

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.154.1

*МАРИНИЧЕВ МАКСИМ БОРИСОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
marinichev@list.ru
Кубанский государственный аграрный университет,
350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13*

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СВАЙНО-ПЛИТНЫХ ФУНДАМЕНТОВ С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ПОДУШКОЙ НА ПРИМЕРЕ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ В СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЙОНАХ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ

Рассмотрен пример реализации свайно-плитного фундамента с промежуточной подушкой для высотного здания, возведенного в г. Краснодаре. Здания с такой высотой и этажностью в последнее десятилетие получили широкое практическое внедрение в крупных городах Краснодарского края, что привело к необходимости системного подхода при выборе типа фундамента и технологии его выполнения. Приведены методы расчета и конструирования фундамента, обоснована его высокая эффективность, а также представлены данные геотехнического мониторинга, описывающего процесс развития деформаций выполненного фундамента.

Ключевые слова: фундамент; мониторинг; свая; свайно-плитный фундамент; фундамент с промежуточной подушкой; слабый грунт; деформации; плитный фундамент.

*MAKSIM B. MARINICHEV, PhD, A/Professor,
marinichev@list.ru
Kuban State Agrarian University,
13, Kalinina Str., 350044, Krasnodar, Russia*

EFFICIENCY ASSESSMENT OF PILED RAFTS WITH INTERMEDIATE LAYER IN HIGH-RISE BUILDINGS LOCATED IN SEISMIC AREAS OF THE KRASNODAR REGION

The paper deals with the implementation of combined piled-raft foundation (CPRF) with the intermediate layer in a high-rise building in the Krasnodar-city. Such buildings are widely used in big cities of the Krasnodar region. Thus, the systems approach is required to choose the type of foundations and its technology. Calculation and design methods are suggested for

CPRF construction and its efficiency is assessed. Also, the results of geoenvironmental monitoring are given for the deformation process observed in combined piled-raft foundation.

Keywords: foundation; monitoring; pile; combined piled-raft foundation; intermediate layer; soft soil; deformation; raft foundation.

Введение

При проектировании и строительстве зданий и сооружений в сейсмических районах довольно часто применяют фундамент на естественном основании [2, 5–7, 9]. На участках, где свойства грунтов не позволяют использовать фундамент в виде сплошной плиты, как правило, используют свайный фундамент. Высокие горизонтальные нагрузки, возникающие в сваях при сейсмическом воздействии, часто приводят к необходимости увеличения их числа. В таких случаях эффективным решением может быть свайно-плитный фундамент с промежуточной подушкой, которая отделяет конструкцию фундамента от надземного строения и служит подобием скользящей опоры¹. Тогда горизонтальные нагрузки практически не передаются на головы свай, что сразу приводит к уменьшению их количества в составе фундамента, а также существенному снижению процента армирования свай. Кроме того, значительно проще добиваться соблюдения требования по устойчивости грунта, окружающего сваю в области боковой поверхности. Однако технология выполнения подобных технических решений, методы их расчета и, главное, натурные наблюдения за поведением зданий и сооружений с такими фундаментами проработаны не в достаточном объеме, несмотря на все неоспоримые преимущества [3, 4]. В целом, при реализации фундаментной конструкции с промежуточной подушкой при выполнении вертикальных несущих элементов фундамента могут использоваться различные геотехнологии.

Необходимых свойств основания добиваются за счет введения в толщу грунта элементов повышенной прочности, которые хорошо работают на сжатие и имеют развитую боковую поверхность, обеспечивающую высокое сцепление и трение с окружающим грунтом [1, 3, 4, 8, 10]. В настоящее время распространённым методом, применяемым в высотном строительстве, является использование в качестве армирующих элементов свай, выполненных по различным технологиям:

- забивные сваи;
- буровые сваи;
- грунтоцементные сваи (технология Jet grouting);
- песчаные или щебенистые сваи.

Основными задачами армирования оснований являются: упрочнение и повышение устойчивости оснований плитных фундаментов зданий, укрепление насыпей и откосов земляных сооружений, а также исключение выпора грунта из-под сооружений.

¹Рекомендации по проектированию свайных фундаментов с промежуточной подушкой для зданий и сооружений, возводимых в сейсмических районах / НИИ оснований им. Н.М. Герсеванова при уч. института «Фундамент-проект». Кишинев: ЦК КП Молдавии, 1974.

1. Возможность расчета и моделирования свайно-плитных фундаментов с промежуточной подушкой

Основными методами прогнозирования деформаций зданий на сегодняшний день являются нормативные документы (СП 22.13330.2011² и СП 24.13330.2011³) и конечно-элементные программные комплексы (MIDAS GTS NX, PLAXIS 3D, Лира, Ing+, SCAD и др.).

Нормативными методиками предлагаются упрощенные расчеты взаимодействия здания и основания, где основание рассматривается в виде линейно-деформируемого полупространства с осредненными в пределах сжимаемого слоя H значением коэффициента Пуассона грунта ν и модуля деформации грунтов основания E .

Современные компьютерные технологии позволяют рассматривать различные ситуации при строительстве и эксплуатации зданий. Также сегодня возможно оценивать работу конструкций в целом во всем здании со всем многообразием нагрузок и воздействий. Трехмерный нелинейный конечно-элементный расчет используется при решении широкого круга задач механики твердого деформируемого тела, а также успешно применяется в других отраслях науки. При решении геотехнических задач в расчетных комплексах моделируется массив грунта, конструкция фундамента и надземное сооружение, что позволяет более реально оценивать взаимодействие системы.

2. Возможные методы выполнения геотехнического мониторинга

Ни один из программных комплексов не может быть принят как достоверный инструмент для прогнозирования развития осадок зданий и сооружений. Только натурные измерения способны проверить выполняемые расчеты и подтвердить безаварийную эксплуатацию зданий в период их строительства и дальнейшей эксплуатации.

На сегодняшний день для мониторинга зданий и сооружений используются:

- геодезические наблюдения за деформациями;
- GPS-мониторинг;
- лазерное сканирование высотных объектов.

Геодезический мониторинг подразумевает геодезические наблюдения за деформациями строящихся зданий и сооружений, а также за зданиями, находящимися в зоне влияния строительства. Целью геодезического мониторинга является своевременное выявление критичных величин деформаций, установление причин их возникновения, составление прогнозов развития деформаций, выработка и принятие мер для устранения нежелательных процессов.

Методика GPS-мониторинга здания во многом подобна традиционным геодезическим наблюдениям. При создании системы мониторинга по периметру высотного здания и на отдельных конструктивных элементах устанавлива-

² СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83* / Институт ОАО «НИЦ «Строительство» (НИИОСП им. Н.М. Герсеванова). М.: Минрегион, 2011.

³ СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03–85* / Институт ОАО «НИЦ «Строительство» (НИИОСП им. Н.М. Герсеванова). М.: Минрегион, 2011.

ются высокоточные GPS-приемники, а также создается опорная сеть на основе базовых станций, расположенных вне зоны влияния сооружения. Определяя координаты контрольных точек и сопоставляя результаты измерений в отдельных точках, можно получить изменение пространственного положения здания в целом и перемещение конструктивных элементов относительно друг друга.

Наиболее продвинутым методом наблюдений за деформациями здания является их лазерное сканирование. Суть технологии заключается в определении пространственных координат точек поверхности объекта посредством измерения расстояния до всех точек с использованием лазерного безотражательного дальномера. При каждом измерении луч дальномера отклоняется от своего предыдущего положения так, чтобы пройти через узел некоей мнимой нормальной сети, называемой сканирующей матрицей. Количество строк и столбцов матрицы может регулироваться. Чем выше плотность точек матрицы, тем выше плотность точек на поверхности объекта. Результатом измерений является некое множество точек с трехмерными координатами.

3. 25-этажный жилой дом по ул. Монтажников в г. Краснодаре

Выполнение свайно-плитных фундаментов является наиболее экономичным при использовании свай заводского изготовления [11]. Однако забивка свай как динамический процесс приводит к развитию вблизи существующих зданий дополнительных осадок от динамических воздействий, конструкции получают повреждения от действия инерционных сил в радиусе до 30 м и более. Поэтому очень важно учитывать плотность городской застройки при проектировании и строительстве фундаментных конструкций тяжелых зданий на участках с уже сложившейся инфраструктурой. При отсутствии должного внимания полученные дополнительные осадки и крены существующих зданий могут повлечь за собой аварийные ситуации. Для таких зданий на неравномерно сжимаемых и слабых грунтах необходимо использовать свайные фундаменты из буровых или грунтоцементных свай, которые позволяют практически полностью исключить динамические воздействия на соседние здания.

Подобная инженерно-геологическая ситуация сложилась при строительстве 25-этажного жилого дома по ул. Монтажников в г. Краснодаре (рис. 1).

При проектировании высотного здания были проанализированы инженерно-геологические условия данной площадки, основными осложняющими особенностями которой стали просадочные грунты ИГЭ-1, расположенные вблизи поверхности ($P_{st} = 170$ кПа). В средней части разреза выявлен слой торфа сильноразложившегося ИГЭ-4 мощностью до 1 м (таблица и рис. 1).

Здание, проектируемое в таких инженерно-геологических условиях, предусматривает перекрестно-стеновую конструктивную систему. Высота здания достигает 78 м и состоит из 25 этажей. Общая масса составляет около 26 480 т. Среднее распределенное давление по подошве фундамента составляет $P_{cp} = 350$ кПа.

Для прогнозирования осадок такого тяжелого сооружения в рассматриваемых инженерно-геологических условиях площадки строительства были выполнены пространственные расчеты для нескольких вариантов фундаментов.

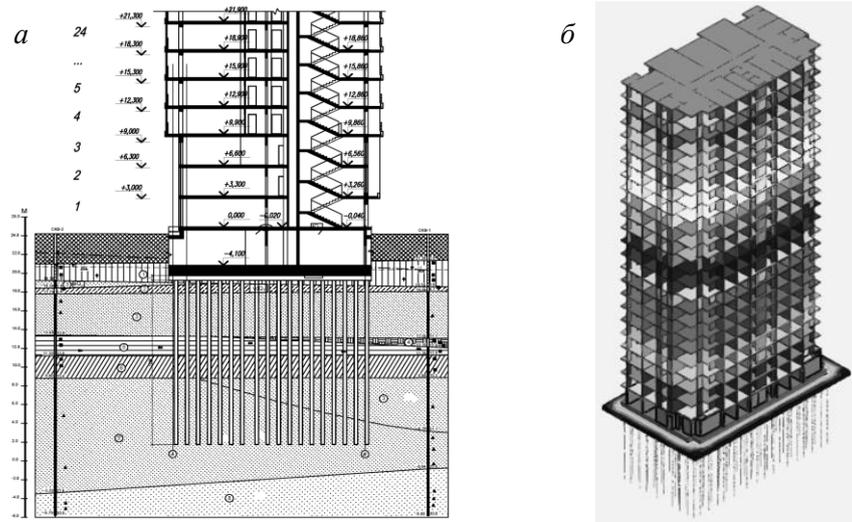


Рис. 1. 25-этажный жилой дом по ул. Монтажников в г. Краснодаре:

a – грунтовые условия площадки строительства, совмещенные с техническим решением фундаментов; *б* – общий вид пространственной модели исследуемого здания в ПК MIDAS GTS NX

Сводная таблица физико-механических характеристик грунтов

№	Полное наименование грунта	Мощность, м	ρ , г/см ³	C , кПа	φ , град	E , МПа
	Насыпной неоднородный слежавшийся грунт	2,1–2,8	–	–	–	–
1	Суглинок просадочный	1,8–2,8	1,83	19	20	14/7*
2	Супесь пластичная	0,5–0,6	1,99	12	14	10,5
3	Песок мелкий	4,8–6,0	1,96	–	32	23,0
4	Торф сильно разложившийся	0,9–1,0	1,16	23	19	1,0
5	Глина тугопластичная, слаботорфованная	0,9–1,1	1,88	43	17	5,0
6	Суглинок тугопластичный	2,4–4,1	1,89	27	18	17,6
7	Песок мелкий, плотный	3,9–4,3	2,02	–	34	32
8	Песок средней крупности, плотный	Более 5,0	2,05	–	34	32

* В водонасыщенном состоянии.

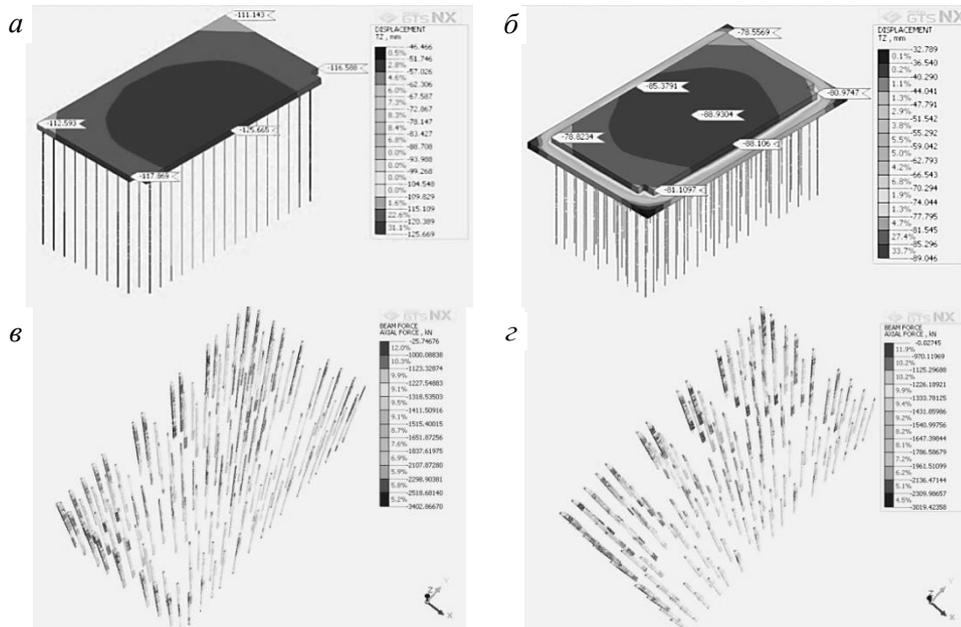
Первым из вариантов рассмотрен плитный фундамент, для которого была назначена толщина фундаментной плиты $h = 1000$ мм. В результате расчетов выявлены значительные деформации плиты, а также недопустимый крен в сторону поднятия слоя торфа и уменьшения мощности слоя ИГЭ-3. Выявленный факт привел к недопустимости применения плитного фундамента в данных грунтовых условиях. Напряжения, вызванные весом здания, превышают начальное просадочное давление ($P_{st} = 170$ кПа) во всех точках под подошвой фундамента. Таким образом, к расчетным деформациям добавятся деформации просадки.

В этой ситуации рассматривался второй вариант фундамента с заменой просадочного слоя на слой с высокими механическими и жесткостными характеристиками (малодеформируемый щебенистый слой толщиной 1000 мм, $E_0 = 40$ МПа, $C = 20$ кПа, $\varphi = 35^\circ$).

В результате сравнения вариантов установлено, что замена просадочного грунта способствовала снижению осадок на 15 % в среднем. Однако данный вариант устройства фундамента проблему значительных осадок не решил, но их неравномерность снизилась благодаря деформационным характеристикам подушки из щебня.

Поскольку ни один из двух рассмотренных вариантов плитного фундамента не удовлетворял требованиям расчета оснований по второй группе предельных состояний, было принято решение о рассмотрении других вариантов фундаментов с использованием свай для передачи нагрузок на более прочные грунты основания.

Третьим вариантом технического решения фундамента здания стал свайно-плитный фундамент из буровых свай длиной 20 м и диаметром 700 мм (рис. 2, а), т. к. при его устройстве практически отсутствуют динамические нагрузки на рядом расположенные здания и сооружения. В результате расчетов были получены осадки здания, удовлетворяющие нормативным требованиям ($S_{\max} = 126$ мм). Однако в ходе расчетов полученные усилия и моменты сил в сваях привели к формированию на их боковой поверхности напряжений, которые оказались намного больше прочности грунта, окружающего сваю.



В качестве четвертого варианта фундамента было использовано техническое решение – плитный фундамент на армированном основании (свайно-плитный фундамент с промежуточной подушкой). Данное решение отличается от предыдущего (третий вариант) тем, что между фундаментом и сваями нет конструктивной связи. Между оголовками свай и плитным ростверком расположена промежуточная подушка из малосжимаемого материала, позволяющая при сейсмическом воздействии существенно снизить горизонтальные усилия, возникающие в сваях.

В результате расчетов, проведенных по четвертому варианту, удалось установить, что прогнозная максимальная осадка здания составит около 89 мм (рис. 2, б), что на 67,6 % меньше, чем при использовании плитного варианта фундамента. Также было отмечено, что максимальная нагрузка на сваю уменьшилась примерно на 400 кН (рис. 2, в). Данный факт говорит о перераспределении нагрузок, передаваемых на основание между фундаментной плитой и свайным основанием. В данном случае такое перераспределение позволяет более полно использовать несущую способность плитного ростверка.

4. Сопоставление расчетных и фактических деформаций

Рассматриваемое высотное здание не только построено с применением прогрессивного вида фундамента, но за его осадками также ведется геотехнический мониторинг (рис. 3).

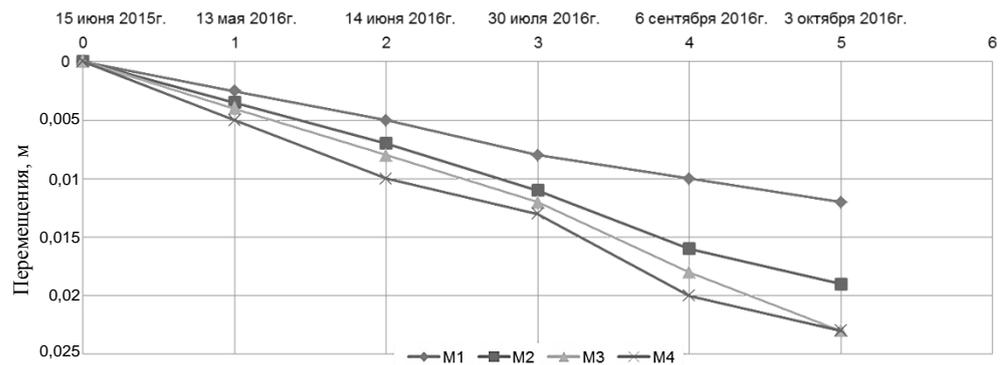


Рис. 3. Осадки углов здания в зависимости от циклов измерений (измерения осадок начаты в момент завершения 9-го этажа здания)

Из графиков видно, что углы здания перемещаются достаточно равномерно. Полученные значения соответствуют допустимым значениям.

На рис. 4 показано сопоставление измеренных и расчетных осадок для исследуемого жилого дома.

Из результатов сопоставления видно, что расчетные осадки несколько превышают измеренные на текущем этапе строительства. Данный результат можно объяснить двумя факторами:

– недостаточной изученностью инженерно-геологического строения грунтов оснований;

– высокой распределительной способностью системы «армированное грунтовое основание – промежуточная подушка – фундаментная плита – надземное строение».

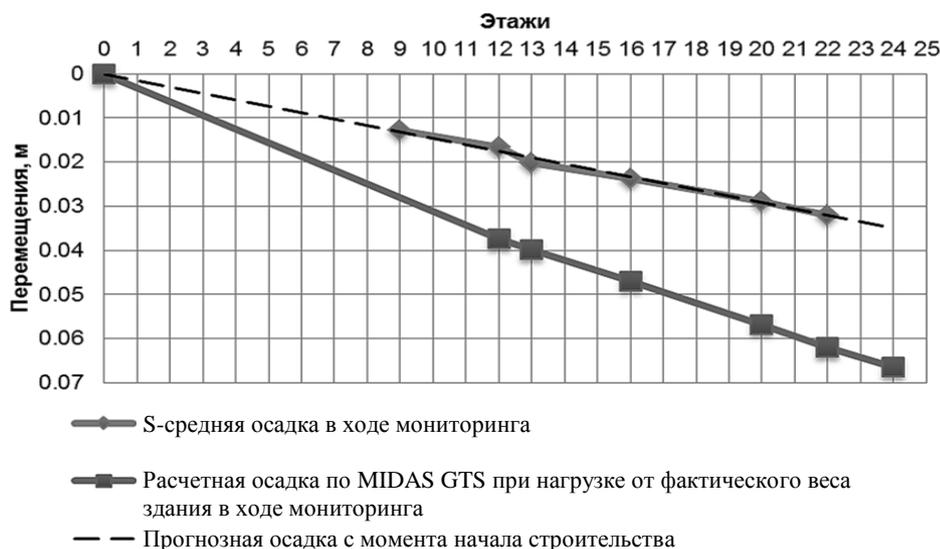


Рис. 4. Зависимость осадки здания от этажности (измеренная/расчетная)

Выводы

1. В процессе расчета фундаментов высотных зданий вероятность развития значительных горизонтальных нагрузок, в том числе сейсмических воздействий, приводит к необходимости учета важных особенностей при конструировании фундаментов. Хорошо известна распределительная способность свайно-плитных фундаментов, однако при жесткой заделке свай в фундаментную плиту в узлах заделки возникают горизонтальные усилия, которые значительно превышают несущую способность тела сваи и формируют недопустимые напряжения в грунте и по боковой поверхности сваи. Промежуточная подушка, отделяющая фундаментную плиту от группы свай, не только минимизирует горизонтальные воздействия в области свайных оголовков, но и повышает распределительную способность свайно-плитного фундамента.

2. В конечном итоге установлена высокая эффективность использования свайно-плитных фундаментов с промежуточной подушкой для строительства высотных зданий на неравномерно сжимаемых грунтах в сейсмических районах. Описанный способ конструирования фундаментов приводит к снижению затрат и сокращению сроков строительства, а достоверность подтверждается данными геотехнического мониторинга.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мирсаяпов, И.Т. Экспериментально-теоретические исследования работы армированных грунтовых массивов / И.Т. Мирсаяпов, А.О. Попов // Известия КазГАСУ. – 2008. – № 2. – С. 75–80.

2. Шадунц, К.Ш. К расчету зданий и сооружений на сложных, неравномерно сжимаемых основаниях / К.Ш. Шадунц, М.Б. Мариничев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2003. – № 2. – С. 7–10.
3. Мариничев, М.Б. Разработка конструктивного решения вертикально армированного основания плитного фундамента высотного здания в сейсмическом районе / М.Б. Мариничев, И.Г. Ткачев // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении : материалы Международной научно-технической конференции. – Новочеркасск : ИД «Политехник», 2015. – С. 272–281.
4. Мариничев, М.Б. Практическая реализация метода вертикального армирования неоднородного основания для компенсации неравномерной деформируемости грунтового массива и снижения сейсмических воздействий на надземное сооружение / М.Б. Мариничев, И.Г. Ткачев, Ю. Шлее // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 10 (094). – Условия доступа : <http://ej.kubagro.ru/2013/10/pdf/51.pdf>
5. Шадунц, К.Ш. Плитные фундаменты многоэтажных зданий на просадочных грунтах / К.Ш. Шадунц, М.Б. Мариничев // Жилищное строительство. – 2003. – № 11. – С. 16–18.
6. Шадунц, К.Ш. Особенности деформаций днищ резервуаров / К.Ш. Шадунц, М.Б. Мариничев, В.В. Угринов // Промышленное и гражданское строительство. – 2004. – № 3. – С. 28–29.
7. Мариничев, М.Б. Эффективные фундаментные конструкции в сложных грунтовых условиях / М.Б. Мариничев, К.Ш. Шадунц, А.Ю. Маршалка // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 2. – С. 34–36.
8. Пат. 2300604. Российская Федерация. Способ строительства свайно-плитных фундаментов в сейсмических районах / К.Ш. Шадунц, М.Б. Мариничев, В.А. Демченко ; опубл. 07.10.2005.
9. Пат. 2242563. Российская Федерация. Способ подготовки основания резервуара / К.Ш. Шадунц, М.Б. Мариничев, В.В. Угринов ; опубл. 20.12.2004.
10. Пат. 2378454. Российская Федерация. Способ возведения свайно-плитного фундамента / К.Ш. Шадунц, М.Б. Мариничев ; опубл. 14.08.2008
11. Мариничев, М.Б. Опыт реализации нестандартных методов проектирования и строительства фундаментов высотных зданий в сейсмических районах / М.Б. Мариничев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 1 (125). – С. 623–657. – Условия доступа : <http://ej.kubagro.ru/2017/01/pdf/43.pdf>

REFERENCES

1. Mirsayapov I.T., Popov A.O. Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya raboty armirovannykh gruntovykh massivov [Experimental and theoretical investigations of reinforced subsoil behavior]. *Izvestiya KazGASU*. 2008. No. 2. Pp. 75–80. (rus)
2. Shadunts K.Sh., Marinichev M.B. K raschetu zdaniy i sooruzheniy na slozhnykh, neravnomerno szhimaemykh osnovaniyakh [Structural engineering of buildings located on complex non-uniformly compressed foundations]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Soil Mechanics and Foundation Engineering]. 2003. No. 2. Pp. 7–10. (rus)
3. Marinichev M.B., Tkachev I.G. Razrabotka konstruktivnogo resheniya vertikal'no armirovannogo osnovaniya plitnogo fundamenta vysotnogo zdaniya v seismicheskom raione [Elaboration of constructive solutions for vertical reinforced base of slab foundation of high-rise building in seismic region] *Proc. Int. Sci. Conf. 'Soil Mechanics and Foundation Engineering in Geotechnical Engineering'*. Novocherkassk: Politehnik Publ., 2015. Pp. 272–281. (rus)
4. Marinichev M.B., Tkachev I.G., Shlee Yu. Prakticheskaya realizatsiya metoda vertikal'nogo armirovaniya neodnorodnogo osnovaniya dlya kompensatsii neravnomernoi deformiruемости gruntovogo massiva i snizheniya seismicheskikh vozdeystviy na nadzemnoe sooruzhenie [Practical implementation of vertical reinforcement for non-homogeneous bases as a method to reduce non-uniform deformability of subsoil and compensate seismic loads to upper structure]. *Nauchnyi zhurnal KubGAU* [Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian

- University]. 2013. No. 10 (094). Pp. 758–771. Available at: <http://ej.kubagro.ru/2013/10/pdf/51.pdf/> (rus)
5. Shadunts K.Sh., Marinichev M.B. Plitnye fundamenty mnogoetazhnykh zdaniy na prosadochnykh gruntakh [Slab foundation of multi-storey buildings on subsiding soils]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2003. No. 11. Pp. 16–18. (rus)
 6. Shadunts K.Sh., Marinichev M.B., Ugrinov V.V. Osobennosti deformatsii dnishch rezervuarov [Features of settlement behavior of the tank bottoms]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [J. Industrial and Civil Engineering]. 2004. No. 3. Pp. 28–29. (rus)
 7. Marinichev M.B., Shadunts K.Sh., Marshalka A.Yu. Effektivnye fundamentnye konstruksii v slozhnykh gruntovykh usloviyakh [Effective foundations in complex subsoil conditions]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2013. No. 2. Pp. 34–36. (rus)
 8. Shadunts K.Sh., Marinichev M.B., Demchenko V.A. Sposob stroitel'stva svaino-plitnykh fundamentov v seismicheskikh raionakh [Construction method of pile-raft foundation in seismic regions] Pat. Rus. Fed. N 2300604. 2005. (rus)
 9. Shadunts K.Sh., Marinichev M.B., Ugrinov V.V. Sposob podgotovki osnovaniya rezervuara [Tank base method of preparation] Pat. Rus. Fed. N 2242563. 2004. (rus)
 10. Shadunts K.Sh., Marinichev M.B. Sposob vozvedeniya svaino-plitnogo fundamenta [Construction method of pile-raft foundation] Pat. Rus. Fed. N 2378454. 2008. (rus)
 11. Marinichev M.B. Opyt realizatsii nestandartnykh metodov proektirovaniya i stroitel'stva fundamentov vysotnykh zdaniy v seismicheskikh raionah [The experience of non-standard design and foundations construction methods for high-rise buildings in seismic regions]. *Nauchnyi zhurnal KubGAU* [Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University]. 2017. No. 01(125). Pp. 623–657. Available at: <http://ej.kubagro.ru/2017/01/pdf/43.pdf/> (rus)