

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСАДКИ ФУНДАМЕНТОВ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЦЕНТРА

Н. Н. Шалобыта¹, П. С. Пойта², Т. П. Шалобыта³

¹ К. т. н., доцент, проректор по научной работе, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: nshalobyta@mail.ru

² Д. т. н., профессор, профессор кафедры геотехники и транспортных коммуникаций, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ppsbrest@mail.ru

³ К. т. н., доцент, доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: t_shalobyta@mail.ru

Реферат

Осадка фундаментов – критически важный параметр при оценке устойчивости и долговечности зданий. Для эксплуатируемых сооружений мониторинг осадки требует особого подхода, так как традиционные методы (например, статические испытания) могут быть неприменимы из-за риска повреждения конструкций. Одним из методов проверки предельных состояний конструкций зданий и сооружений для подтверждения их работоспособности и поведения под нагрузкой является проверка на основе результатов испытаний [1]. Метод нагружения, основанный на контролируемом приложении полезной нагрузки к фундаменту с последующим измерением деформаций, позволяет оценить поведение основания здания и прогнозировать их поведение под нагрузкой, при этом минимизировать риски деформаций и разрушений конструкций, а также оптимизировать затраты при проведении проектных работ при модернизации (реконструкции) здания. Современные технологии, такие как геодезический мониторинг с использованием электронных тахеометров, GPS-датчиков и волоконно-оптических систем, обеспечивают непрерывный контроль осадки в реальном времени. Эти данные интегрируются с численным моделированием в программных комплексах (например, PLAXIS или MIDAS), что позволяет уточнить прогнозы и адаптировать конструкцию фундамента под изменяющиеся условия.

Экспериментальные исследования осадки фундаментов многофункционального центра включали установку измерительных устройств (геодезических марок) на колоннах исследуемых фундаментов с геодезическим мониторингом, с применением электронных тахеометров. Нагрузка создавалась поэтапно с использованием гидробалласта, установленного на перекрытии здания. После каждого этапа нагружения фиксировались вертикальные перемещения, что позволило построить графики «нагрузка – осадка» и определить деформации грунта. Данный метод показал свою эффективность для исследуемого здания, так как сочетал достаточную точность с минимальными рисками. Однако его применение требует комплексного подхода: комбинации геотехнических расчётов, современных средств мониторинга и адаптации к условиям конкретного объекта. Метод нагружения занимает промежуточное положение между теоретическими моделями и полевыми испытаниями, обеспечивая баланс между практичностью и надёжностью.

Ключевые слова: основания и фундаменты, инженерно-геологические условия, деформации, несущий слой грунта, осадки зданий и сооружений, неравномерность осадок.

EXPERIMENTAL STUDIES OF FOUNDATION PRECIPITATION MULTIFUNCTIONAL CENTER

N. N. Shalobyta, P. S. Poyta, T. P. Shalobyta

Abstract

Foundation sedimentation is a critical parameter in assessing the stability and durability of buildings. For operational structures, precipitation monitoring requires a special approach, since traditional methods (for example, static tests) may not be applicable due to the risk of structural damage. One of the methods of checking the proper conditions of structures of buildings and structures to confirm their operability and behavior under load is verification based on test results [1]. The loading method, based on the controlled application of a payload to the foundation followed by the measurement of deformations, makes it possible to evaluate the behavior of the building's foundation and predict their behavior under load, while minimizing the risks of deformations and structural failures, as well as optimizing costs during design work during the modernization (reconstruction) of the building. Modern technologies such as geodetic monitoring using electronic total stations, GPS sensors and fiber-optic systems ensure continuous monitoring of precipitation in real time. These data are integrated with numerical modeling in software complexes (for example, PLAXIS or MIDAS), which makes it possible to refine forecasts and adapt the foundation structure to changing conditions. Experimental studies of the precipitation of the foundations of the multifunctional center included the installation of measuring devices (geodetic grades) on the columns of the studied foundations with geodetic monitoring, using electronic total stations. The load was created in stages using a hydraulic ballast installed on the ceiling of the building. After each stage of loading, vertical movements were recorded, which made it possible to plot load-sediment graphs and determine soil deformations. This method proved to be effective for the building under study, as it combined sufficient accuracy with minimal risks. However, its application requires an integrated approach: a combination of geotechnical calculations, modern monitoring tools and adaptation to the conditions of a particular facility. The loading method occupies an intermediate position between theoretical models and field tests, providing a balance between practicality and reliability.

Keywords: foundations and foundations, engineering and geological conditions, deformations, bearing soil layer, precipitation of buildings and structures, uneven precipitation.

Введение

При выполнении исследований инженерно-геологических условий строительных площадок для проектирования конкретных объектов и их строительства необходимо отметить неопределенность свойств и недостаточную изученность физической сущности процессов и причин развития осадок фундаментов, в том числе неравномерных, учесть при расчетах значительное количество различных факторов, обеспечивающих прочность и надежность эксплуатируе-

мого объекта в течение всего периода его службы [2–6]. Строительство зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях в ряде случаев являются причиной развития чрезмерно больших неравномерных деформаций, приводящих к потере несущей способности отдельных элементов каркаса зданий, а иногда и к авариям зданий [7–11].

Сложность инженерно-геологических условий в большинстве случаев характеризуется неоднородностью основания, обусловлен-

Строительство

ной наличием выстилающихся слоев, линзообразным их залеганием при различной мощности, плотности сложения, деформируемости, неодинаковой уплотняемости во времени при различных по величине давлениях от фундаментов.

В процессе возрастания нагрузки на фундаменты, как показано на численных примерах [2], деформационные свойства грунта изменяются. И здесь очень важно знать, какая чувствительность здания, сооружения к деформированию основания, как это влияет на его поведение. Численное решение этой задачи получено с использованием эталона системы «основание – фундамент – сооружение»; представляющего собой точное решение задачи в условиях плоской деформации для упрощенной схемы сооружения в виде плиты конечной жесткости в качестве фундамента, находящейся на основании, представленном трехпараметрической контактной моделью. На фундаменте установлены сжимаемые опоры, на которых расположено верхнее строение в виде плиты конечной жесткости. Результаты расчетов свидетельствуют, что опоры контактных давлений по подошве фундаментной плиты при жесткости верхнего строения D_s , равной соответственно $6D$ и $5D$, практически совпадают, а это означает, что распределение контактных давлений по подошве фундамента не чувствительно к величине реальной жесткости верхнего строения [2].

В то же время проведенные экспериментально-теоретические исследования выявили нелинейный характер перераспределения усилий в зависимости от жесткости надземных конструкций. С увеличением их жесткости разность осадок здания уменьшается, дополнительные усилия в конструкциях возрастают [3, 13]. При относительной разности осадок стремящейся к нулю, роста дополнительных усилий в конструкциях здания при увеличении жесткости практически не происходит. Очевидно, при изучении процессов развития во время деформаций системы «основание – фундамент – сооружение» используются различные подходы, методы.

Возможности применения теоретических решений по отношению к сооружениям, обладающих некоторой ограниченной общей жесткостью еще не достаточны. Использование моделей сооружений для рассматриваемых целей затруднительно, а перенос получаемых с их помощью результатов на натурные условия сложен, особенно при рассмотрении оснований, сложенных слабыми грунтами, характеризующимися большой неоднородностью. Именно в таких условиях расчеты развития во времени длительных неравномерных осадок особенно актуальны. В связи с этим важное значение с целью совершенствования расчетов развития осадок приобретают методы исследований, основанные на использовании результатов обработки геодезических наблюдений как в период строительства зданий, так и в период их эксплуатации. Именно данные геодезических наблюдений являются критерием правильности инженерных решений, принятых в качестве всех основных теоретических положений [5, 11–13].

Такие исследования позволяют получить более полную и достоверную информацию о совместной работе сооружений и их оснований, а также более точные исходные данные для инженерных расчетов осадок проектируемых сооружений, поскольку они определены на реальных объектах, возводимых в конкретных инженерно-геологических условиях. Накопление таких данных благоприятствует их последующей группировке, выполняемой с учетом вида сооружений, конструктивных решений фундаментов, грунтовых условий, что расширяет возможности, достоверность практических расчетов осадок во времени [5, 7, 9].

С учетом этого нами выполнены экспериментальные исследования осадки фундаментов здания многофункционального центра. С этой целью выбраны экспериментальные площадки для нагружения фундаментов, определены места установки осадочных марок, разработана методика последовательности нагружения фундаментов и снятия отсчетов по осадочным маркам, предложена методика обработки полученных результатов. Проведен анализ характера развития осадок фундаментов, установлен ряд факторов, влияющих на величину осадки [11]. Основной причиной осадок являются биогенные грунты, представленные торфом. Его толщина в пределах активной зоны составляет от 32,0 до 89,0 %. В ряде случаев торф является несущим слоем свайных фундаментов. Установлено, что при нагружении переменной нагрузкой первой

площадки имеет место стабилизация осадки во времени. Вместе с тем приложенная нагрузка вызывает осадки не только нагруженных фундаментов, но и фундаментов, удаленных от площадки на значительном расстоянии (до 80 м). Нагружение второй, а тем более третьей площадок вызывает прогрессирующий рост осадок практически по всем фундаментам, удаленным от нагруженных площадок. Величина осадки зависит от несущего слоя грунта [8, 11, 14, 22]. Осадки максимальные, если несущим слоем являются торфы. Наличие деформационных швов между нагруженными полезной нагрузкой фундаментами и фундаментами без нагрузки не оказывает существенного влияния на характер и величину осадки. Фактором, снижающим величину неравномерных осадок, является жесткость каркаса здания.

Строительство и эксплуатация зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях в ряде случаев являются основной причиной развития чрезмерно больших и неравномерных деформаций, приводящих к потере несущей способности конструкций каркаса зданий, а иногда к авариям.

Конструктивное решение здания и инженерно-геологические условия

Многофункциональный центр представляет собой здание прямоугольной формы в плане с размерами 120,0 x 302,0 м при высоте 25 м. В осях 1–14 здание одноэтажное со встроенным антресольным техническим этажом с сеткой колонн 12,0 x 18,0 м имеет высоту до низа парапета 13,5 м [19–21]. Двухэтажная часть здания располагается в осях 15–41 при ячейках колонн каркаса 12,0 x 9,0 м на первом этаже и 12,0 x 18,0 м на втором.

Здание многопролетное, запроектировано в смешанном железобетонном каркасе: железобетонные колонны, монолитные железобетонные ребристые (кессонного типа) перекрытия (в двухэтажной части) и металлические конструкции покрытия. Фундаменты – монолитные железобетонные ростверки на свайном основании из набивных свай в выштампованных скважинах, имеющих форму усеченного конуса и имеющих жесткое сопряжение с ростверком. Пространственная жесткость каркаса здания обеспечивается жестким сопряжением узлов стыковки колонн с монолитными ростверками и балочным диском перекрытия, а так же диафрагмами жесткости в виде лестничных клеток.

Здание разделено на три функциональных блока, каждый из которых, в свою очередь, разделен на несколько температурных отсеков с устройством деформационных швов на парных колоннах.

Экспериментальные исследования развития осадок фундаментов во времени от действия возрастающей полезной нагрузки выполнены для части здания многофункционального центра в осях 15–28/Б-Ф (рисунок 1), т. е. его двухэтажной части. Выбор данной части здания для наблюдений за осадками обоснован наличием в основании свайных фундаментов слабых биогенных грунтов, обладающих большой сжимаемостью и неоднородностью залегания. Мощность данных грунтов в пределах активной зоны составляет от 32 до 89 %.

Физико-механические характеристики грунтов, полученные в результате уточненных инженерно-геологических исследований, приведены в таблице 1. Как видно из таблицы 1, инженерно-геологические условия площадки, отведенной под строительство многофункционального центра, представлены техногенными, озерно-болотными и моренными отложениями до разведанной глубины 20,0 м [15]. В данных инженерно-геологических условиях запроектированы фундаменты из набивных конических свай в выштампованных скважинах длиной 8,0 м.

Насыпные грунты по своему составу, сложению и физико-механическим свойствам резко отличаются от естественных отложений. Характерным для таких грунтов является то, что по своему составу они чаще всего неоднородны и содержат включения неорганических и органических материалов, распределенных хаотично по всему объему насыпи. В насыпных грунтах постоянно происходят различные физические, физико-химические, биологические и другие процессы, приводящие, с одной стороны, к их самоуплотнению, уплотнению и, с другой – разуплотнению, распаду, разложению, как структуры отдельных агрегатов, так и отдельных частиц [3]. Именно

наличие таких техногенных, несслежавшихся грунтов, состоящих преимущественно из смеси супеси, песков разномерных, загрязненных строительным мусором (щебень, валуны, древесная щепа, куски бревен, битый кирпич, куски бетона), расположенных с поверхности либо ниже растительного слоя, характерно расположению под значительной частью рассматриваемого многофункционального центра. Ниже, как правило, расположены суглинки лессовидные, туго- и мягкопластичной консистенции, различной мощности, с включениями прослоек и линз, состоящих из песков маловлажных, влажных и водонасыщенных, и супеси различной консистенции. Под лессовидными и насыпными грунтами обнаружены суглинки с включениями органических веществ, с примесью супесей и линз песков влажных и водонасыщенных. В толще болотных отложений вскрыты линзы и прослойки торфа слабой и средней степени разложения и заторфованных грунтов, а также линзы песков средних и мелких, чаще водонасыщенных. Мощность озерно-болотных отложений составляет 0,9...14,4 м [15]. Под лессовидными, а в местах их отсутствия – под озерно-болотными отложениями, вскрыты конечно-моренные грунты, представленные песками пылеватыми, мелкими, средними, крупными от маловлажных до водонасыщенных. Местами расположены глинистые грунты, представленные супесями моренными пластичной консистенции. В толще моренных супесей и песков встречаются валуны. Видимой закономерности в распространении песчаных и глинистых грунтов не наблюдается.

Подземные воды приурочены к прослойкам и линзам песков в толще лессовидных, озерно-болотных и моренных супесей, суглинков. Гидрогеологические условия характеризуются наличием подземных вод спорадического распространения. Они встречаются на глубине 1,0...7,7 м. В некоторых местах подземные воды обладают напором [15]. Так как инженерно-геологические условия строительной площадки многофункционального центра представлены на значительную глубину специфическими грунтами, обладающими небольшой прочностью и высокой сжимаемостью, то в соответствии с [11] площадка характеризуется III категорией сложности основания.

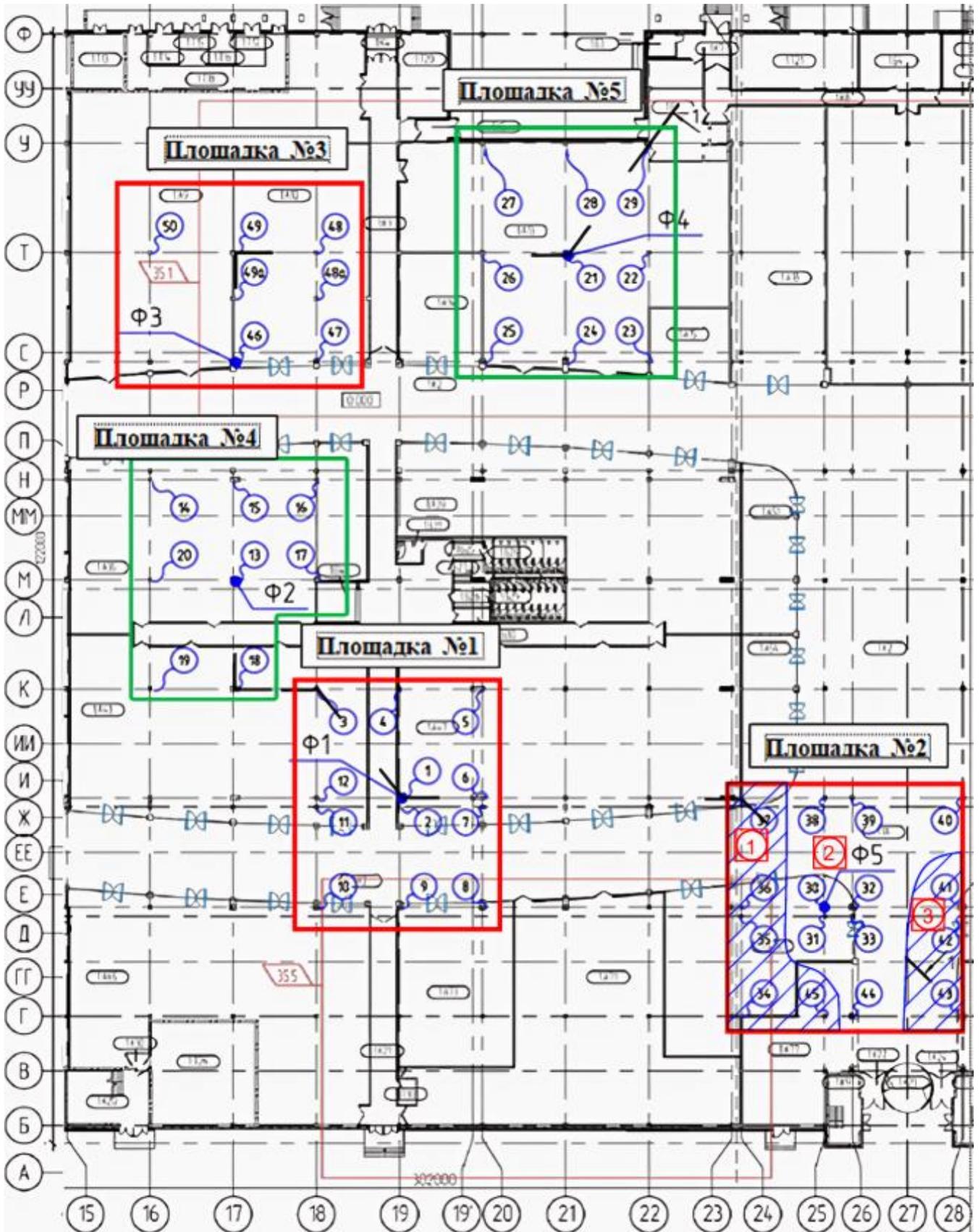
Выполненный нами анализ глубины погружения свай показал, что в ряде случаев их нижние концы опираются на супесь лессовидную слабую и торфы. В некоторых случаях торфы расположены в пределах длины свай и на различных глубинах, не выходящих за пределы активной зоны. Нагрузка на фундаменты в рассматриваемой части здания колеблется от 1500 кН до 3500 кН на колонну. Строительство здания завершено несколько лет назад, но в эксплуатацию не введено.

Учитывая инженерно-геологические условия в рассматриваемой части здания и конструкцию свайных фундаментов, для подтверждения работоспособности и поведения конструкций под нагрузкой [1], а также с целью ввода в эксплуатацию объекта, нами разработана программа и проведены экспериментальные исследования развития осадок фундаментов при их нагружении полезной нагрузкой. Нагрузка прикладывалась последовательно во времени: сначала на площадке № 1, затем на 30-й день от начала испытаний на площадке № 2 и на 61-й день на площадке № 3 (рисунок 1).

Следует отметить, что первые две площадки вначале нагружали полезной нагрузкой 4,0 кН/м², которую затем увеличивали до 6,0 кН/м². Для площадки № 3 сразу планировалось загрузку нагрузкой 6,0 кН/м². Вся нагрузка на трех площадках была снята на 73-й день от начала испытаний. В течение всего периода проведения испытаний велись геодезические наблюдения за осадками фундаментов с определенной цикличностью. Последние отсчеты были сняты через одну неделю после разгрузки всех трех площадок. Наблюдение за осадками велись с использованием деформационных марок не только в местах приложения нагрузки, но и на двух площадках, свободных от нагрузки: площадки № 4 и № 5 (рисунок 1). Расстояние между нагружаемыми площадками № 1 и № 2 составило 51 м, а между площадками № 2 и № 3 – 60 м. Удаление свободной от нагрузки площадки, на которой велось измерение осадок фундаментов, равнялось 31 м от площадки № 1 и 36 м от площадки № 3. Удаление второй, свободной от нагрузки, площадки равно 37 м от площадки № 3 и 66 м и 78 м соответственно от площадок № 1 и № 2.

Таблица 1 – Нормативные и расчетные характеристики грунтов

ИГЭ	Грунт	Удельный вес, кН/м ³			Удельное сцепление, кПа			Угол внутреннего трения, градус			Модуль деформации E, МПа
		γ _п	γ _{II}	γ _I	C _п	C _{II}	C _I	φ _п	φ _{II}	φ _I	
<i>Техногенные (искусственные) образования</i>											
1 _a	Насыпной грунт песчаный	17,9	17,8	17,8	–	–	–	–	–	–	–
1 _б	Насыпной грунт глинистый	19,5	19,3	19,3	–	–	–	–	–	–	–
<i>Лессовидные отложения</i>											
2 _a	Супесь лессовидная слабая	19,5	19,4	19,4	19	19	13	23	23	20	3,5
2	Супесь лессовидная средней прочности (1,0 ≤ q _c ≤ 2,5 МПа)	19,5	19,4	19,4	20	20	13	17	17	15	10
3	Супесь лессовидная средней прочности (2,5 < q _c ≤ 4,6 МПа)	19,5	19,3	19,1	26	26	17	21	21	18	20
<i>Озерные, аллювиальные, болотные отложения</i>											
4 _a	Суглинок слабый	19,0	18,9	18,8	13	13	9	22	22	19	4,3
4 _б	Суглинок средней прочности	19,1	18,9	18,8	20	20	13	17	17	15	10
4 _в	Суглинок прочный	19,9	19,7	19,6	28	28	19	22	22	19	31
4	Суглинок с растительными остатками (q _c ≤ 3,0 МПа)	19,0	18,8	18,8	18	18	12	17	17	15	7
5	Суглинок с растительными остатками (q _c > 3,0 МПа)	19,1	18,9	18,8	26	26	17	21	21	18	24
6	Суглинок заторфованный (q _c < 3,0 МПа)	16,3	15,9	15,6	20	20	13	11	11	9,6	6
7	Суглинок заторфованный (q _c > 3,0 МПа)	16,3	15,9	15,6	22	22	15	12	12	10	15
8	Торф	9,6	9,3	9,2	18	18	12	22	22	19	4
<i>Конечно-моренные отложения</i>											
9 _a	Супесь слабая	21,7	21,7	21,7	22	22	15	30	30	27	7,1
9	Супесь средней прочности	21,7	21,7	21,7	25	25	16,7	26	26	23	8



① ; ② ; ③ – номера зон площадки №2; ① – позиция осадочного репера

Рисунок 1 – Схема расположения площадок с полезной нагрузкой и осадочными марками

Измерения осадок выполнялись геометрическим нивелированием II класса повышенной точности. Средняя квадратичная ошибка, являющаяся критерием точности, не превышала величины $\pm 0,3$ мм.

В качестве исходной высотной основы использованы три ственных репера, заложенных в монолитной подпорной стенке, расположенной на расстоянии 90 м от здания. Отметка исходного репера на нулевом цикле наблюдений была определена с помощью двухчастотного спутникового приемника в режиме реального времени.

Результаты экспериментальных исследований

Сооружения, возведенные на грунтах с модулем деформации E менее 5,0 МПа, испытывают чрезмерные осадки, обусловленные высокой сжимаемостью грунтов. В соответствии с [16] такие грунты относятся к очень сильно деформируемым. Отметим, что при изменении E от 5,0 МПа до 10,0 МПа грунты относятся к сильно деформируемым. Грунты с примесью растительных остатков, заторфованные, торфы, характеризующиеся в естественном состоянии большой пористостью и повышенной способностью к влагоудержанию за счет гидрофильности органических веществ, приобретают несколько большее сцепление при длительном уплотнении под нагрузкой [6–8, 14]. Однако угол внутреннего трения в процессе уплотнения остается постоянным. Это означает, что такие грунты имеют малую прочность. Учитывая наличие в основании фундаментов большого разнообразия грунтов, в том числе сильносжимаемых, следует ожидать значительных осадок фундаментов, включая неравномерные.

Неравномерность осадок зданий в основном возникает в период строительства. Максимальная разность в осадках зависит от средней осадки. С ростом средней осадки разность осадок возрастает и стремится к своей предельной величине, определяемой жесткостью здания [5].

Среднюю осадку группы фундаментов в пределах экспериментальных площадок определяли по формуле

$$S = \frac{\sum S_i \cdot A_i}{\sum A_i},$$

где S_i – осадка i -го фундамента;

A_i – площадь условного фундамента.

Графики развития осадки фундаментов на нагружаемых площадках приведены на рисунке 2. Их анализ показывает, что при нагрузке 4,0 кН/м², в пределах площадки № 1 осадка фундаментов имеет тенденцию к стабилизации, и даже рост нагрузки до 6,0 кН/м² не меняет её характера. Приращение осадки между 14 и 30 сутками составило 0,12 мм. Предполагаемая траектория развития осадки показана условно на участке А. Однако на 30-й день испытаний была приложена нагрузка интенсивностью 4,0 кН/м² на площадке № 2, и это вызывает прогрессирующий рост осадки фундаментов, расположенных в пределах площадки № 1. Её рост составил 1,4 мм, что в 1,61 раза больше осадки от нагрузки в 6,0 кН/м², приложенной на площадке № 1. Повышение полезной нагрузки до 6,0 кН/м² на площадке № 2 увеличивает осадку фундаментов на площадке № 1, но её прогрессирующий рост несколько возрастает. Практически за неделю наблюдений её приращение составило 0,13 мм. Рост осадки за этот период времени составил 1,06 раза. И, наконец, нагружение площадки № 3 нагрузкой 6,0 кН/м² вызывает прогрессирующий рост осадки фундаментов на площадке № 1. Её приращение составило 1,1 мм, что больше, чем до приложения нагрузки, почти в 1,4 раза. Весьма примечательным является тот факт, что после снятия нагрузки на всех трех площадках рост деформаций не прекратился, и за неделю приращение осадки составило 0,6 мм.

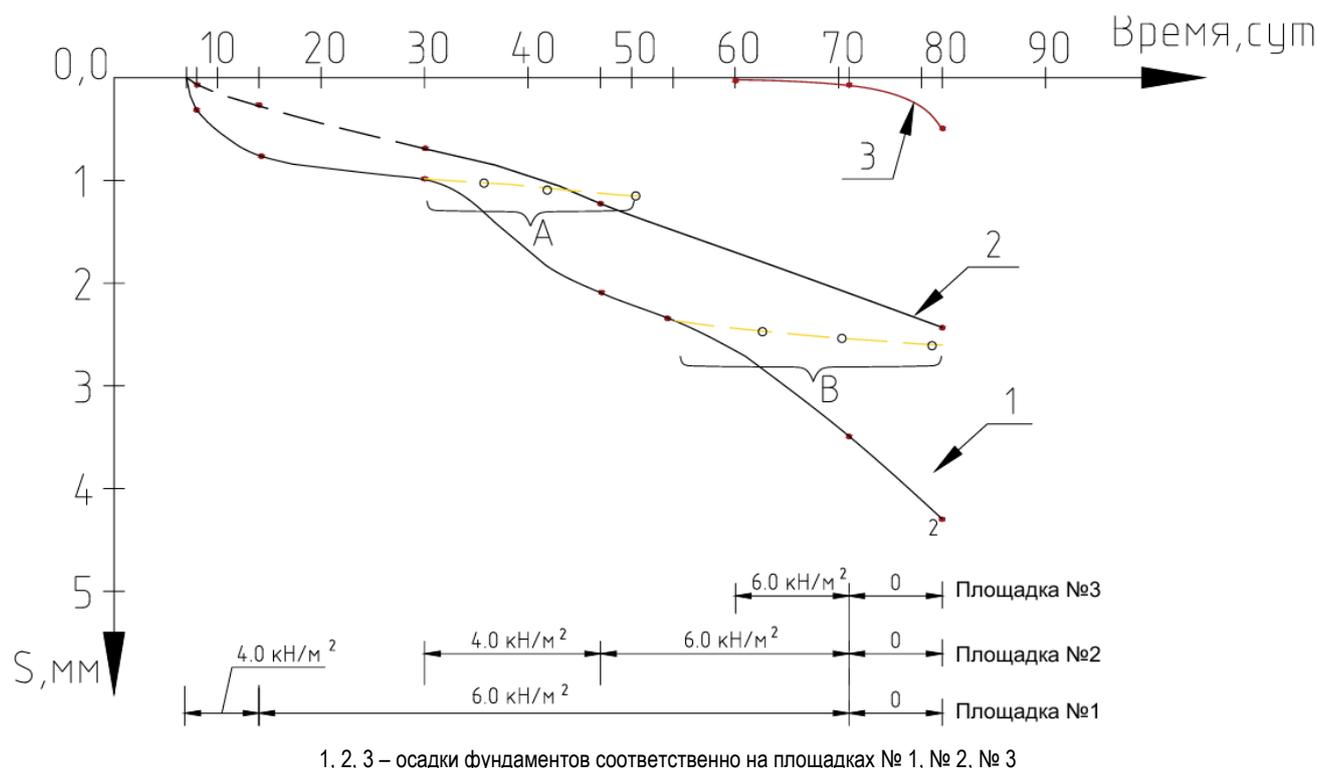


Рисунок 2 – Развитие осадки фундаментов на нагруженных площадках № 1–3 во времени (а); порядок приложения полезной нагрузки

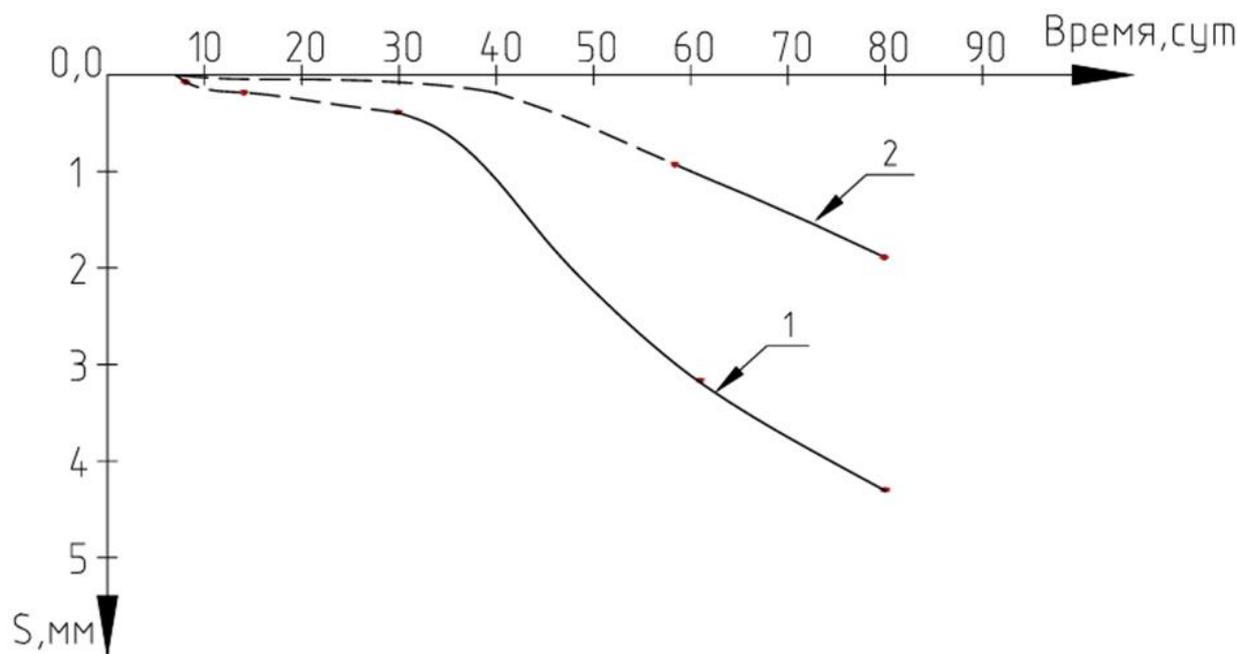
Несколько другой характер развития осадки фундаментов, расположенных в пределах площадки № 2 (кривая 2). Из графика видно, что при нагружении площадки № 1 (на площадке № 2 нагрузка отсутствует), идет рост осадки фундаментов, расположенных в пределах площадки № 2. При нагружении площадки № 2 вначале нагрузкой 4,0 кН/м², а затем дополнительной 2,0 кН/м², тенденция роста осадки

сохраняется одинаковой. После разгрузки всех площадок характер роста осадки практически не изменяется. Следует отметить, что при различных рассмотренных вариантах действия нагрузки осадка фундаментов, расположенных в пределах площадки № 2, меньше, чем в пределах площадки № 1. Если на 30 сутки от начала испытаний это различие составляло 1,4 раза, то на 73-е сутки – 1,8 раза.

Это различие не изменялось и после недельного перерыва после снятия всей нагрузки.

Нагружение первых двух площадок практически не оказало никакого влияния на осадку фундаментов, расположенных в пределах площадки № 3. Нагружение этой площадки нагрузкой $P = 6,0 \text{ кН/м}^2$ вызвало осадку фундаментов $0,3 \text{ мм}$, такое же приращение осадки получено после снятия нагрузки со всех площадок. На рисунке 3 показаны графики развития осадок фундаментов, размещенных на площадках № 4 и № 5, свободных от нагрузки. Кривая 1 дублирует в значительной степени график осадки фундаментов на площадке № 1, с той лишь разницей, что в начальный период величины S меньше. На 30-й день испытаний различие в осадках равно $1,3$ раза, на 47-й день – почти $2,6$ раза; на 54-й день – осадки практически равны, а далее рост осадки ненагруженных

фундаментов незначителен, но опережает величины нагруженных фундаментов. На 5-й площадке при нагружении площадки № 1 нагрузкой $6,0 \text{ кН/м}^2$ осадки фундаментов почти отсутствуют. Их рост проявляется только при нагружении площадки № 2. Нагружение площадки № 3 на величину осадки практически не повлияло. Различие в осадках фундаментов этих двух площадок увеличивается по мере роста нагрузок. На 40-й день испытаний различие в осадках фундаментов площадок № 4 и № 5 составляет $3,9$ раза, на 60-й день – $3,0$ раза, на 80-й – $2,2$ раза. Анализ полученных осадок фундаментов показывает, что их величина и характер распределения свидетельствует о значительной неоднородности грунтового основания по сжимаемости, что оказывает значимое влияние на деформирование системы «основание – фундамент – сооружение».



1 – осадка фундаментов на площадке № 4; 2 – осадка фундаментов на площадке № 5
Рисунок 3 – Развитие осадки фундаментов во времени на площадках № 4 и № 5 при отсутствии полезной нагрузки

Степень изменения сжимаемости основания в пределах здания в плане определяется коэффициентом

$$\alpha_E = \frac{E_{\max}^{np}}{E_{\min}^{np}},$$

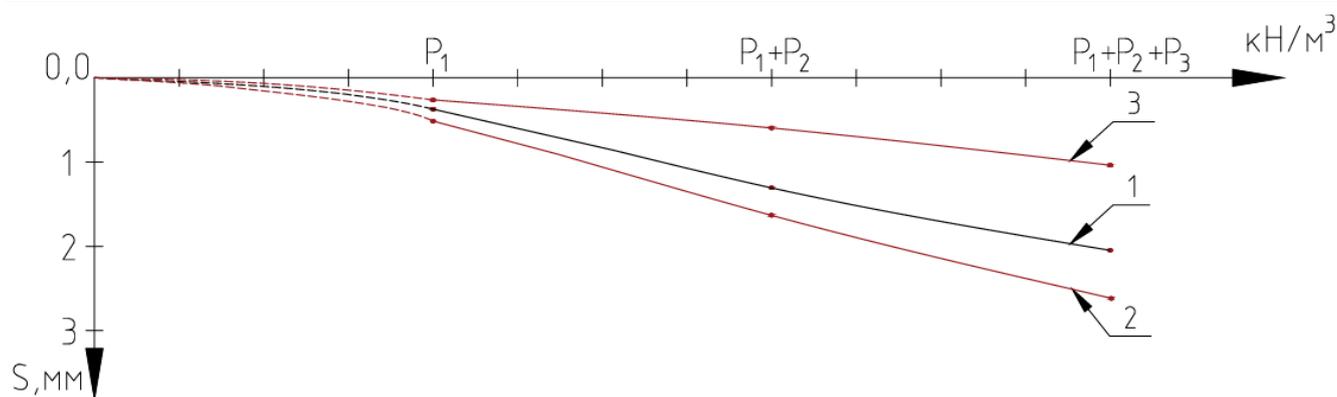
где E_{\max}^{np} и E_{\min}^{np} – соответственно значения наибольшего и наименьшего приведенных по расчетным вертикалям, модулей деформации грунта.

Значение α_E , полученное в результате вычислений, равно $5,23$, что свидетельствует о неоднородности основания [11]. Такая неоднородность объясняется весьма значительным разбросом различных по сжимаемости грунтов в пределах пятна исследуемой части здания. В пределах активной зоны находятся слабые грунты с модулем деформации от $3,5 \text{ МПа}$ до $6,0 \text{ МПа}$, соответственно очень сильно деформируемые и сильнодеформируемые; среднедеформируемые с E , меняющемся от $12,0 \text{ МПа}$ до $37,0 \text{ МПа}$ [16]. В пределах площадки № 1 торфы в активной зоне занимают от $32,0 \%$ до $89,0 \%$ её толщины. Опирающие нижних концов свай на торфы не установлено, однако расстояние от свай до торфа в отдельных случаях составляет от $0,8 \text{ м}$. В большей части оно равно $1,2 \dots 1,6 \text{ м}$, реже – $2,6 \dots 2,2 \text{ м}$. В большинстве случаев сваи опираются на суглинки, содержащие в своем составе растительные остатки, либо торф, для которых удельное сопротивление грунта под наконечником зонда $q_c < 3,0 \text{ МПа}$. В отдельных случаях в пределах длины свай имели место слои торфа мощностью до $0,5 \text{ м}$, расположенные на $0,3 \dots 0,5 \text{ м}$ выше концов свай и пригруженные техно-

генными образованиями, мощностью $6,0 \dots 6,5 \text{ м}$. Все отмеченные факторы существенным образом влияют на величину осадки испытываемых фундаментов и скорость её развития. Здесь также важным фактором, влияющим на деформируемость грунтов оснований, являются и гидрогеологические условия площадки, которые характеризуются наличием подземных вод спорадического распространения. Это также имеет значение, так как по отдельным фундаментам ниже техногенного слоя имеют место супеси лессовидные [17, 18].

Сваи фундаментов, расположенных в пределах площадки № 2, в зоне 2 (рисунок 1), заглублены непосредственно в торф. Его мощность в пределах активной зоны составляет от $59,0 \%$ до 79% . Сваи в пределах зон 1 и 3 заглублены в более прочные и менее деформируемые грунты. Расстояние от нижних концов свай до кровли торфа в зоне 1 колеблется от $0,9 \text{ м}$ до $2,5 \text{ м}$, а в зоне 3 – от $0,1 \text{ м}$ до $2,5 \text{ м}$. Именно заглубление свай в несущий слой грунта и определяет величину осадки свайных фундаментов [5].

Осадки фундаментов, расположенных в зоне 2, превышают осадки фундаментов в зонах 1 и 3 (рисунок 4). При нагружении площадки № 1, подчеркнем, нагрузка в пределах площадки № 2 отсутствует, осадка фундаментов в зоне 2 составила почти в $2,5$ раза больше, чем в зоне 1 и в $4,4$ раза больше, чем в зоне 3. Нагружение площадки № 2 нагрузкой $6,0 \text{ кН/м}^2$ сохраняет ту же тенденцию роста осадок: осадка фундаментов в зоне 2 возросла в $4,0$ раза, в зонах 1 и 3 в $4,3$ и $5,3$ раза соответственно. Вместе с тем осадка фундаментов в зоне 2 в $1,3$ раза больше, чем в зоне 1 и в $3,2$ раза больше, чем в зоне 3. Меньший рост осадки в зоне 3 объясняется меньшей мощностью торфа в пределах активной зоны – в среднем 53% , большим расстоянием от конца свай до кровли торфа.



1 – осадки фундаментов, расположенных в зоне 1; 2 – осадки фундаментов, расположенных в зоне 2; 3 – осадки фундаментов, расположенных в зоне 3

Рисунок 4 – Осадки фундаментов на площадке № 2 в зонах 1, 2, 3 в зависимости от нагрузки, приложенной на площадку № 1 – $P_1 = 6,0 \text{ кН/м}^2$, № 2 – $P_2 = 6,0 \text{ кН/м}^2$, № 3 – $P_3 = 6,0 \text{ кН/м}^2$

При нагружении нагрузкой $6,0 \text{ кН/м}^2$ площадки № 3 рост осадок незначителен. Для зон 1, 2, 3 осадка увеличилась соответственно в 1,5, 1,4 и 2,3 раза. Тенденция к уменьшению осадки при нагружении площадки № 3 объясняется её удаленностью (рисунок 1), а также жесткостью здания. Тем не менее, осадка фундаментов в зоне 2 соответственно в 1,2 и 2,0 раза больше, чем в зонах 1 и 3. Приведенный анализ роста осадок фундаментов на данной площадке, и на площадке № 1 показал высокую их чувствительность к действию полезной нагрузки, хотя и значительно удаленной от испытываемых фундаментов, имеющих в качестве несущего слоя торф. Наличие между сваями и торфом менее деформируемого слоя даже незначительной мощности, $0,3 \text{ м}$ и более, способствует уменьшению роста осадок.

Следует обратить внимание, что площадки № 1 и № 2 разделены деформационным швом. Площадку № 3, находящуюся на расстоянии $60,0 \text{ м}$ от площадки № 2, отделяют температурные швы. Тем не менее, влияние нагрузок на площадках № 1 и № 3 на развитие осадок фундаментов площадки № 2 очевидно. Аналогичная картина развития деформаций фундаментов характерна и для площадки № 4, свободной от нагрузки. Необходимо учитывать, что площадки № 1, № 3 и № 4, № 5 находятся в одном блоке, где деформационные швы отсутствуют. Тем не менее нагружение только площадки № 1 нагрузкой $6,0 \text{ кН/м}^2$ не вызывает прогрессирующих осадок практически на любой из экспериментальных площадок и характер развития во времени предполагает их стабилизацию. Дополнительная нагрузка на любой из следующих площадок вызывает прогрессирующий рост осадок (рисунки 2–4). На уплотнение торфа существенное влияние оказывает ряд факторов: структурная прочность, ползуемость скелета торфа, начальный градиент напора и др. [8, 13]. И эти грунты проявляют повышенную сжимаемость при давлениях, превышающих их структурную прочность. Более того, для торфов, тем более водонасыщенных, характерно медленное развитие осадок. Это предполагает, что при давлении на торфы, не превышающем структурной прочности, осадки оснований стабилизируются во времени. При превышении структурной прочности для оснований свайных фундаментов, представленных торфами, осадки оснований приобретают прогрессирующий характер.

Заключение

1. В результате проведенных экспериментальных исследований для подтверждения работоспособности и поведения под нагрузкой конструкций здания (проверка предельных состояний конструкций на основе результатов испытаний [1]), установлено влияние жесткости надземных конструкций здания на развитие неравномерных осадок. Последовательная загрузка полезной нагрузкой экспериментальных площадок позволила выявить характер развития осадки фундаментов в пределах этих площадок. При загрузке первой площадки замечена стабилизация осадки во времени. Нагружение второй и третьей площадки вызвало прогрессирующий рост осадки. Влияние нагрузки любой из площадок отражается на росте осадок фундаментов остальных площадок, несмотря на наличие между ними деформационных швов.

При необходимости минимизации неравномерности осадок жесткость здания должна быть максимально возможной, когда её дальнейшее увеличение является неоправданным.

2. Установлено, что использование грунтов, обладающих большой сжимаемостью, неоднородностью, в качестве оснований фундаментов способствует более интенсивному развитию неравномерных осадок. В таких условиях достигнутая стабилизация деформаций от действия постоянной нагрузки не является окончательной, ибо приложение незначительной по величине переменной нагрузки может вызвать прогрессирующий рост осадки даже при её полном снятии.

3. Результаты испытаний показали, что при величине полезной нагрузки, не превышающей структурной прочности торфа (ориентировочно $26,0 \text{ кПа}$), осадка стабилизируется во времени. При использовании торфа в качестве основания фундаментов обязательным является не только расчет деформаций от действующих нагрузок, но и их развития во времени. Применение для расчета одномерной консолидации грунтов линейного и нелинейного вариантов фильтрационной теории не даст удовлетворительных результатов. Необходим учет реологических свойств скелета грунта.

4. При проектировании фундаментов зданий с использованием оснований III категории сложности необходимым является обязательное выполнение работ по их геотехническому мониторингу. Частота наблюдений должна определяться интенсивностью и длительностью протекающих процессов деформирования массива грунта основания и конструкций подземной и наземной частей объекта.

Список цитированных источников

1. Основы проектирования строительных конструкций = Основы проектирования будаўнічых канструкцый : СН 2.01.01-2022. – Введ. 30.06.2022. – Минск : Минстройархитектуры, 2022. – 122 с.
2. Барвашов, В. А. Расчет осадок и кренов сооружений с учетом неопределенности свойств грунтовых оснований / В. А. Барвашов // Геотехника, 2016. – № 1. – С. 4–21.
3. Камаев, В. С. Экспериментально-теоретические исследования жесткостных параметров строительных конструкций и деформируемого основания / В. С. Камаев // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения – СПб. : ПГУПС, 2007. – № 3 (12) – С. 126–136.
4. Крутов, В. Н. Основания и фундаменты на насыпных грунтах / В. Н. Крутов. – М. : Стройиздат, 1988. – 224 с.
5. Коновалов, П. А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий / П. А. Коновалов. – 2-е изд. – М. : Стройиздат, 1988. – 287 с.
6. Механика грунтов, основание и фундаменты: учебное пособие для строит. спец. вузов / С. Б. Ухов, В. В. Семенов, В. В. Знаменский [и др.] ; под ред. С. Б. Ухова. – 3-е изд., испр. – М. : Высш. школа, 2004. – 566 с.
7. Пойта, П. С. Основания и фундаменты : учеб. пособие / П. С. Пойта, П. В. Шведовский, Д. Н. Клебанюк. – Минск : Вышэйшая школа, 2020. – 400 с.

8. Морарескул, Н. Н. Основания и фундаменты в торфяных грунтах: учеб. пособие / Н. Н. Морарескул. – СПб. : Петербургский гос. уни-т путей сообщения, 1999. – 49 с.
9. Multi-storeved bulding slab foundation settlement / P. S. Poita, N. N. Shalobyta, T. P. Shalobyta, E. N. Shalobyta // Vestnik of Brest State Technical University. – 2023. – № 3 (132). – P. 11–14. – DOI: 10.36773/1818-1112-2023-132-3-11-14.
10. Пойта, П. С. Некоторые проблемы проектирования и строительства фундаментов зданий и сооружений / П. С. Пойта, Н. Н. Шалобыта, Т. П. Шалобыта // Материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф. «Перспективные направления инновационного развития и подготовки кадров», 31 октября – 2 ноября 2024 г., Брест. – Брест, 2024. – С. 280–288.
11. Общие положения по проектированию оснований и фундаментов зданий и сооружений = Агульняы палажэнні па праектаванню асноў і фундаментаў будынкаў і збудаванняў: СП 5.01.01-23. – Введ. 27.02.2023. – Минск : Минстройархитектуры, 2023. – 144 с.
12. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть 1. Общие правила производства работ : СП 11-102-97. Введ. 15.08.1997. – М. : Госстрой РФ, 1977. – 37 с.
13. Инженерные изыскания для строительства = Інжынерныя вышуканні для будаўніцтва : СН 1.02.01-2019. – Введ. 26.12.2019. – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – 109 с.
14. Бусел, И. А. Прогнозирование строительных свойств грунтов / И. А. Бусел. – Минск : Наука и техника, 1989. – 246 с.
15. Спортивно-оздоровительный и торгово-развлекательный центр на пересечении ул. Казимировской – ул. Каменногорской в г. Минске : технический отчет по инженерно-геологическим изысканиям. – Минск, 2014. – 13 с.
16. Грунты. Классификация : ГОСТ 25100-2020. – Взамен ГОСТ 25100-2011 ; введ. 01.01.2021. – М. : Стандартиформ, 2020. – 38 с.
17. Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием. ГОСТ 19912-2012. – Взамен ГОСТ 19912-2001 ; введ. 01.11.2013. – М. : Стандартиформ, 2013. – 23 с.
18. Пойта, П. С. О взаимодействии определенных в лабораторных условиях параметров грунтов с данными по статическому зондированию / П. С. Пойта, Т. П. Шалобыта // Вестник БрГТУ. Серия Строительство и архитектура. – 2005. – № 2. – С. 83–85.
19. Общие положения по обследованию строительных конструкций зданий и сооружений. СП 1.04.02-2022. – Введ. 02.03.2022. – Минск : МАиС, 2022. – 73 с.
20. Основы проектирования конструкций. Оценка существующих конструкций: СТБ ISO 13822-2017. – Введ. 11.04.2017. – Минск : Госстандарт, 2017. – 40 с.
21. Рекомендации по оценке прочности, жесткости и трещиностойкости сборных бетонных и железобетонных изделий, периодичности их испытаний нагружением и применению методов неразрушающего контроля. Р 1.03.042.07. – Брест : БрГТУ, 2010. – 48 с.
22. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В. А. Ильичева, Р. А. Мангушева. – М. : Изд-во АСВ, 2014. – 728 с.
4. Krutov, V. N. Osnovaniya i fundamenty na nasypnyh gruntah / V. N. Krutov. – M. : Strojizdat, 1988. – 224 s.
5. Konovalov, P. A. Osnovaniya i fundamenty rekonstruirovanykh zdaniy / P. A. Konovalov. – 2-e izd. – M. : Strojizdat, 1988. – 287 s.
6. Mekhanika gruntov, osnovanie i fundamenty: uchebnoe posobie dlya stroit. spec. vuzov / S. B. Uhov, V. V. Semenov, V. V. Znamenskij [i dr.]; pod red. S. B. Uhova. – 3-e izd., ispr. – M. : Vyssh. shkola, 2004. – 566 s.
7. Pojta, P. S. Osnovaniya i fundamenty : ucheb. posobie / P. S. Pojta, P. V. SHvedovskij, D. N. Klebanyuk. – Minsk : Vyshejschaya shkola, 2020. – 400 s.
8. Morareskul, N. N. Osnovaniya i fundamenty v torfyanyh gruntah : ucheb. posobie / N. N. Morareskul. – SPb. : Peterburgskij gos. uni-t putej soobshcheniya, 1999. – 49 s.
9. Multi-storeved bulding slab foundation settlement / P. S. Poita, N. N. Shalobyta, T. P. Shalobyta, E. N. Shalobyta // Vestnik of Brest State Technical University. – 2023. – № 3 (132). – P. 11–14. – DOI: 10.36773/1818-1112-2023-132-3-11-14.
10. Pojta, P. S. Nekotorye problemy proektirovaniya i stroitel'stva fundamentov zdaniy i sooruzhenij / P. S. Pojta, N. N. SHalobyta, T. P. SHalobyta // Materialy HKHIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Perspektivnye napravleniya innovacionnogo razvitiya i podgotovki kadrov», 31 oktyabrya – 2 noyabrya 2024 g., Brest. – Brest, 2024. – S. 280–288.
11. Obshchie polozheniya po proektirovaniyu osnovanij i funda-mentov zdaniy i sooruzhenij = Agul'nyya palazhenni pa praektavannyu asnoy i fundamentay budynkaŭ i zbudavannyaŭ: SP 5.01.01-23. – Vved. 27.02.2023. – Minsk : Minstrojarhitektury, 2023. – 144 s.
12. Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya dlya stroitel'stva. CHast' 1. Obshchie pravila proizvodstva rabot : SP 11-102-97. Vved. 15.08.1997. – M. : Gosstroj RF, 1977. – 37 s.
13. Inzhenernye izyskanie dlya stroitel'stva = Inzhynernyya vyshukanni dlya budaynitsva : SN 1.02.01-2019. – Vved. 26.12.2019. – Minsk : Minstrojarhitektury, 2020. – 109 s.
14. Busel, I. A. Prognozirovanie stroitel'nykh svoystv gruntov / I. A. Busel. – Minsk : Nauka i tekhnika, 1989. – 246 s.
15. Sportivno-ozdorovitel'nyj i trgovno-razvlekatel'nyj centr na peresechenii ul. Kazimirovskoj – ul. Kamennogorskoj v g. Minske : tekhnicheskij otchet po inzhenerno-geologicheskim izyskaniyam. – Minsk, 2014. – 13 s.
16. Grunty. Klassifikaciya : GOST 25100-2020. – Vzamen GOST 25100-2011 ; vved. 01.01.2021. – M. : Standartinform, 2020. – 38 s.
17. Grunty. Metody polevykh ispytaniy staticheskim i dinamicheskim zondirovaniem. GOST 19912-2012. – Vzamen GOST 19912-2001 ; vved. 01.11.2013. – M. : Standartinform, 2013. – 23 s.
18. Pojta, P. S. O vzaimodejstvii opredelennykh v laboratornykh usloviyah parametrov gruntov s dannymi po staticheskomu zondirovaniyu / P. S. Pojta, T. P. SHalobyta // Vestnik BrGTU. Seriya Stroitel'stvo i arhitektura. – 2005. – № 2. – S. 83–85.
19. Obshchie polozheniya po obsledovaniyu stroitel'nykh konstrukcij zdaniy i sooruzhenij. SP 1.04.02-2022. – Vved. 02.03.2022. – Minsk : MAiS, 2022. – 73 s.
20. Osnovy proektirovaniya konstrukcij. Ocenka sushchestvuyushchih konstrukcij: STB ISO 13822-2017. – Vved. 11.04.2017. – Minsk : Gosstandart, 2017. – 40 s.
21. Rekomendacii po ocenke prochnosti, zhestkosti i treshchinostojkosti sbornyyh betonnyh i zhelezobetonnyh izdelij, periodichnosti ih ispytaniy nagruzheniem i primeneniyu metodov nerazrushayushchego kontrolya. R 1.03.042.07. – Brest : BrGTU, 2010. – 48 s.
22. Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya / pod obshch. red. V. A. Il'icheva, R. A. Mangusheva. – M. : Izd-vo ASV, 2014. – 728 s.

References

1. Osnovy proektirovaniya stroitel'nykh konstrukcij = Asnovy praektavannya budaynichykh kanstrukcyj : SN 2.01.01-2022. – Vved. 30.06.2022. – Minsk : Minstrojarhitektury, 2022. – 122 s.
2. Barvashov, V. A. Raschet osadok i krenov sooruzhenij s uchedom neopredelennosti svoystv gruntovykh osnovanij / V. A. Barvashov // Geotekhnika, 2016. – № 1. – S. 4–21.
3. Kamaev, V. S. Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya zhestkostnykh parametrov stroitel'nykh konstrukcij i deformiruемого osnovaniya / V. S. Kamaev // Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya – SPb. : PGUPS, 2007. – № 3 (12) – S. 126–136.

Материал поступил 11.04.2025, одобрен 12.07.2025, принят к публикации 12.07.2025