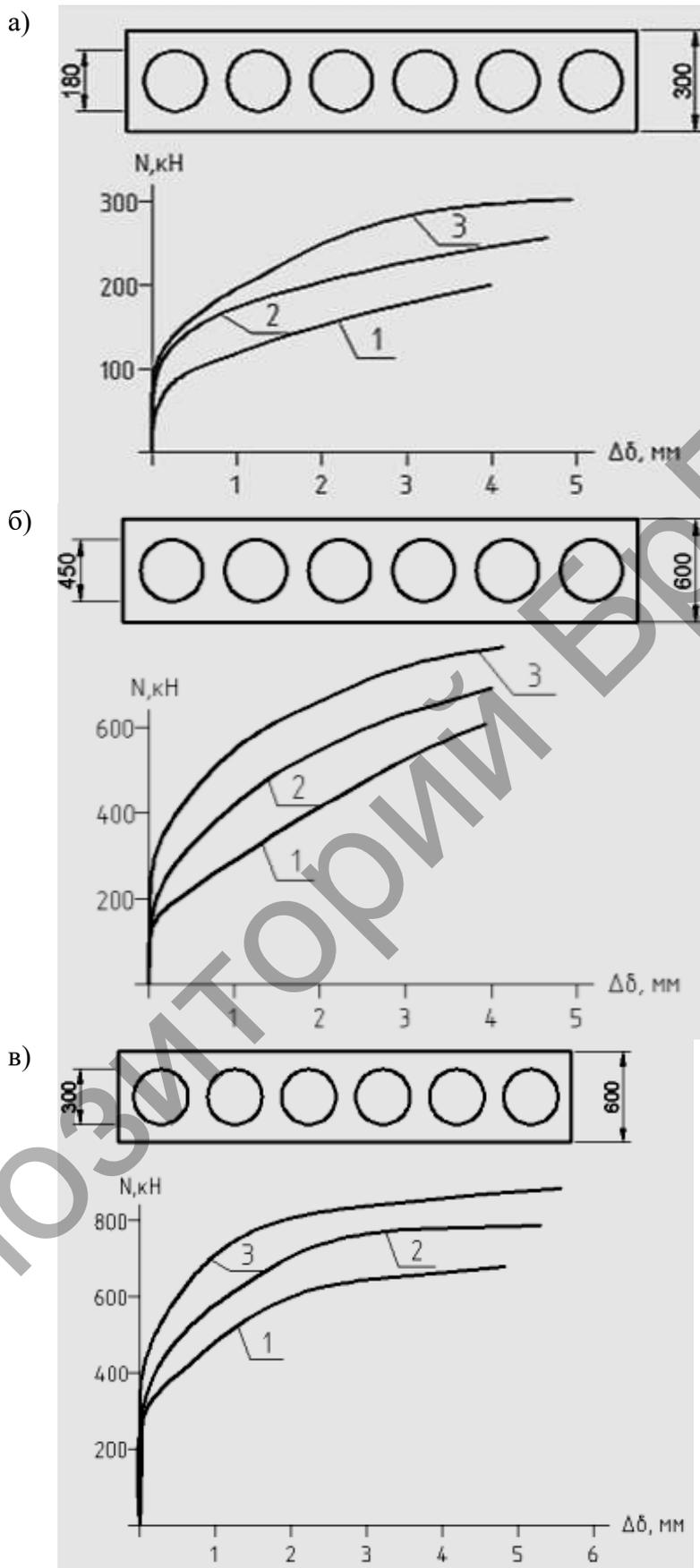
Этот метод позволяет представить заменяющую балку в виде полосы шириной, равной расстоянию между серединами двух соседних пролетов, примыкающих к соответствующему ряду колонн.

Разбивая условно площадь плиты-ростверка на подколонные и средние пролетные полосы, можно рассчитать соответствующие эпюры изгибающих моментов и по пролетным моментам подобрать верхнюю арматуру, а по опорным – нижнюю.

Экспериментальные данные [8], полученные при испытании плит-ростверков с системой закрытых полостей техническим университетом (г.Дормштадт) и кафедрами строительных конструкций Санкт-Петербургского и Брестского государственных технических университетов [9, 10] позволили построить графики зависимостей нагрузок и величин деформаций  $\Delta\delta = f(N, c)$  (рис. 6).

Анализ графиков позволяет отметить, что разрушающая нагрузка на фундаменты с системой закрытых полостей зависит как от соотношения  $\frac{t}{d}$ , где  $t$  – толщина плиты-ростверка,  $d$  – диаметр сферических пустот, так и от класса бетона (С). Повышение класса бетона в 2,5 раза увеличивает разрушающую нагрузку ( $N$ ) практически в два раза. Максимальный прогиб плиты-ростверка не превышает 1-3 мм.

Результаты компьютерных расчётов для экспериментальных проектируемых объектов позволяют отметить, что снижение материалоемкости ПСФ под многоэтажные здания, используя систему закрытых полостей, формируемых пустообразователями - в виде модулей из пустотелых конструкций "Eco-Line" или "Slim-Line", эффективно как для каркасных, так и крупнопанельных зданий с этажностью до 10-15 этажей. Большую роль при этом играют особенности грунтовых оснований. Возможная площадь расположения систем закрытых полостей, не может превышать 11,9 % от общей площади плиты-ростверка.



1 – для бетона С20/25; 2 – для бетона С35/45; 3 – для бетона С50/60

Рисунок 6 – Конструктивные схемы экспериментальных плит-ростверков с системой закрытых полостей и график зависимости нагрузок (N) и величин деформаций ( $\Delta\delta$ )

Что касается устройства закрытых полостей в зоне пирамиды продавливания сосредоточенных нагрузок (колонн), то как показали результаты имеющихся экспериментов и проведенные расчёты, это возможно только для зданий высотой не более 10 этажей с пустообразователями с соотношением  $\frac{b}{a} > 2$  и классе бетона плитной части C50/60.

Для всех же зданий с этажностью более десяти, устройство закрытых полостей в зоне 3b вокруг колонны недопустимо, где b – ширина сечения колонны. Диапазон неразрушающих нагрузок, определяемый величинами напряжений в основании плиты-ростверка с закрытыми полостями, соответственно составляет: для 10 – этажных зданий – 180-290 кПа, 22-ух – 340-450 кПа и 32-ух – 540-670 кПа.

При этом в расчетах жесткость областей размещения закрытых полостей в плите-ростверке должна быть уменьшена до 10% по отношению к расчетной жесткости плиты-ростверка с постоянной толщиной. Соответственно необходимо учитывать и снижение сопротивления сдвигу с коэффициентом 0,85.

Бесспорно, что предлагаемые некоторые рассмотренные конструктивные решения фундаментов и методики их расчетов, при экспериментальной проверке, потребуют значительной коррекции, с учетом конструктивных схем зданий и спецификой инженерно – геологических условий. Но в любом случае они позволяют снизить материалоемкость и стоимость нулевого цикла до 5% и более, по сравнению с традиционными.

#### Список источников

1. Шумятьев, О.Ф. Фундаменты высотных зданий / О.А. Шумятьев // Вестник ПНИПУ, «Строительство и архитектура». №4. – М., 2014. – С. 203 -245.
2. Оржеховский, Ю.Р. Плитно – свайные фундаменты как способ решения сложных геотехнических проблем / Ю.Р. Оржеховский, В.В. Лушников, Р.Я. Оржеховская, А.С. Ярдяков / Академ. вестник УралНИИпроекта, РААСН, 2015. – С. 82 – 86.
3. Ильичев, В.А. Принципы проектирования оснований и фундаментов высотных зданий, учитывающие их геотехнические особенности / В.А. Ильичев, В.П. Петрухин, В.И. Шейнин // Современное высотное строительство. ГУН «ИГЦ Москомархитектуры». – М., 2007. – С. 255 – 261.
4. Петрухин, В.П. Эффект краевой сваи и его учет при расчете плитного ростверка / В.П. Петрухин, С.Г. Безволев, О.А. Шулятьев и др. // Развитие городов и геотехническое строительство, М., НИИОСП №11, 2007 – с. 90-97.
5. Береснев, А.С. О распределении заданного нагружения между плитой и сваями в плитно – свайном фундаменте / А.С. Береснев, А.Ю. Большаков, Г.Н. Гусев, В.В. Коркодинов, Б.Н. Пименов // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2008. – Volume 4, Issue 2. – P. 33.
6. Мирсаяпов, И.Т. Моделирование напряженно – деформированного состояния плитно – свайного фундамента при совместном деформировании с окружающим грунтовым массивом / И.Т. Мирсаяпов, Д.А. Артемьев // Вестник гражданских университетов. – С-Петербург, 2009. - №2. – С. 121 – 124.
7. Тур, В.В. Применение пост – напряженных плоских плит при устройстве фундаментов на слабых грунтах /В.В. Тур/ Сб. статей Междунар. НТС по геотехнике в рамках ISSMGE «Теория и практика внедрения еврокодов по геотехнике в европейских странах и Республике Беларусь», БрГТУ, Брест, 2018 – с. 98 – 104.
8. Отчет о результатах исследования несущей способности Cobiax – перекрытий из пустотелых блоков при нагрузке силами сдвига. Технический университет Дормштадта. – 2008. – 37 с.
9. Чураков, А.Г. Двухосная пустотная плита с инновационными видами пустот / А.Г. Чураков // Строительство уникальных зданий и сооружений, 2014, - №6(21), С-Петербург, с. 71-81.
10. Коцюра, И.П. Экспериментальные исследования балочного фрагмента монолитной многопустотной литы перекрытия / И.П. Коцюра, Е.А. Деркач, Н.Н Шалобыта // Вестник ГТУ, т. 6, №2. – 2016. – С. 74 – 82.
11. Катценбах, Р. Опыт оптимизации стоимости фундаментов высотных зданий / Р. Катценбах, Ш. Леппла, М. Фоглер, Р.А. Дунаевский, Х. Куттинг // Научно-технический и производственный журнал. Жилищное строительство. – 2010. - №5. – С. 7 – 13.