

В
2.11.2021
начать
[Signature]

На правах рукописи

Яркин Виктор Владимирович

[Signature]

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ
В СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

05.23.01 — Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Макеевка — 2021

Работа выполнена на кафедре оснований, фундаментов и подземных сооружений ГОУ ВПО «Донбасской национальной академии строительства и архитектуры», г. Макеевка, Министерства образования и науки ДНР.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор,
ПЕТРАКОВ Александр Александрович,
заведующий кафедрой оснований, фундаментов и подземных сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры».

**Официальные
оппоненты:**

доктор технических наук, профессор,
ДАВИДЕНКО Александр Иванович,
профессор кафедры «Проектирование сельскохозяйственных объектов» ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный аграрный университет»;

доктор технических наук, профессор,
ПРОКОПОВ Альберт Юрьевич,
заведующий кафедрой инженерной геологии, оснований и фундаментов ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»;

доктор технических наук, доцент,
ДЕМЕНКОВ Петр Алексеевич,
профессор кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Защита состоится «10» февраля 2022 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 01.006.02 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, зал заседаний учёного совета. Тел. / факс: +38(0623) 22-77-19, e-mail: d01.006.02@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, Донецкая обл., г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан «__» _____ 202_ г.

Учёный секретарь диссертационного
совета Д 01.006.02



Лахтарина Сергей Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблема строительного освоения территорий со сложными инженерно-геологическими условиями является весьма актуальной, так как развитие и рост городов приводит к проявлению следующих тенденций:

- необходимость размещать сложные и ответственные здания и сооружения на территориях, мало пригодных по геологическим условиям;
- увеличение числа уникальных сооружений, предъявляющих высокие требования к геологической обстановке, в которую они не вписываются;
- увеличение удельного веса подземного строительства, что обуславливает вовлечение в сферу инженерного воздействия всё более сложных и многообразных инженерно-геологических и гидрогеологических условий;
- влияние техногенных воздействий на инженерно-геологическую и гидрогеологическую обстановку.

Указанные тенденции обуславливают рост роли и значения исследований, направленных на минимизацию затрат на мероприятия, позволяющие использовать неблагоприятные геологические условия для строительных целей.

Проблема корректного моделирования поведения зданий и сооружений (ЗиС), эксплуатирующихся в сложных инженерно-геологических условиях, актуальна и по сегодняшний день. Отсутствие четких критериев и правил создания расчетных моделей в ряде случаев приводит к некорректному моделированию, которое довольно часто встречается при расчёте зданий и сооружений, взаимодействующих с неравномерно деформируемым основанием.

Следствием неравномерных деформаций основания является возникновение дополнительных усилий и напряжений в конструкциях зданий и сооружений. При этом неравномерные деформации основания могут возникать как в зависимости от нагрузки, действующей на основание, так и независимо от нее, что обуславливает необходимость различных подходов в их моделировании и применяемые модели основания должны обеспечивать эту возможность.

Методы совместного расчета здания и деформируемого грунтового основания разработаны в меньшей степени, чем методы расчета отдельных элементов зданий. Стремление повысить точность совместного расчета приводит к разработке все более точных и сложных расчетных моделей, а постоянно возрастающая мощность вычислительной техники создает большие возможности для их реализации. Однако, в сложных инженерно-геологических условиях при стохастических схемах проявления неравномерных деформаций основания, применение расчетных схем, в которых все элементы системы «Основание – Фундамент – Сооружение» («ОФС») детально представлены сложными расчетными моделями, как правило, нецелесообразно из-за высокой трудоемкости.

Несмотря на стремительно растущую популярность численных методов расчета, аналитические методы определения деформаций основания в различ-

ных сложных инженерно- и горно-геологических условиях (СИГГУ) и на данный момент не потеряли актуальности, так как наиболее полно проработаны в нормативно-инструктивной литературе, достаточно хорошо подтверждаются экспериментальными данными и являются одним из способов верификации результатов численных методов расчета. Однако, в результате анализа многочисленных результатов расчета и многолетних натурных обследований и наблюдений за зданиями и сооружениями, которые эксплуатируются в СИГГУ, автором выявлены ряд условий, в которых существующие аналитические методы определения деформаций основания дают противоречивые результаты, вследствие чего могут быть приняты нерациональные либо неэффективные меры защиты ЗиС от неравномерных деформаций основания. На основании этого было сделано предположение об определенной области корректного применения существующих аналитических методов определения деформаций основания, вызванных некоторыми СИГГУ.

При численных методах расчета, как правило, возникают проблемы моделирования: грунтового массива, обладающего специфическими (особыми) свойствами, либо деформационных воздействий со стороны основания, не зависящих от внешней нагрузки на основание.

Таким образом, развитие методов совместного расчета зданий и сооружений с деформируемым основанием в сложных инженерно-геологических условиях и в частности аналитических методов определения деформаций основания, вызванных СИГГУ, является актуальным.

Степень разработанности темы исследования. Теоретической основой исследования послужили работы, которые объединены в следующие тематические группы:

- по методам расчета и моделированию системы «ОФС» и ее элементов при решении контактных задач научные работы Алексеева С.И., Банаха В.А., Винникова Ю.Л., Гарагаша Б.А., Горбунова-Посадова М.И., Городецкого А.С., Давиденко А.И., Дыховичного А.А., Клепикова С.Н., Левина В.М., Леденёва В.В., Лишака В.И., Малышева М.В., Мангушева Р.А., Метелюка Н.С., Мустафаева А.А., Петракова А.А., Прокопова А.Ю., Пшеничкина А.П., Симвулиди И.А., Тер-Мартиросяна З.Г., Тимченко Р.А., Улицкого В.М., Ухова С.Б., Фадеева А.Б., Шашкиных А.Г. и К.Г., I.L. Kristić, Coulomb Ch., Roscoe K.H., Borland J.B., Vermeer P.A. и др.;

- по методам определения деформационных воздействий на ЗиС со стороны основания в различных СИГГУ и особенностям их моделирования научные работы Абелева Ю.М., Абелева М.Ю., Гильмана Я.Д., Гольдштейна М.Н., Готман Н.З., Готман А.Л., Григорян А.А., Клепикова С.Н., Коновалова П.А., Крутова В.И., Кушнера С.Г., Левченко А.П., Межеровского В.А., Мустакимова В.Р., Мустафаева А.А., Невзорова А.Л., Полищука А.И., Пономарева А.Б., Про-

копова А.Ю., Самедова А.М., Сорочана Е.А., Сницарь М.А., Тер-Мартirosяна З.Г., Трегуба А.С., Jefferson I.F., Houston, S.L., Noor S.T., Zhu G. Charles Lucian, Coduto Donald P., Lytton R.L., Chen F.H., Emad Jahangir, Olivier Deck, Farimah Masrouri и др.

- САПР, применяемые для расчетов системы «ОФС», работы Городецко-го А.С., Клованича С.Ф., Перельмутера А.В., Borland J.B., Vermeer P.A. и др.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнена в рамках:

– госбюджетных научно-исследовательских тем кафедры «Основания, фундаменты и подземные сооружения» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры №К-2-05-06 «Разработка и исследование оснований и фундаментов при строительстве и реконструкции зданий и сооружений на неравномерно деформирующихся и просадочных грунтах», №К-2-19-11 «Совершенствование методов расчета деформаций, несущей способности и устойчивости оснований фундаментов и грунтовых массивов на основе гипотез нелинейной механики грунтов» и №К-2-05-16 «Разработка и исследование методов защиты зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических и горно-геологических условиях»;

– темы Донецкого ПромстройНИИпроекта "Разработка ДБН В.2.1-04 «Основания и фундаменты зданий и сооружений» (Взамен СНиП 2.02.01-83)";

– программы INFINITY (INternational Fellowship IN transdisciplinaryITY) Erasmus Mundus в Политехническом институте Лейрии (Португалия).

Цель и задачи исследования. Целью исследования является решение важной научно-технической проблемы, заключающееся в развитии методов совместного расчета зданий и сооружений с неравномерно деформируемым основанием в сложных инженерно-геологических условиях по следующим взаимосвязанным направлениям:

– моделирование элементов системы «ОФС» с учетом особенностей сложных инженерно-геологических условий;

– определение и моделирование воздействий, учитываемых в расчетных схемах ЗиС, со стороны неравномерно-деформируемого основания в СИГГУ;

– поиск наиболее неблагоприятных расчетных схем неравномерно деформируемого основания для различных объемно-планировочных и конструктивных решений зданий и сооружений.

Для реализации указанной цели автором решены **следующие задачи:**

– проанализированы различные модели грунтового основания и надземной части здания, методы совместного расчета системы «ОФС» и их применимость для СИГГУ;

– усовершенствованы аналитические методы определения специфических деформационных воздействий для отдельных видов СИГГУ, позволяющие

уточнить воздействия, учитываемые в расчетных схемах зданий и сооружений, со стороны неравномерно-деформируемого основания;

- усовершенствованы аналитические методы учета физической нелинейности грунтов основания и материала железобетонных изгибаемых элементов и узлов их сопряжения;

- усовершенствована методика расчета системы "ОФС" с использованием относительной жесткости системы, включающая в себя: оценку жесткости основания и выбор адекватной контактной или механической модели грунтового основания; оценку конструктивного решения здания и жесткости его элементов с последующим выбором модели сооружения;

- исследовано влияние способов учета воздействий со стороны неравномерно-деформируемого основания в расчетной схеме на НДС ее элементов;

- исследовано влияние различных факторов на относительную жесткость системы «ОФС» и жесткость ее отдельных элементов (основания, фундаментов и сооружения) для более обоснованного назначения мероприятий по обеспечению надежности и долговечности зданий, эксплуатирующихся в СИГГУ;

- исследованы закономерности распределения усилий в системе «ОФС», в широком диапазоне силовых и деформационных нагружений, включая стадию разрушения, что позволяет показать преимущество и целесообразность расчетов системы «ОФС» на деформационные воздействия с учетом нелинейности деформирования грунтов и материалов конструкций;

- основываясь на численных исследованиях, предложены мероприятия по снижению усилий и напряжений в элементах здания, разделяющиеся на мероприятия: по воздействию на основание и по воздействию на здание;

- проведена проверка результатов выполненных исследований в натурных условиях на объектах, эксплуатирующихся в СИГГУ, с целью подтверждения либо корректировки теоретических положений.

Объект исследования – здания и сооружения, работающие в условиях неравномерных деформаций основания, вызванных сложными инженерно- и горно-геологическими условиями.

Предмет исследования – влияние методов расчета и способов моделирования ЗиС, взаимодействующих с неравномерно-деформируемым основанием в СИГГУ, на НДС их конструктивных элементов.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались: экспериментальные методы определения прочности и деформативности грунтов основания и строительных конструкций; определение деформаций основания на основе методов теории упругости; численные методы определения (НДС) системы «ОФС» методом конечных элементов с учетом физической и конструктивной нелинейности; методы расчета конструкций на деформируемом основании с использованием контактных моделей грунтового основания.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

- принципиально новый аналитический метод решения физически нелинейных задач на основе анализа конструктивной нелинейности системы;
- усовершенствованный алгоритм предварительного анализа вероятных схем неравномерных деформаций основания, позволяющий установить наиболее неблагоприятное сочетание детерминированной и случайной составляющей неравномерных деформаций с учетом инженерно-геологического строения массива грунта, действия внешних нагрузок и произвольных наиболее неблагоприятных схем реализации сложных инженерно-геологических условий;
- впервые полученная зависимость неравномерных деформаций основания, вызванных разуплотнением грунта при разработке котлована, от параметров котлована, позволяющая существенно уточнить определение детерминированной составляющей воздействия на здание со стороны деформирующегося основания;
- усовершенствованный алгоритм определения просадочных деформаций от внешней нагрузки на основание, позволяющий отделить просадочные деформации от деформаций сдвига грунта и соответственно получить более корректные значения жесткости основания в расчетной схеме во всем диапазоне возможных давлений на основание;
- впервые определены условия, при которых в расчетных схемах зданий и сооружений на просадочных грунтах нецелесообразен учет возможных просадок от собственного веса грунта;
- впервые предложенная и обоснованная закономерность распределения дополнительных вертикальных напряжений в обводненной зоне набухающего грунта от собственного веса грунта, расположенного за пределами обводненной зоны, позволяющая определять эти напряжения в любой произвольной точке обводненной зоны грунтового массива;
- усовершенствованный алгоритм построения поверхности бугра набухания при замачивании набухающих грунтов сверху, позволяющий определять воздействия в виде вынужденных перемещений основания или дополнительных эквивалентных нагрузок на расчетную схему здания с учетом неоднородности геологического строения грунтового массива, формы обводненной зоны и полей напряжений, как от собственного веса грунта, так и от внешней нагрузки.

Практическая значимость результатов исследований в следующем:

- выполнен критический анализ применимости различных моделей грунтового основания при расчете зданий и сооружений, взаимодействующих с неравномерно деформирующимся основанием;
- предложена уточненная классификация СИГГУ в зависимости от особенностей моделирования взаимодействия ЗиС с неравномерно деформиру-

щимся основанием, позволяющая унифицировать методы моделирования воздействий, вызванных деформирующимся основанием;

- предложен уточненный и упрощенный аналитические методы определения неравномерных осадок, вызванных разуплотнением грунта в котловане;

- разработано программное обеспечение «DesCon», позволяющее определять жесткостные характеристики основания и вынужденные перемещения земной поверхности в сложных инженерно-геологических условиях, которые в дальнейшем используются для совместного расчета системы «основание – фундамент – сооружение». При этом жесткостные характеристики основания определяются с учетом: взаимного влияния фундаментов (загруженных площадей) при различной распределительной способности грунта; разуплотнения грунта в котловане; просадочности; нелинейных деформаций и т.д. Производится также предварительная оценка неравномерности деформирования основания, вызванной как детерминированными, так и случайными факторами;

- разработаны рекомендации по моделированию элементов системы «ОФС» в сложных инженерно-геологических условиях;

- исследована зависимость напряженно-деформированного состояния элементов системы "ОФС" от ее относительной жесткости;

- исследованы мероприятия, позволяющие влиять на жесткость основания с целью снижения усилий и уровня напряжений в конструкциях здания;

- результаты проведенных исследований могут быть использованы для анализа НДС проектируемых и реконструируемых зданий в сложных инженерно-геологических условиях и разработки эффективных технических мероприятий, снижающих уровень напряжений в конструкциях зданий, для конкретных соотношений жесткости элементов системы «ОФС».

Внедрение результатов работы. Материалы исследований использованы при разработке:

- ДБН В.2.1-10-2009 «Основания и фундаменты зданий и сооружений»;

- проекта мер охраны зданий и сооружений г. Ясиноватой, попадающих в зону влияния отработки шахтой «Бутовская» ПО «Макеевуголь»: второй западной разгрузочной лавой пласта n1 в 2001 году; 16-й западной целиковой лавой пласта n1 в 2003 году; 1-й восточной разгрузочной лавы пласта П1 в 2004 году;

- проекта жилого дома в квартале №191а по ул. Розы Люксембург в Ворошиловском районе г. Донецка (на подрабатываемой территории);

- проектов усиления и восстановления жилых, общественных и промышленных зданий, эксплуатирующихся на просадочных грунтах в городах Донецкого региона (Мариуполь, Краматорск, Доброполье);

- проектов усиления и восстановления жилых, общественных и промышленных зданий, эксплуатирующихся на подрабатываемых территориях в городах Донецкого региона (Донецк, Горловка, Макеевка, Ясиноватая);

- проектов усиления и восстановления промышленных зданий, эксплуатирующихся на карстоопасных территориях в г. Славянске;
- проектов зданий базы отдыха «Вертикаль» на слабых водонасыщенных грунтах в с. Белосарайская коса;
- мер защиты жилых зданий, эксплуатирующихся на оползнеопасной территории в г. Зугрэсе;
- проекта восстановления набережной пансионата «Волна» в пгт. Седово;
- лекционного материала по дисциплине «Здания и сооружения в сложных инженерно-геологических и горно-геологических условиях» при подготовке магистров по направлению подготовки 08.04.01 «Строительство» по программе подготовки «Теория и проектирование зданий и сооружений»;
- магистерских диссертаций (всего около 25) и одной кандидатской диссертации, выполненных на кафедре «Основания, фундаменты и подземные сооружения» ГОУ ВПО «ДонНАСА» (2005-2019 гг.) под руководством автора.

Результаты внедрены следующими организациями: ГОУ ВПО «ДонНАСА»; ГП Донецкий ПромстройНИИпроект; ЧАО «Институт Донбассреконструкция»; КУ «ЦГБ администрации г. Дебальцево»; ГУ ДонГипрошахт.

Личный вклад соискателя. Приведенные в диссертационной работе результаты исследований получены соискателем самостоятельно. Отдельные составляющие численных исследований выполнены с соавторами научных работ, представленных в списке публикаций.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечена: применением стандартных методик определения физико-механических характеристик грунта; определение НДС конструкций зданий и сооружений, с использованием традиционных методов теории взаимодействия конструкций с деформируемым основанием и сертифицированного программного обеспечения; удовлетворительной сходимостью результатов численных исследований и результатов натурных обследований.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертационной работы докладывались автором на: научно-технической конференции творческой молодежи «Перспективы розвитку будівельних конструкцій, будівель, споруд та їх основ» (Киев, 2003 г.); заседании Ученого совета Научно-исследовательского и проектного института Донецкий ПромстройНИИпроект (Донецк, 2004 г.); восьмой Всеукраинской научно-технической конференции «Механика грунтов, геотехника и фундаментостроение» (Полтава, 2013 г.); на научных конференциях Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (Макеевка, 2009–2020 гг.); X Юбилейной Всеукраинской научно-технической конференции «Строительство в сейсмических районах Украины» (Одесса, 2015 г.); XVIII международной межвузовской научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов и докторантов «Строительство –

формирование среды жизнедеятельности» (Москва, 2015 г.); VI международной научно-практической конференции «Достижения и перспективы естественных и технических наук» (Ставрополь, 2015); II Брянском международном инновационном форуме «Строительство – 2016» (Брянск, 2016 г.); международной научной конференции «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании» (Москва, 2016 г.); научных семинарах кафедры «Основания, фундаменты и подземные сооружения» (Макеевка, 2016–2020 гг.); международной научной конференции “International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering” (СПб 2018); международной научно-технической интернет-конференции «Кадастр недвижимости и мониторинг природных ресурсов» (Тула, 2018); XXII международной научной конференции "Construction the Formation of Living Environmen" (Ташкент, 2019); национальной научно-технической конференции с иностранным участием «Нелинейная механика грунтов и численные методы расчётов в геотехнике и фундаментах» (Воронеж, 2019 г.); международной научной конференции «Modelling and Methods of Structural Analysis» (Москва, 2019 г.); IX международной научной конференции «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (Москва, 2020 г.); XXIII международной научной конференции "Construction the Formation of Living Environmen" (Ханой, 2020).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 работ, из которых 14 публикаций в рецензируемых научных изданиях, 4 – в зарубежных изданиях, индексируемых международной реферативной базой цитирования SCOPUS, 3 – в сборниках трудов международных и региональных научных конференций, 2 – декларационных патента на изобретение, 1 – монография, другие публикации по теме диссертации – 1.

Общий объем публикаций без учета монографии – 10.95 п.л., из которых 5.28 п.л. принадлежат лично автору.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести разделов, общих выводов и рекомендаций, библиографического списка из 465 наименований, приложений и содержит 432 страницы, в том числе 327 страниц основного текста, 47 страниц списка использованной литературы, 42 полных страницы с рисунками и таблицами и 16 страниц приложений.

На защиту выносятся:

1. Аналитический метод определения нелинейных деформаций основания фундаментов мелкого заложения, с учетом неоднородности грунтового массива по глубине, в том числе при наличии слабых подстилающих слоев грунта.

2. Алгоритм предварительного анализа вероятных схем неравномерных деформаций основания, позволяющий установить наиболее неблагоприятное сочетание детерминированной и случайной составляющей неравномерных деформаций с учетом инженерно-геологического строения массива грунта, дей-

ствия внешних нагрузок и произвольных наиболее неблагоприятных схем реализации сложных инженерно-геологических условий.

3. Зависимость неравномерных деформаций основания, вызванных разуплотнением грунта при разработке котлована от параметров котлована, позволяющая существенно уточнить определение детерминированной составляющей воздействия на здание со стороны деформирующегося основания.

4. Алгоритм определения просадочных деформаций от внешней нагрузки на основание, позволяющий отделить просадочные деформации от деформаций сдвига грунта и соответственно получить более корректные значения жесткости основания в расчетной схеме во всем диапазоне возможных давлений на просадочное основание.

5. Условия, при которых в расчетных схемах ЗиС на просадочных грунтах нецелесообразен учет возможных просадок от собственного веса грунта.

6. Закономерность распределения дополнительных вертикальных напряжений в обводненной зоне набухающего грунта от собственного веса грунта, расположенного за пределами обводненной зоны, позволяющая определять эти напряжения в любой точке обводненной зоны грунтового массива.

7. Алгоритм построения поверхности бугра набухания при замачивании набухающих грунтов сверху, позволяющий определять воздействия в виде вынужденных перемещений основания или дополнительных эквивалентных нагрузок на расчетную схему здания с учетом неоднородности геологического строения грунтового массива, формы обводненной зоны и полей напряжений, как от собственного веса грунта, так и от внешней нагрузки.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены объект и предмет исследования, сформулирована цель и задачи диссертационного исследования; приведены научная новизна и практическая значимость полученных результатов; положения, выносимые на защиту; обоснованность и достоверность научных положений и выводов; апробация результатов диссертации; количество публикаций, структура и объем диссертации.

Первый раздел посвящен анализу состояния вопроса и уровня научных достижений в области моделирования и расчета системы «ОФС» в сложных инженерно-геологических условиях.

Показано, что любой строительный объект представляет собой многокомпонентную систему взаимодействующих элементов «Основание – Фундамент – Сооружение», напряженно-деформированное состояние которых зависит от жесткостных характеристик всех элементов системы.

Выполнен критический анализ научно-технической литературы и основных положений норм проектирования по следующим темам: моделирование системы «ОФС» и ее элементов при решении контактных задач; особенности

моделирования и методы определения деформаций основания в различных СИГГУ; САПР, применяемые для расчетов системы «ОФС».

Моделям грунтового основания (МГО) посвящены работы: Филоненко-Бородича М.Н., Власова В.З., Леонтьева Н.Н., Пастернака П.Л., Медникова И.А., Клейна Г.К., Клепикова С.Н., Штаермана И.Я., Жемочкина Б.Н., Сеницына А.П., Coulomb Ch., Roscoe K.H., Borland J.B., Vermeer P.A. и др. МГО можно разделить на контактные (моделирующие только условия контакта ЗИС с основанием) и механические (представляющие собой достаточно большой фрагмент грунтового массива с механическими характеристиками).

В большинстве современных программных комплексов широко применяется, предложенная еще в 1956 году, контактная модель Пастернака П.Л., применение которой в расчетах конструкций на упругом основании является спорным, так как касательные напряжения, возникающие на контактной поверхности, могут привести к занижению внутренних усилий в конструкциях фундаментов. Механические МГО, как правило, являются более трудоемкими, требовательны к объемам и программе ИГ изысканий и не всегда позволяют учесть особые свойства грунтов, характерные для некоторых СИГГУ.

Развитию нелинейных моделей грунтового основания посвящали работы Бугров А.К., Зарецкий Ю.К., Орехов В.В., Шапиро Д.М., Попов Б.П., Малышев М.В., Никитина Н.С., Алексеев С.И., Вялов С.С., Мурзенко Ю.Н., Гольдштейн М.Н., Кушнер С.Г., Клепиков С.Н., Метелюк Н.С., Рыжов А.М., Петраков А.А., Пилягин А.В., Фадеев А.Б., Алехин А.Н., Киричек Ю.А., Трегуб А.В., Мирсаяпов И.Т., Криворотов А.П., I.L. Kristić, V. Szavits-Nossan и др.

Реологическим моделям основания посвящены работы Вялова С.С., Ломизе Г.М., Крыжановского А.Л., Метелюка Н.С., Леденёва В.В. и др.

Несмотря на то, что в последнее время все чаще применяются нелинейные модели основания, основанные на решении смешанной упругопластической задачи с использованием различных видов условия прочности, в практическом использовании по-прежнему широко распространены решения, имеющие, как правило, упрощенный вид. Это в достаточной мере обосновывается нецелесообразностью строгого математического решения при недостаточной надежности определения исходных данных о механическом поведении грунтов.

Использование метода конечных элементов (МКЭ) при моделировании грунтового основания освещено в работах Ухова С.Б., Фадеева А.Б., Мангушева Р.А., Карлова В.Д., Сахарова И.И., Кудрявцева С.А., Парамонова В.Н., Улицкого В.М., Шашкиных А.Г. и К.Г. и др.

Методам расчета зданий, взаимодействующих с деформируемым основанием посвящены работы Филоненко-Бородича М.М., Жемочкина Б.Н., Кузнецова В.И., Горбунова-Посадова М.И., Симвулиди И.А., Сеницына А.П., Егупова В.К., Клепикова С.Н., Козачевского А.А., Косицына Б.А., Лишака В.И., Со-

болева Д.Н., Мустафаева А.А., Мейергоффа Ж., Метелюка Н.С., Милюкова Д.А., Петракова А.А., Шагина П.П., Вольфсона Б.Г., Милейковского И.Е., Гарагаша Б.А., Дроздова П.Ф., Дыховичного Ю.А., Командриной Т.А., Подольского Д.М., Пшеничкина А.П., Кисиль А.И., Левина В.М., Егупова К.В., Верюжского Ю.В., Шулятьева С.О. и др.

Применение МКЭ при расчете зданий рассматривается в работах Дмитриева Л.Г., Городецкого А.С., Александрова А.В., Шапошникова И.Н, Мануйлова Г.А., Немчинова Ю.И., Фролова А.В., Клованича С.Ф., Перельмутера А.В., Лишака В.И, Клованича С.Ф., Кашеваровой Г.Г., Труфанова Н.А. и др.

Так как жесткость всех элементов системы «ОФС» зависит от их напряженного состояния, а напряженное состояние в свою очередь от жесткостных характеристик элементов, точное прямое решение задачи взаимодействия невозможно. В связи с этим, как правило, задачи взаимодействия системы «ОФС» решаются итерационным способом пока не будет достигнута требуемая точность решения. В СИГГУ, когда помимо детерминированной неравномерности деформаций основания присутствуют дополнительные стохастические неравномерные деформации основания, поиск решения существенно усложняется.

Следует отметить, что при определении жесткостных характеристик элементов здания, взаимодействующего с неравномерно деформируемым основанием, как правило, необходим учет: истории нагружения и формирования жесткости, физической, а иногда и конструктивной нелинейности.

Нелинейный расчет железобетонных и металлических конструкций достаточно подробно рассмотрен в работах Дыховичного А.А., Блюгера Ф.Г., Акуленко М.М., Петракова А.А., Межеревского В.А., Крылова С.М., Печенова А.Н., Емец Е.В., Эренбурга В.М., Манискевича Е.С, Бачинского В.Я. и др.

Исследования работы бескаркасных зданий на неравномерно деформируемых основания приведены в работах Бугрова А.К., Плакса А.А., Лишака В.И., Собуцкого В.А., Соколенко В.М., Москалина И.Н., Кравцова В.Г., Семчиной М.В., Гарагаша Б.А. и др.

Вопросы учета изменения жесткостей элементов в процессе монтажа, эксплуатации и реконструкции рассмотрены в работах Перельмутера А.В., Кабанцева О.В., Тамразяна А.Г., Банаха В.А., Шагина А.Л., Винникова Ю.Л., Мушанова В.Ф., Егорова А.И.

Целенаправленное изменение жесткости конструктивных элементов и основания в процессе возведения и эксплуатации с целью регулирования усилий в элементах системы рассматривалось в работах Тетиора А.Н., Клепикова С.Н., Петракова А.А., Виноградова В.Н., Айвазова Р.Л., Иконина С.В., Сухотерина А.В., Пронозина Я.А., Киселева Н.Ю., Брыжатой Е.О., Живодерова Н.А., Гусаренко С.П., Скибина М.Г., Зотова М.В., Зотова А.М., Петрухина В.П., Шулятьева О.А., Мозгачевой О.А., Рубцова О.И., Шокарева В.С., Gromysz K. и др.

Развитие динамических моделей и учет динамических воздействий рассматривались Кулябко В.В., Пшеничкиной В.А., Банах А.В. и др.

Вопросы строительства и расчета ЗиС на просадочных грунтах рассматривались в трудах Абелева Ю.М., Абелева М.Ю., Багдасарова Ю.А., Галай Б.Ф., Гильмана Я.Д., Гольдштейна М.Н., Григорян А.А., Клепикова С.Н., Крутова В.И., Кушнера С.Г., Левченко А.П., Литвинова И.М., Ломизе Г.М., Маркова А.И., Матвеева И.В., Межеревского В.А., Мустакимова В.Р., Мустафаева А.А., Прокопова А.Ю., Пшеничкина А.П., Тер-Мартirosяна З.Г., Шагина П.П., Цытовича Н.А., Полищука А.И., Трегуба А.С., Розенфельда И.О., Хохлина Д.А., Jefferson I.F., Houston, S.L., Noor S.T., Zhu G. и др.

Следует отметить, что определение просадочных деформаций общепринятым методом, но с учетом, казалось бы, незначительных отличий, имеющихся в различных нормативных документах, может привести к существенно отличающимся результатам.

Механизм процесса набухания глинистых грунтов и модели взаимодействия зданий с набухающим грунтом нашли отражение в исследованиях Ананьева В.П., Герсегованова Н.М., Денисова Н.Я., Ломтадзе В.Д., Клепикова С.Н., Кузнецова Д.Г., Мустафаева А.А., Ребиндера П.А., Самедова А.М., Сергеева Е.М., Сорочана Е.А., Сницарь М.А., Голли О.Р., Тер-Мартirosяна З.Г., Невзорова А.Л., Charles Lucian, Coduto Donald P., Lytton R.L., Chen F.H., Emad Jahangir, Olivier Deck, Farimah Masrouri и др.

Основные принципы проектирования зданий на водонасыщенных биогенных грунтах рассмотрены в работах Абелева М.Ю., Морарескула Н.Н., Коновалова П.А., Улицкого В.М., Шашкиных А.Г. и К.Г., Шаповала В.Г., Макарова Б.П., Кочеткова Б.Е. и др.

Основные принципы проектирования зданий на насыпных грунтах рассмотрены в работах Абелева Ю.М., Крутова В.И., Ковалева А.С., Ковалева В.А., Коновалова П.А. и др.

Основные принципы проектирования зданий на намывных грунтах рассмотрены в работах Коновалова П.А., Никифоровой Н.С., Слюсаренко С.А., Степаненко Г.П., Готовой М.А., Новикова М.Ф. и др.

Основные принципы проектирования зданий на пучинистых и вечномёрзлых грунтах рассмотрены в работах Цытовича Н.А., Салтыкова Н.И., Далматова Б.И., Вялова С.С., Мосенкиса Ю.М., Невзорова А.Л., Кудрявцева С.А. и др.

Вопросами расчета зданий на подрабатываемых территориях занимались Милюков Д.А., Петраков А.А., Юшин А.И., Золотозубов Д.Г., Черный Г.И., Клепиков С.Н., Лысиков Б.А., Розенвассер Г.Р., Грищенков Н.Н., Борщевский С.В., Бейлинов Я.И., Муллер Р.А., Жусупбеков А.Ж., Прокопов А.Ю., Синепальников С.Г., Тимченко Р.А., Воробьев А.В., Olivier Deck, Marwan Al Heib, Françoise Homand, H. Anirudh, Tomlinson M.J., Boorman R. и др.

Вопросами расчета зданий на карстоопасных территориях занимались Готман Н.З., Готман А.Л., Каюмов М.З., Давлетяров Д.А., Сорочан Е.А., Березань Н.А., Виноградов В.Н., Давыдько Р.Б., Толмачев В.В., Лодыгина Н.Д., Кухарь А.В., Родин С.В., Табеев И.Р., Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.П., Дыховичный Ю.А., Метелюк Н.С., Левченко А.П. и др.

Вопросами проектирования зданий на территориях с техногенным влиянием занимались Коренев Е.Б., Зарецкий Ю.К., Знаменский В.В., Улицкий В.М., Шашкины А.Г. и К.Г., Четвериков А.Л., Сотников С.Н., Мангушев Р.А., Никифорова Н.С., Прокопов А.Ю., Прокопова М.В., Пономарев А.Б., Калошина С.В., Золотозубов Д.Г., Никулин А.В., Баркан Д.Д., Рудь В.К., Швеи Н.С., Седин В.Л., Киричек Ю.А., Банах В.А., Мирсаяпов И.Т., M. Schuster, C. Juang, M. Roth, D. Rosowsky, H. Faheem, F. Cai, K. Ugai, Zradkovic L, Potts D.M., R. Finno, J. Blackburn, J. Roboski, R. Fuentes., K.H. Goh, R.J. Mair, P.S. Dimmock и др.

Вопросы инженерной защиты ЗИС на подтапливаемых территориях рассмотрены в работах Слюсаренко Ю.С., Шуминского В.Д., Шаповала В.Г. и др.

Вопросы обеспечения безаварийной эксплуатации ЗИС на оползнеопасных территориях рассмотрены в работах Далматова Б.И., Зоценко Н.Л., Винникова Ю.Л., Клейна Г.К., Клованича С.Ф., Лучковского И.Я., Петракова А.А., Петраковой Н.А., Прокопова А.Ю., Тер-Мартirosяна З.Г., Швеца В.Б., Бойко И.П., Школы А.В., Тимченко Р.А., Гинзбурга Л.К., Robert L. Schuster, Raymond J. Krizek, Craig R.F. и др.

Вопросы расчета и проектирования зданий на сейсмоопасных территориях рассмотрены в работах Клованича С.Ф., Полякова В.С., Килимника Л.Ш., Черкашина А.В., Кулябко В.В., Измайлова Ю.В., Тяпина А.Г., Мирсаяпова И.Т., Егупова В.К., Давиденко А.И., Дж. Ф. Борджеса, Бирбраера А.Н., Роледе-ра А.Ю., Окамото Ш., Datta T.K., Karpos A.J. и др.

Численные методы расчета ЗИС совместно с основанием в некоторых видах СИГГУ сталкиваются, как с неопределенностью схемы неравномерных деформаций основания, так и с проблемами моделирования особых (специфических) свойств грунтового массива и деформационных воздействий со стороны основания, не зависящих от внешней нагрузки на основание. Вследствие этого на определенных этапах численного расчета требуется применение аналитических методов определения деформаций основания, вызванных СИГГУ.

Аналитические методы определения деформаций основания в различных СИГГУ рассмотрены в работах Антонова В.М., Леденева В.В., Петракова А.А., Зоценко Н.Л., Левченко А.П. и др.

При этом следует отметить, что определение неравномерных деформаций основания аналитическими методами преимущественно состоит из определения экстремального перемещения или деформации, в какой либо характерной точке основания, например в центре зоны обводнения, и последующей аппрок-

симации закономерности деформирования поверхности основания в окрестностях вышеуказанной характерной точки, какой либо линейной или нелинейной функцией. При этом возможно снижение точности, так как не учитываются особенности местных инженерно-геологических условий, распределение напряжений и т.д.

Также, технической проблемой расчетов системы «ОФС» является объединение современных моделей грунтового основания и моделей строительной механики, описывающих работу строительных конструкций, в каком-то одном программном комплексе (ПК). В результате этого большинство существующих ПК ориентировано либо на решение геотехнических задач, либо на расчет строительных конструкций. В последние годы наметилась интеграция разнонаправленных ПК для решения задач взаимодействия системы «ОФС», а также их постепенное развитие в сторону универсальности. Существуют также «универсальные» ПК, которые, однако, имеют довольно сложный для обычного пользователя интерфейс, высокие требования к вычислительной технике и квалификации исполнителей и соответственно гораздо менее востребованы в практике строительного проектирования.

На основе анализа и обобщения известных исследований обоснованы целесообразность и актуальность выполнения этой работы, сформулированы цель и задачи исследований.

Второй раздел посвящен определению воздействий на ЗиС от сложных инженерно-геологических условий и содержит ряд предложений автора по совершенствованию аналитических методов определения неравномерных деформаций основания, учитываемых как в основном, так и особом сочетании нагрузок и воздействий. Рассмотрены возможные сочетания различных СИГГУ, воздействия от которых одновременно учитываются в особом сочетании нагрузок.

Предложена классификация сложных инженерно-геологических условий, учитывающая зависимость процесса неравномерного деформирования основания от внешней нагрузки.

Суммарная потенциальная неравномерность деформирования основания фундаментов (точек), расположенных на расстоянии L друг от друга

$$\frac{|\Delta s|}{L} = \frac{|\Delta s_o + \Delta s_{add}|}{L}, \quad \Delta s_o = \Delta s_p + \Delta s_k + \Delta s_{nf} + \Delta s_{nl} + \Delta s_t, \quad (1)$$

где Δs_o – разность вертикальных деформаций основания, учитываемая в основном сочетании нагрузок; Δs_{add} – наиболее неблагоприятная разность вертикальных деформаций основания, вызванная возможным сочетанием СИГГУ в процессе эксплуатации ЗиС, и учитываемая в особом сочетании нагрузок; Δs_p – разность осадок в результате уплотнения основания от нагрузок на фундаменты; Δs_k – разность осадок в результате разуплотнения основания ниже дна котлована из-за уменьшения напряжений при разра-

ботке грунта; Δs_{nf} – разность осадок, вызванная влиянием соседних фундаментов или загруженных площадей; Δs_{nl} – разность осадок в результате деформаций сдвига при превышении давлениями предела линейной деформируемости; Δs_t – разность осадок в результате расструктурирования грунтов во время производства работ.

Полностью детерминированными неравномерностями деформаций при совместном расчете системы «ОФС» можно считать только Δs_k и Δs_t , так как остальные являются зависимыми от перераспределения нагрузок на основание при проявлении Δs_{add} .

Определение всех компонент предлагается с использованием аналитических методов определения перемещений и деформаций в ряде различных точек основания в плане с учетом, как неоднородности геологического строения, так и неравномерности распределения полей напряжений, влажности и температуры по вертикалям, проходящим через расчетные точки.

В подразделе 2.2 даны предложения и рекомендации по совершенствованию методов определения неравномерных деформаций основания, учитываемых в основном сочетании нагрузок и вызванных: разуплотнением грунта при разработке котлована; распределительной способностью и неоднородностью геологического строения основания; деформациями сдвига.

Сделано предположение о существующей зависимости соотношения осадок, вызванных разуплотнением грунта при устройстве котлована, в различных характерных точках дна котлована от относительных размеров котлована [15]. Это позволило при относительно равномерном напластовании грунтов упростить определение осадки от разуплотнения грунта $s_{k,x}$ в произвольной точке, расположенной на расстоянии x от центра поперечного сечения котлована, с использованием условного радиуса кривизны R_k

$$R_k = \frac{B_k^2}{8 \cdot (s_{k,c} - s_{k,b})} = \frac{B_k^2}{8 \cdot (1 - k_b) \cdot s_{k,c}}, \quad s_{k,x} = s_{k,c} - \frac{x^2}{2 \cdot R_k} \quad (2)$$

где $s_{k,c}$ и $s_{k,b}$ – осадка от разуплотнения грунта соответственно в центральной и крайней точках поперечного сечения котлована; B_k – ширина котлована; k_b – коэффициент соотношения осадок крайней и центральной точек, зависящий от относительной ширины котлована B_k / D_k , отношения сторон котлована L_k / B_k и крутизны откосов.

Предложен метод определения конечных нелинейных осадок фундамента мелкого заложения во всем диапазоне давлений вплоть до исчерпания несущей способности основания с учетом неоднородности грунтового массива по глубине, в том числе при наличии слабых подстилающих слоев грунта.

Дополнительная осадка основания s_{nl} , вызванная деформациями сдвига, определяется шаговой интерпретацией метода послойного суммирования,

приводящей к вырождению расчетных слоев в процессе решения задачи, что позволяет рассматривать решаемую задачу как геометрически нелинейную [16]

$$s_{nl} = \sum_{i=1}^n (h_i - s_{p,i}) \cdot k_i, \quad k_i = \frac{k_{s,i} \cdot \sigma_{u,i}}{(1 + k_{s,i}) \cdot \sigma_{u,i} - \sigma_{z,i}} \cdot \frac{(\sigma_{z,i} - \sigma_{cr,i})}{(\sigma_{u,i} - \sigma_{cr,i})}, \quad (3)$$

где h_i – толщина $\bar{t}^{\text{того}}$ элементарного слоя; $s_{p,i}$ – осадка в результате уплотнения основания; k_i – коэффициент приближения к предельному состоянию в $\bar{t}^{\text{том}}$ слое, описываемый гиперболической зависимостью с областью определения от 0 до 1; $\sigma_{z,i}$ – полное напряжение в $\bar{t}^{\text{том}}$ элементарном слое; $\sigma_{cr,i}$ и $\sigma_{u,i}$ – напряжения, соответствующие начальному критическому давлению и предельному сопротивлению $\bar{t}^{\text{того}}$ элементарного слоя; $k_{s,i}$ – коэффициент, зависящий от вида и состояния грунта, а также параметров фундамента

$$k_{s,i} = \frac{\nu_i^2}{16} \cdot (0,5 + 0,5 / \eta) \cdot \left(0,5 + \frac{(d + z_i)}{b} \right), \quad (4)$$

где ν – коэффициент Пуассона грунта; η – отношение сторон подошвы фундамента $\eta = l/b$; d – глубина заложения подошвы фундамента; z_i – глубина рассматриваемой точки от подошвы фундамента.

Применение коэффициента $k_{s,i}$ позволяет аппроксимировать практически любую кривую зависимости осадки от давления.

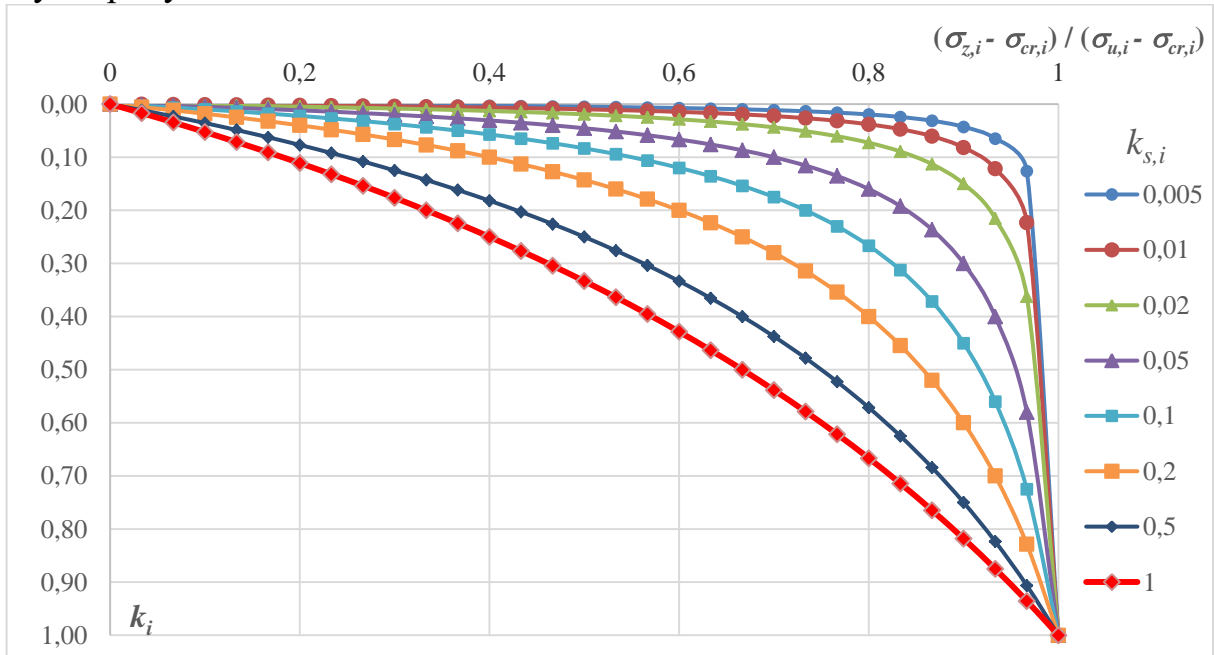


Рис. 1 Зависимость коэффициента k от давления при различных значениях k_s

Так как осадка $s_{nl,i}$ происходит за счет вытеснения грунта в стороны из под подошвы фундамента, уменьшая тем самым толщину $\bar{t}^{\text{того}}$ слоя грунта и соответственно его распределительную способность, производится корректировка глубины $z_{i+1} = h_i - s_{nl,i}$ для следующего элементарного слоя.

В подразделе 2.3 рассмотрены методы определения неравномерных деформаций основания, учитываемых в особом сочетании нагрузок и вызванных СИГГУ, и даны предложения по совершенствованию некоторых из них.

Определение просадочных деформаций в соответствии с действующими нормами РФ и Украины не всегда приводит к достаточно удовлетворительным и теоретически обоснованным результатам из-за коэффициента k_{sl} , применяемого к верхней зоне просадки и имеющего ограниченную область применения [7]. За пределами корректной области применения значения поправочного коэффициента могут приводить как к завышению, так и занижению просадки.

В связи с этим автором предложен усовершенствованный алгоритм определения просадочных деформаций от внешней нагрузки на основание с учетом размеров подошвы фундамента и характера распределения напряжений в грунтовом массиве:

1. Просадочная толща по рассматриваемой вертикали разбивается на элементарные слои с учетом инженерно-геологического строения, обводнения и напряженного состояния грунтового массива.

2. В каждом обводненном элементарном слое просадочного грунта определяются напряжения $\sigma_{zg,i}$ ($\sigma_{zg,sat,i}$), $\sigma_{z,i}$ и если они превышают начальное просадочное давление $p_{sl,i}$ в этом слое, то определяются соответствующие просадочные деформации по формулам:

$$s_{sl,g,i} = \varepsilon_{sl,g,i} \cdot h_i, \quad s_{sl,i} = \varepsilon_{sl,i} \cdot h_i, \quad s_{sl,p,i} = s_{sl,i} - s_{sl,g,i}. \quad (5)$$

4. Так как коэффициент k_{sl} учитывает горизонтальные (боковые) уплотнения просадочного грунта при сдвиговых деформациях определим верхнюю зону просадки, в пределах которой будет учитываться данный коэффициент. То есть в качестве верхней зоны просадки рассматривается зона, в которой сдвиговые деформации оказывают существенное влияние на полное значение просадки. Верхняя зона просадки $h_{sl,p}$ измеряется начиная от подошвы фундамента и до нижней границы верхней зоны, которая соответствует глубине, где $\sigma_z = p_{sl}$ либо глубине, где σ_z минимально, если $\sigma_{z,min} > p_{sl}$, но принимается не более $0,25 \cdot b$ и не более величины определяемой по формуле

$$h_{sl,p} \leq b \cdot \frac{12 - b}{10} \cdot \frac{(p_{cp} - p_{sl})}{p_0} \quad (6)$$

где b – ширина подошвы фундамента, при $b > 12$ м принимается равной 12 м; p_{cp} – среднее давление по подошве фундамента; p_{sl} – начальное просадочное давление в уровне подошвы фундамента; p_0 – давление равное 100 кПа.

5. При просадочной толще, превышающей верхнюю зону просадки, просадка от внешней нагрузки может наблюдаться и за пределами верхней зоны просадки, в том числе и в нижней зоне просадки, однако сдвиговые деформации будут возникать только в верхней зоне просадки, в которой

напряжения от внешней нагрузки существенно превышают напряжения от собственного веса. В связи с этим выделим просадочные деформации от внешней нагрузки, возникающие только в верхней зоне просадки $s'_{sl,p}$ и определим поправочный коэффициент, применяемый к верхней зоне просадки

$$s'_{sl,p} = \sum_{i=1}^m s_{sl,p,i}, \quad k_{sl} = 0,2 \cdot s'_{sl,p} / s_0, \quad (7)$$

где m – количество элементарных слоев в пределах верхней зоны просадки;

$s'_{sl,p}$ – просадка фундамента от внешней нагрузки при $k_{sl}=1$ в пределах только верхней зоны просадки; s_0 – осадка, принимаемая равной 1 см.

6. Расчетные значения просадки от внешней нагрузки, от собственного веса грунта и полное значение просадки определяются по формулам:

$$s_{sl,p} = \sum_{i=1}^n s_{sl,p,i} + s'_{sl,p} \cdot k_{sl}, \quad s_{sl,g} = k_{sl,g} \cdot \sum_{i=1}^n s_{sl,g,i}, \quad s_{sl} = s_{sl,p} + s_{sl,g} \quad (8)$$

где $k_{sl,g}$ – коэффициент, применяемый к нижней зоне просадки.

Подъем основания при набухании грунта h_{sw} определяется по формуле

$$h_{sw} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{sw,i} \cdot h_i \cdot k_{sw,i} \cdot k_{t,i}, \quad k_t = 0,84 + 0,008 \cdot t \quad (9)$$

где $\varepsilon_{sw,i}$ – относительное набухание грунта $i^{\text{го}}$ элементарного слоя; h_i – толщина $i^{\text{го}}$ элементарного слоя набухающего грунта; $k_{sw,i}$ – коэффициент, учитывающий напряженное состояние $i^{\text{го}}$ слоя; $k_{t,i}$ – коэффициент, учитывающий влияние температуры $i^{\text{го}}$ слоя; t – температура в град Цельсия.

Относительное набухание грунта ε_{sw} существенно зависит от давления, действующего на грунт. При этом наибольшее снижение относительного набухания происходит при возрастании давления от 0 до 150 кПа.

Суммарное вертикальное напряжение $\sigma_{z,tot,i}$ на глубине z_i от подошвы фундамента определяется по формуле

$$\sigma_{z,tot,i} = \sigma_{zp,i} + \sigma_{zg,i} + \sigma_{z,ad,i}, \quad \sigma_{z,ad,i} = k_{g,i} \cdot \gamma \cdot (d + z_i), \quad (10)$$

где $\sigma_{z,ad,i}$ – дополнительное вертикальное напряжение (при замачивании сверху), вызванное влиянием собственного веса неувлажненной части массива грунта за пределами обводненной зоны выше рассматриваемой глубины z_i ; $k_{g,i}$ – коэффициент, зависящий от соотношений геометрических параметров замачиваемой площади L_w/B_w и относительной глубины слоя $(d+z_i)/B_w$; L_w и B_w – соответственно больший и меньший размер замачиваемой площади.

Коэффициент $k_{g,i}$, протабулированный в действующих нормах, позволяет определять $\sigma_{z,ad,i}$ только для вертикали, проходящей через центр замачиваемой площади. В связи с этим автором сделано предположение о распределении дополнительных давлений в виде линейных треугольных эпюр, площадь которых равна массе соответствующей влияющей неувлажненной части

грунтового массива. При наложении эпюр друг на друга они суммируются (рис. 2б), в том числе и во взаимно перпендикулярных плоскостях. Такая форма распределения дополнительных давлений с точки зрения автора позволит более корректно определять поле напряжений и соответственно подъем поверхности по вертикалям, проходящим через точки, отличные от центра замачиваемой площади. Так как при смещении относительно центра замачивания влияние неувлажненных участков массива грунта меняется (рис. 2б) коэффициент $k_{g,i}$ в произвольной точке грунтового массива с координатами (x, y, z_i) определяется

$$k_{g,i}(x, y) = k_{g,i}(x) + k_{g,i}(y), \quad (11)$$

где $k_{g,i}(x)$ и $k_{g,i}(y)$ – коэффициенты, учитывающие влияние неувлажненных частей грунтового массива, расположенных по обе стороны площади замачивания вдоль короткой и длинной стороны соответственно; z_i – глубина рассматриваемой точки от поверхности грунтового массива.

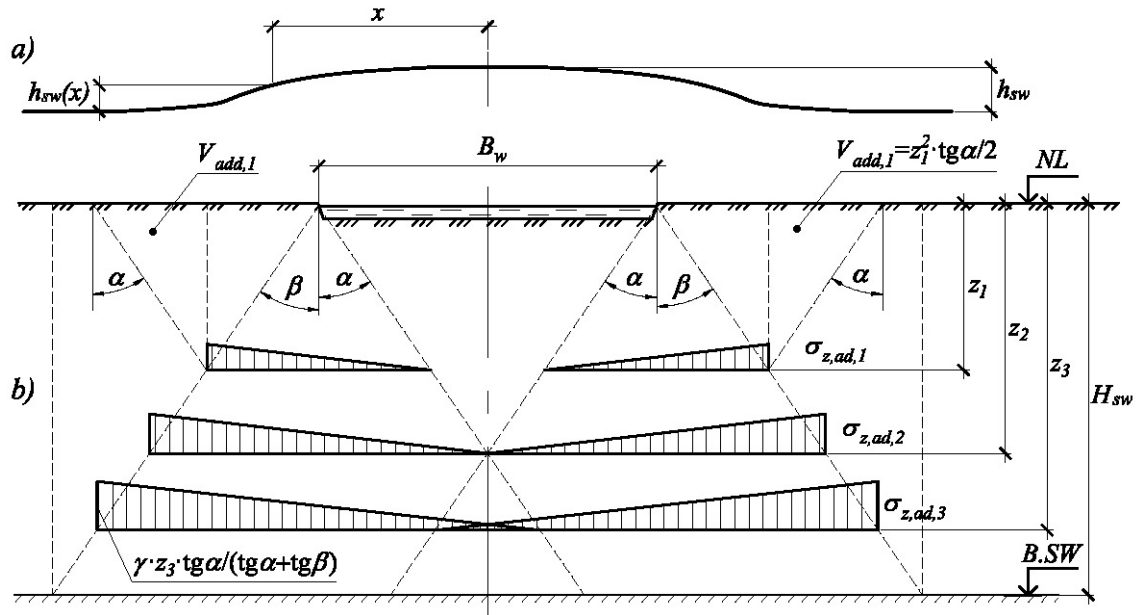


Рис. 2 Схема к определению: а – подъема поверхности основания; б – дополнительного давления по предложению автора работы; β – угол растекания воды; α – угол распределения вертикальных напряжений

Обе составляющие в формуле (11) определяются в зависимости от того, в зону влияния каких неувлажненных частей грунтового массива попадает рассматриваемая точка [11]:

– при $0.5 \cdot B_w > z_i \cdot \operatorname{tg} \alpha$ и $|x| \leq 0.5 \cdot B_w - z_i \cdot \operatorname{tg} \alpha$ рассматриваемая точка находится вне зоны влияния неувлажненных частей грунтового массива, расположенных по оси x по обе стороны от замоченной площади, соответственно $k_{g,i}(x) = 0$;

– при попадании рассматриваемой точки в зону влияния только ближайшей неувлажненной части грунтового массива

$$k_{g,i}(x) = \frac{z_i - 0.5 \cdot B_w + |x|}{3.4 \cdot z_i}; \quad (12)$$

– при $0.5 \cdot B_w \leq z_i \cdot \operatorname{tg} \alpha$ и $|x| < z_i \cdot \operatorname{tg} \alpha - 0.5 \cdot B_w$ рассматриваемая точка попадает в зону влияния неувлажненных частей грунтового массива, расположенных по обе стороны от увлажненной зоны, соответственно

$$k_{g,i}(x) = \frac{(z_i - 0.5 \cdot B_w + x) + (z_i - 0.5 \cdot B_w - x)}{3.4 \cdot z_i} = \frac{2 \cdot (z_i - 0.5 \cdot B_w)}{3.4 \cdot z_i}. \quad (13)$$

Коэффициент $k_{g,i}(y)$ определяется аналогично, по формулам (12, 13) с заменой в них соответственно x на y и B_w на L_w .

Анализ полученных зависимостей показал, что они более корректно учитывают влияние неувлажненных частей грунтового массива, расположенных в направлении длинной стороны площади замачивания, по сравнению с протабулированными зависимостями (рис. 3).

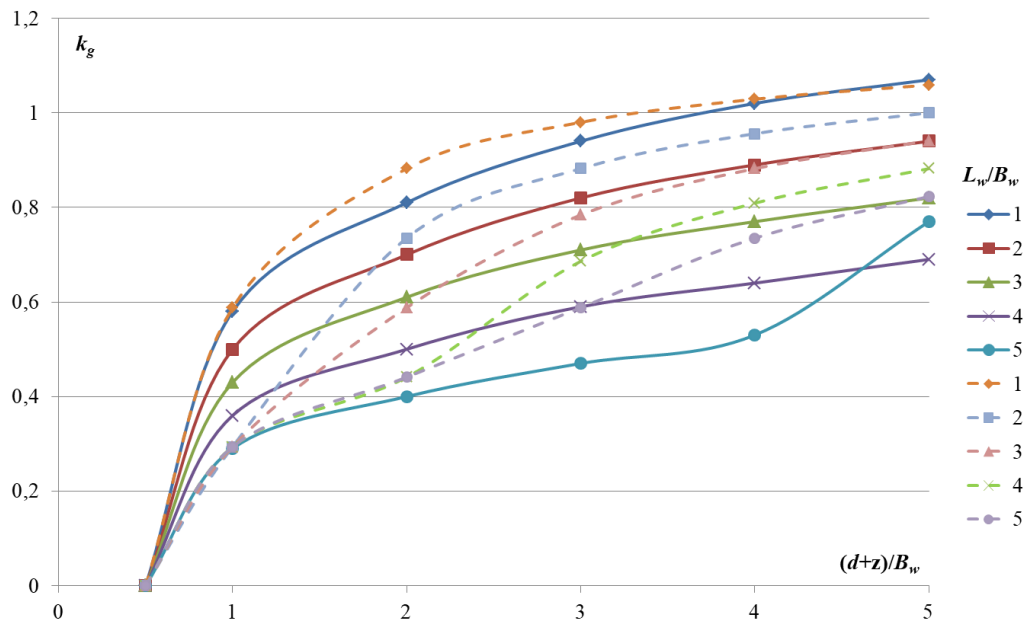


Рис. 3 Зависимость коэффициента k_g по оси, расположенной в центре замачивания, от относительной глубины слоя $(d+z)/B_w$ при различных соотношениях L_w/B_w : сплошные линии по Сорочану Е.А.; пунктир по предложению автора

Приведены данные по допустимым и предельным деформациям основания для некоторых типов конструкций и конструктивных решений зданий.

Следует отметить, что часть неравномерность осадок, учитываемая в основном сочетании, реализуется, как правило, за довольно короткий период времени, преимущественно в процессе строительства, когда жесткостные характеристики здания еще не достигли своих максимальных значений. Исключения составляют водонасыщенные глинистые грунты, деформирование которых связано с процессом длительной фильтрационной консолидации. Результирующие дополнительные напряжения в конструкциях здания и соответственно возможные повреждения, вызванные указанными неравномерными деформациями основания, оказываются существенно ниже,

чем, если бы они реализовались после завершения строительства при максимальных жесткостных характеристиках здания. Соответственно при расчете ЗиС на деформируемом основании неравномерность деформаций основания, реализовавшуюся в процессе возведения, можно учитывать с понижающим коэффициентом, зависящим от соотношения скорости консолидации грунтов основания и возведения здания.

Аналитические методы определения деформаций основания, вызванных различными СИГГУ, с последующим учетом потенциальной неравномерности от их возможных сочетаний реализованы в авторском исследовательском программном обеспечении «DesCon» <https://dwg.ru/dnl/14972>.

Третий раздел посвящен моделированию системы «ОФС» в сложных инженерно-геологических условиях.

Выполнен анализ и систематизация различных способов моделирования элементов системы «ОФС» в зависимости от используемой модели грунтового основания и конструктивного решения элементов системы.

Рассмотрены и систематизированы основные факторы и строительные мероприятия, влияющие на жесткость как отдельных элементов системы «ОФС», так и относительную жесткость системы в целом.

В СИГГУ снижение дополнительных усилий в конструкциях здания, вызванных неравномерными деформациями основания, можно достичь как повышением, так и понижением жесткости основания. При этом, как правило, при неравномерных деформациях основания, зависящих от нагрузки на основание, целесообразным является повышение жесткости основания, а при вынужденных перемещениях, не зависящих от нагрузки на основание наоборот.

Повысить уровень надежности и долговечности зданий и сооружений в СИГГУ можно путем целенаправленного изменения жесткостных характеристик элементов системы «ОФС», направленного на понижение либо повышение относительной жесткости системы. При этом могут применяться как мероприятия, направленные на изменение жесткости одного из элементов системы «ОФС», так и комплексные мероприятия, направленные на одновременное изменение жесткости двух или более элементов системы.

Так как в данной работе рассматривается работа системы в СИГГУ, при определении требуемого показателя относительной жесткости системы, по мнению автора, следует учитывать неравномерность деформаций основания.

Например, для оценки относительной изгибной жесткости здания неравномерные деформации основания на определенном участке длиной l можно представить в виде радиусов кривизны основания R , разделяющихся на: потенциальный R_p , фактический R_f и предельный R_u .

В зависимости от отношения фактической и потенциальной кривизны к предельной кривизне для данного конструктивного решения здания можно определить требуется ли корректировка жесткости элементов системы:

- при $R_u / R_p \leq 1$ либо $R_f / R_u \approx 1$ относительная изгибная жесткость системы «сооружение – основание» является достаточной и не требует корректировки;
- при $R_u / R_p > 1$ и $R_f / R_u \gg 2$ относительная изгибная жесткость системы «сооружение – основание» является избыточной и целесообразно ее снижение;
- при $R_u / R_p > 1$ либо $R_f / R_u < 1$ необходимо предусматривать мероприятия по обеспечению эксплуатационной пригодности здания, направленные, например, на повышение относительной изгибной жесткости системы «сооружение – основание» за счет изменения любого из влияющих параметров системы.

Систематизированы способы моделирования воздействий на ЗиС со стороны неравномерно деформирующегося основания в зависимости от используемой модели грунтового основания, конструктивного решения фундаментов, вида неравномерных перемещений основания, особенностей СИГГУ и мероприятий, направленных на изменение жесткости основания или фундаментов.

Для просадочных грунтов определены условия, при которых в расчетных схемах ЗиС нецелесообразен учет возможных просадок от собственного веса грунта.

Для набухающих грунтов предложен алгоритм определения воздействий в виде вынужденных перемещений основания или дополнительных эквивалентных нагрузок на расчетную схему здания по значениям подъема поверхности от набухания грунта в разных точках основания с учетом неоднородности геологического строения грунтового массива, обводненной зоны и полей напряжений, как от собственного веса грунта, так и от внешней нагрузки.

В четвертом разделе выполнен анализ результатов натурных обследований и мониторинга зданий, эксплуатирующихся в СИГГУ, что позволило:

- внедрить и апробировать ряд предложений автора работы по определению величины неравномерных деформаций и возможных схем их реализации;
- сопоставить прогнозируемые и фактически реализовавшиеся схемы неравномерных деформаций основания;
- предложить эффективные и рациональные, с точки зрения автора, мероприятия по обеспечению дальнейшей нормальной эксплуатации зданий;
- систематизировать различные схемы повреждений от вынужденных деформаций земной поверхности в зависимости от относительной жесткости системы «ОФС».

При непосредственном участии автора были выполнены натурные обследования более 1000 зданий, имеющих различные конструктивные схемы и эксплуатирующихся в различных СИГГУ.

Среди объектов, эксплуатирующихся на просадочных грунтах, были рассмотрены: средняя школа №3 в Жовтневом районе г. Мариуполя; здание Мариупольского Драмтеатра; жилой дом № 82 по ул. Жукова в МР «Восточный» г. Мариуполя; жилой дом №6 по улице Корниенко в г. Зугрэс.

Среди объектов, эксплуатирующихся на элювиальных грунтах, был рассмотрен корпус реанимационного отделения ЦГБ г. Дебальцево.

Среди объектов, эксплуатирующихся на подрабатываемых территориях, были рассмотрены: здания Донбасской национальной академии строительства и архитектуры; здание поликлиники ИНВХ им. В.К. Гусака в г. Донецке; жилые, производственные и административные здания в г. Ясиноватая.

Среди объектов, эксплуатирующихся на территориях с другими опасными геологическими процессами, была рассмотрена набережная пансионата «Волна» в пгт. Седово.

Было выявлено, что на форму и степень возможных повреждений значительное влияние оказывает конструктивная схема и жесткостные характеристики объекта. Например, при неравномерных вертикальных деформациях основания в виде кривизны выпуклости или вогнутости бескаркасные здания небольшой этажности, имеющие небольшую изгибную жесткость, и протяженные в плане испытывают напряженное состояние характерное для изгибаемых балок. Изгиб таких зданий происходит, как правило, в результате деформаций растяжения – сжатия в перемычных поясах и сопровождается возникновением вертикальных (нормальных) трещин в растянутых поясах (рис. 4а). Подобные повреждения могут стать причиной потери эксплуатационной пригодности здания, однако, как правило, не сопровождаются потерей общей устойчивости стен, так как напряжения от деформаций земной поверхности и от эксплуатационных нагрузок действуют во взаимно перпендикулярных плоскостях и соответственно не суммируются.

При увеличении этажности здания изгибная жесткость растет гораздо быстрее сдвиговой жесткости, и как следствие форма повреждений будет изменяться, так как в конструкциях будут развиваться преимущественно сдвиговые деформации по сечениям, ослабленным проемами, в виде перекосов оконных проемов и изгиба перемычек (рис. 4б). Повреждения по наклонным сечениям перемычек и простенков представляют особую опасность, так как при неблагоприятном наложении напряжений от эксплуатационных нагрузок, неравномерных вертикальных деформаций и горизонтальных деформаций растяжения земной поверхности возможна потеря несущей способности простенков.

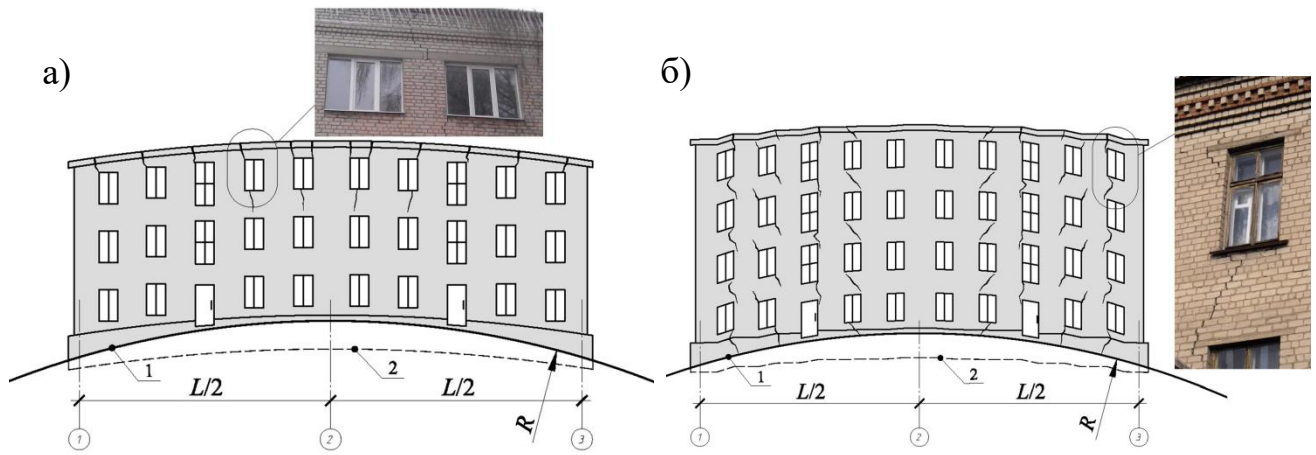


Рис. 4 Схема повреждений от воздействия кривизны земной поверхности: а - при выгибе здания, б - при сдвиговых деформациях по проемам, 1 – потенциальные деформации кривизны земной поверхности; 2 – фактические деформации с учетом жесткости здания

При относительных горизонтальных деформациях земной поверхности для бескаркасных зданий без конструктивных мер защиты горизонтальные деформации растяжения земной поверхности вызывают, как правило, повреждения в виде наклонных трещин, нисходящих к центру здания (рис. 5а). Однако, при наличии значительных ослаблений сечений (резком снижении осевой жесткости и прочности), например за счет повышенной проемности, возможно образование в этих сечениях магистральных трещин по всей высоте здания (рис. 5б). При этом на ширину раскрытия, наклон образовавшихся трещин и смещение их берегов могут также влиять сдвиговые деформации от неравномерных вертикальных перемещений основания.

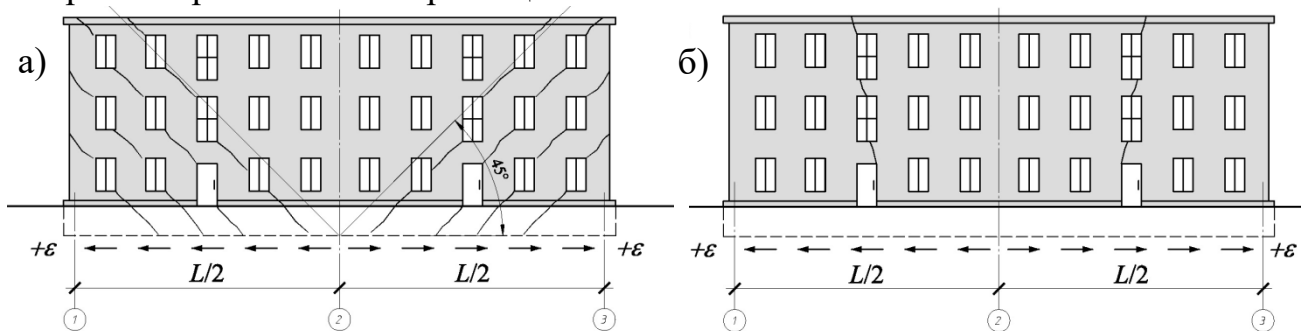


Рис. 5 Схема повреждений от действия горизонтальных деформаций растяжения земной поверхности: а - при относительно равномерном распределении осевой жесткости и прочности сечений по длине здания; б - при наличии по длине здания существенно ослабленных сечений

Если горизонтальные и вертикальные деформации являются производными вектора сдвижения грунтового массива под действием собственного веса к центру выработанного пространства, карстовой полости или к дну просадочной воронки то они проявляются только совместно, в различных пропорциях в за-

висимости от направления главного вектора сдвижения. В связи с этим полная картина трещинообразования является суммарной от их совместного действия.

В пятом разделе даны рекомендации по использованию авторского программного обеспечения DesCon, позволяющего выполнять расчеты основания фундаментов мелкого заложения с учетом взаимного влияния, неоднородности строения грунтового массива в плане и по глубине, разуплотнения грунта в котловане, нелинейных деформаций, особых свойств грунтов (просадочности, набухания), локального обводнения, а также подработки. Позволяет также определять жесткостные характеристики основания и вынужденные перемещения основания в СИГГУ, которые в дальнейшем могут использоваться для совместных расчетов системы «ОФС» <https://dwg.ru/dnl/14972>.

При этом расчеты можно выполнять, как в соответствии с действующими нормативными документами Украины и РФ, так и по авторским методикам и алгоритмам, предложенным в диссертации.

Использование разработанного программного обеспечения дает возможность:

- проектировать основание фундаментов с минимизацией неравномерных деформаций, вызванных основным сочетанием нагрузок, в том числе и за счет развития дополнительных нелинейных осадок в допустимых пределах;
- прогнозировать наиболее неблагоприятный вариант воздействия неравномерных деформаций основания, вызванных различными СИГГУ, на напряженно-деформированное состояние здания или сооружения;
- определять наиболее неблагоприятное положение локальной обводненной зоны для грунтов с особыми свойствами с учетом неоднородного строения и напряженного состояния грунтового массива;
- определять необходимую глубину частичного или полного устранения просадочных свойств грунта (закреплением или уплотнением), при которой выполняются условия по предельным деформациям основания и здание всё ещё отвечает условиям нормальной эксплуатации;
- определить для заданных параметров фундамента и геологических условий зависимость коэффициента жесткости основания от давления, в том числе и с учетом локального обводнения. Данная зависимость может быть использована при выполнении итерационных расчетов системы «ОФС» в САПР, ориентированных на расчет и проектирование строительных конструкций;
- вывести жесткостные характеристики массива основания фундаментов в текстовый формат для последующего импорта в САПР;
- использовать при определении деформаций основания различные методики, в том числе предложенные автором, с возможностью корректировки определенных параметров для исследования их влияния на результаты расчета.

В шестом разделе приведены результаты численных исследований, в которых рассматривались следующие вопросы:

6.1. Учет распределительной способности грунтов с использованием различных моделей грунтового основания показал, что:

- модель переменного коэффициента жесткости основания (Клепикова С.Н.) при соотношении $E_{el}/E \approx 1$ показывает результаты, практически совпадающие с моделью упругого полупространства, то есть существенно завышающие распределительную способность грунта;

- учет соотношения E_{el}/E в модели переменного коэффициента жесткости основания позволяет более точно определить фактическую распределительную способность грунта. Однако при этом, модель переменного коэффициента жесткости основания (Клепикова С.Н.) имеет следующие недостатки:

- величина осадок за пределами загруженной площади, вызванных распределительной способностью грунта, уменьшается при увеличении соотношения E_{el}/E , однако расстояние, на которое распространяется влияние загруженной площади, не изменяется. Это вызвано тем, что распределение напряжений в грунтовом массиве при любом соотношении E_{el}/E принимается как для упругого полупространства. На данный момент для устранения данной некорректности при соотношении $E_{el}/E > 5$ рекомендуется использовать модель Винклера;

- для одинаково загруженных фундаментов большой площади в плане при одинаковом модуле общей деформации грунта, но различном соотношении E_{el}/E , средняя интегральная осадка фундаментов будет различаться. Увеличение соотношения E_{el}/E приведет к росту абсолютных и средних значений осадок.

6.2. Неравномерность осадок, вызванная разуплотнением грунта при устройстве котлована

Исследованиями, выполненными с использованием предложенного метода и в ПК Plaxis 3D с моделью грунтового основания Hardening Soil, для котлованов с параметрами, изменяющимися в широком диапазоне, установлено:

- глубина котлована и модуль упругой деформации грунта существенно влияют на величину дополнительных осадок, однако неравномерность осадок, вызванная разуплотнением грунта, в основном зависит от относительной ширины котлована. При этом наиболее неблагоприятные значения неравномерных осадок соответствуют относительной ширине котлована, изменяющейся в диапазоне $5 \leq B_K/D_K \leq 10$. Для указанного диапазона соотношение осадок крайней и центральной точки (при $L_K/B_K = 1$) составляет $\approx 0,4$.

- уменьшение относительной ширины котлована приводит к увеличению относительной неравномерности осадок, вызванных разуплотнением грунта, за счет соответствующего уменьшения расстояния между характерными точками котлована, однако при $B_K/D_K < 5$ происходит также резкое снижение абсолют-

ной разности осадок за счет уменьшения осадки центральной точки, которая может составлять 15 – 50% от своего максимального значения (рис. 6 а).

– увеличение относительной ширины котлована приводит к снижению относительной неравномерности осадок, вызванных разуплотнением грунта, за счет увеличения расстояния между характерными точками котлована и уменьшения абсолютной разности осадок из-за опережающего увеличения осадок в крайних точках. При этом осадка в центральной точке практически достигает своего максимального значения при $B_K/D_K > 25$ (рис. 6а), в то время как осадки в крайних и угловых точках продолжают увеличиваться (рис. 6 б).

– при относительной ширине котлована $B_K/D_K < 10$ на соотношение осадок в характерных точках, также существенное влияние оказывает отношение сторон котлована и угол наклона его откосов.

С учетом вышеизложенного коэффициент соотношения осадок крайней и центральной точек в формуле 2 допускается принимать с запасом ($k_b = 0,4$), либо по полученным зависимостям от относительных размеров котлована.

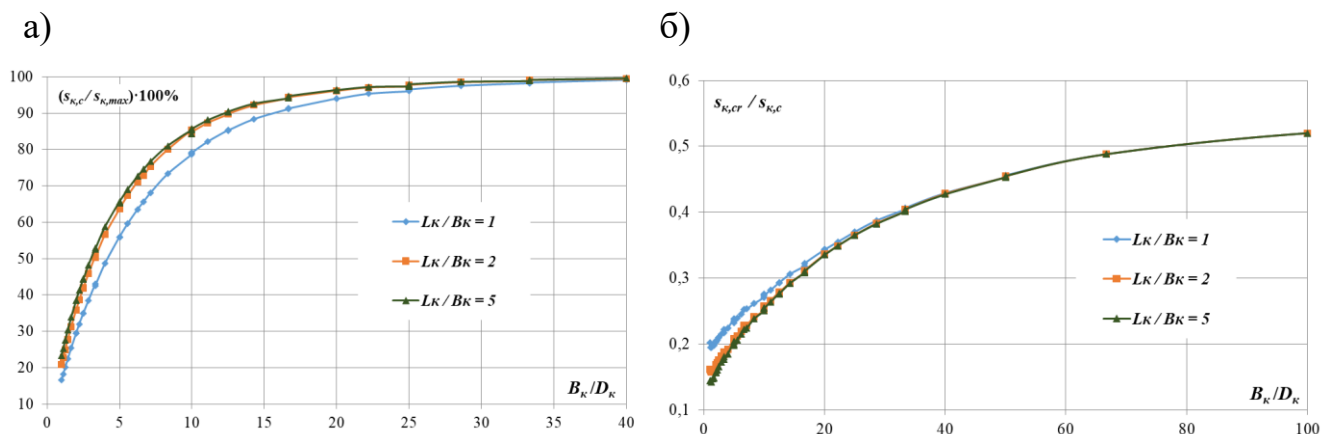


Рис. 6 Отношение вертикальных деформаций в зависимости от относительной ширины котлована: а - в центральной точке к ее максимальному значению; б – в угловой точке и в центральной точке

6.3. Нелинейные осадки фундамента

Исследованиями, выполненными с использованием предложенного метода, формул, предложенных Малышевым М.В. и Клепиковым С.Н., и МКЭ с использованием модели Кулона-Мора, установлено:

– применение методов, предложенных Малышевым М.В. и Клепиковым С.Н., дает значительный запас в определении нелинейных осадок, который существенно возрастает по мере увеличения нагрузки;

– наилучшую сходимость результатов с экспериментальными данными показал МКЭ и предлагаемый метод с коэффициентом k_s , определяемым по формуле (4) (рис. 7);

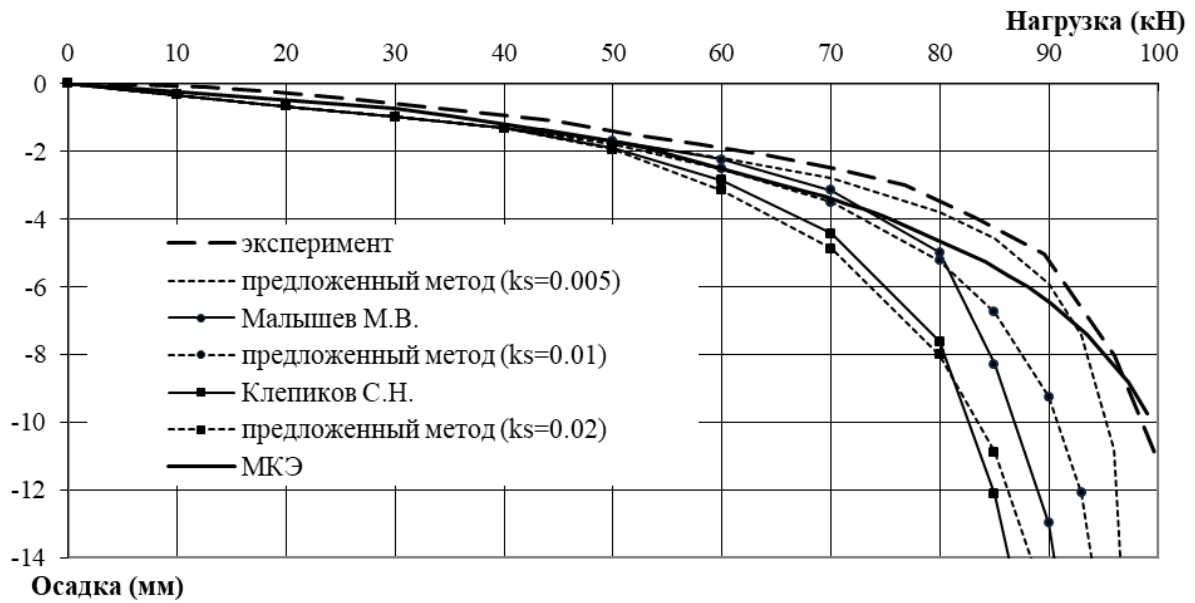


Рис. 7 Сравнение прогнозируемых и измеренных осадок

– предлагаемый метод позволяет определять нелинейные осадки фундамента во всем диапазоне давлений вплоть до исчерпания несущей способности основания с учетом неоднородности грунтового массива по глубине, в том числе при наличии слабых подстилающих слоев грунта;

– зависимость коэффициента жесткости основания от давления, определенная с учетом нелинейных осадок по предложенному методу, имеет более плавный переход при смене фаз работы грунта по сравнению с формулами Клепикова С.Н. и Малышева М.В. (рис. 8.).

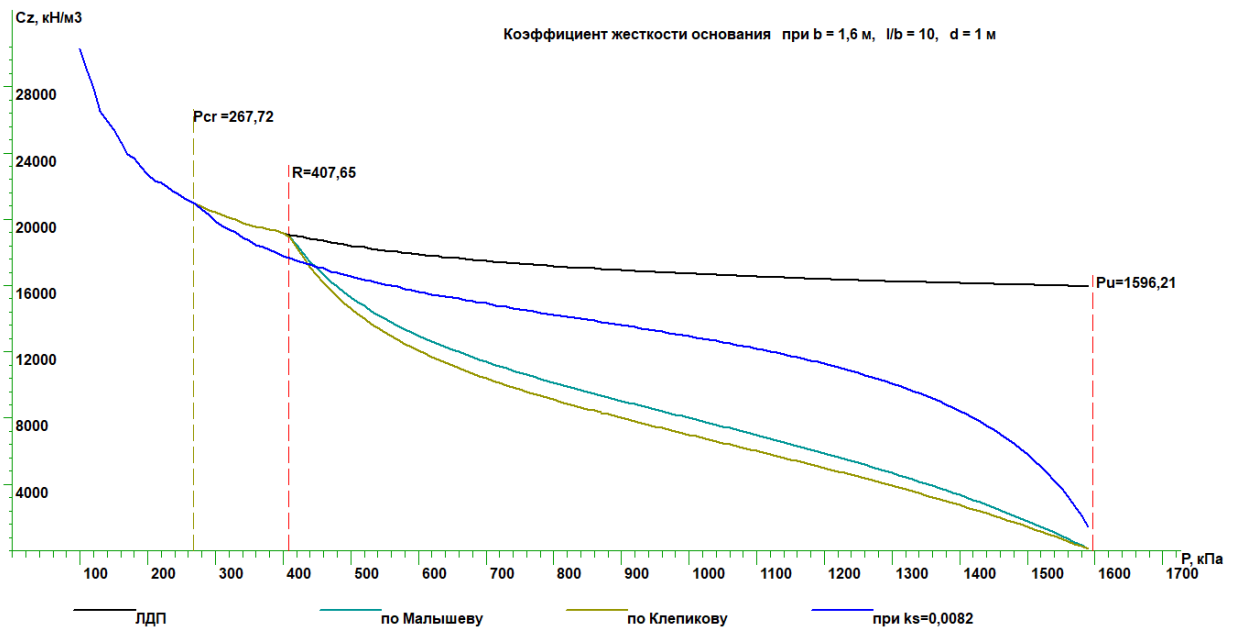


Рис. 8 Зависимость коэффициента жесткости основания от давления: для линейно-деформируемого полупространства и с учетом нелинейных деформаций по Малышеву М.В., Клепикову С.Н. и авторской методике

6.4. Исследование необходимости учета просадок от собственного веса грунта на просадочных грунтах I типа

Необходимость данного исследования обусловлена тем, что на данный момент до сих пор нет единого мнения, как следует учитывать просадку от собственного веса грунта, если ее величина не превышает 5 см.

Как известно, просадка от собственного веса грунта полностью реализуется только при большой площади замачивания, когда ширина замачивания не менее толщины просадочного слоя грунта ($B_w \geq H_{sl}$). Это связано с особенностями формирования обводненной зоны в просадочном грунте. Очевидно, что при замачивании большой площади среднее значение просадочных деформаций увеличивается, но при этом снижается их неравномерность (рис. 9).

При помощи ПО «Descon BF» были определены схемы деформирования основания при различных размерах и местоположении источника замачивания, а также зависимость коэффициента жесткости основания от давления в центре просадочной воронки и за ее пределами (рис. 10).

Установлено:

- наиболее неблагоприятным месторасположением просадочной воронки является место наибольшего прогиба здания от нагрузок основного сочетания;
- при увеличении размеров площади замачивания средняя вертикальная деформация основания увеличивается, но относительная неравномерность деформаций основания уменьшается. Так как максимальные усилия в конструкциях здания возникают при наибольшей неравномерности вертикальных деформаций основания, то более неблагоприятными для бескаркасного здания будут минимальные размеры площади замачивания.

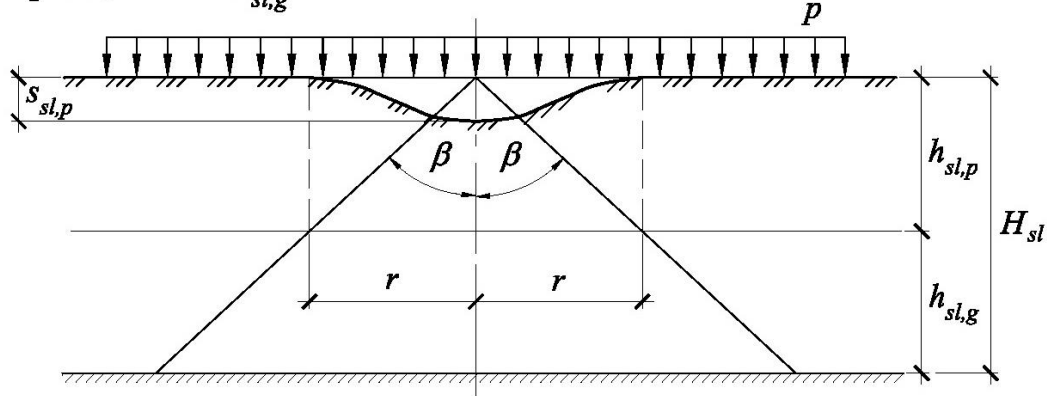
Наибольшая неравномерность вертикальных деформаций основания в грунтовых условиях I типа по просадочности может возникнуть:

- при толщине просадочного грунта не превышающей удвоенную толщину верхней зоны просадки ($H_{sl} \leq 2 \cdot h_{sl,p}$) от просадок, как от внешней нагрузки, так и от собственного веса грунта. В этом случае обводненная зона принимается в виде эллипса с максимальным радиусом на уровне нижней границы верхней зоны просадки $h_{sl,p}$. При этом просадка от собственного веса грунта реализуется лишь частично, то есть становится существенно меньше 5 см, поэтому способ ее учета не оказывает существенного влияния на усилия в конструкциях здания.
- при $H_{sl} > 2 \cdot h_{sl,p}$ только либо от просадок от внешней нагрузки либо от просадок от собственного веса грунта. При этом более неблагоприятную схему неравномерных просадочных деформаций можно определить, пользуясь условным радиусом кривизны.

При $H_{sl} > 2 \cdot h_{sl,p}$ неравномерность деформаций, вызванная просадками от собственного веса грунта, будет более неблагоприятной, только если просадка от собственного веса грунта превышает просадку от внешней нагрузки более

чем в 16 раз ($s_{sl,p} < s_{sl,g} / 16$). То есть для бескаркасных зданий в грунтовых условиях I типа учет неравномерных деформаций основания, вызванных просадками от собственного веса грунта, целесообразен только при $H_{sl} \leq 2 \cdot h_{sl,p}$ либо при просадках от внешней нагрузки близких к 0. В остальных случаях просадку от собственного веса грунта можно вообще не учитывать.

а) при $B_w = 0$ $s'_{sl,g} = 0$



б) при $B_w = H_{sl}$ $s'_{sl,g} = s_{sl,g}$

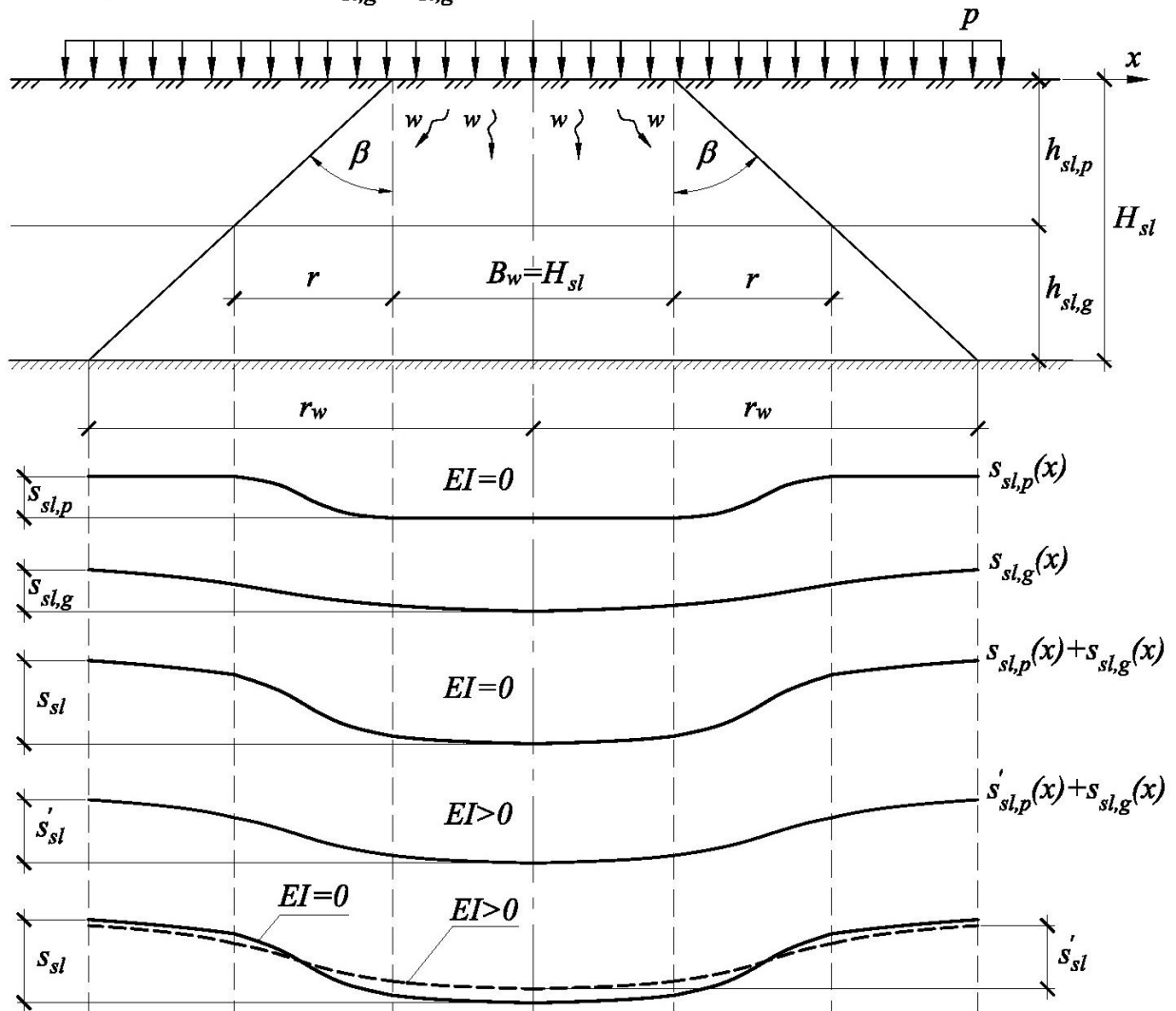


Рис. 9 Эпюры просадочных деформаций поверхности основания от внешней нагрузки и собственного веса: а – при $B_w = 0$; б – при $B_w = H_{sl}$

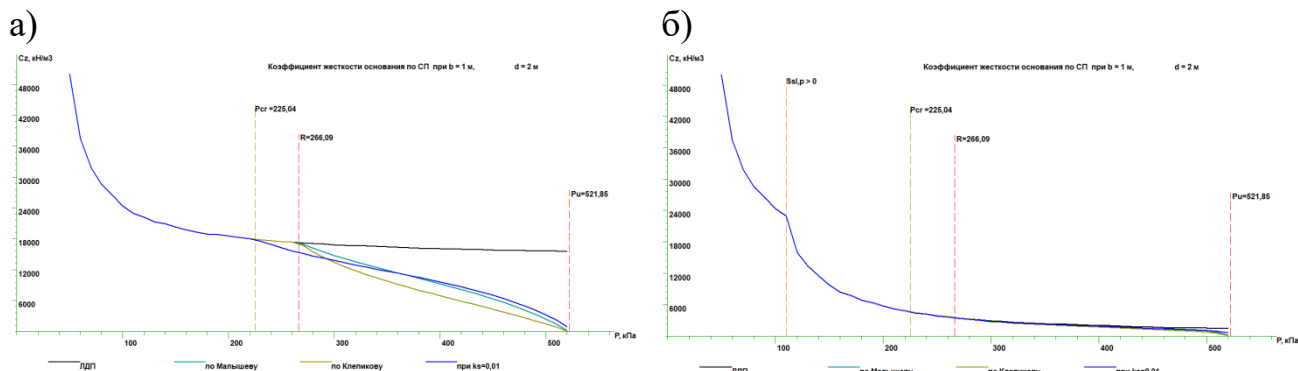


Рис. 10 Зависимость коэффициента жесткости основания от давления:
а – за пределами просадочной воронки; б – в центре просадочной воронки

6.5. Распределение дополнительных напряжений в набухающих грунтах от собственного веса неувлажненной части грунтового массива и зависимость величины подъема поверхности при набухании грунта от размеров и формы площади замачивания.

Исследованиями, выполненными в ПК Plaxis 2d с использованием упруго-пластической модели Кулона-Мора при различной относительной глубине набухающего слоя грунта установлено:

– характер распределения вертикальных напряжений в обводненном набухающем грунте подтвердил выдвинутую автором гипотезу о распределении в горизонтальном сечении дополнительных напряжений от неувлажненной части грунтового массива в виде близком к линейным треугольным эпюрам, с пиковыми значениями на границе обводненной зоны (рис. 11б);

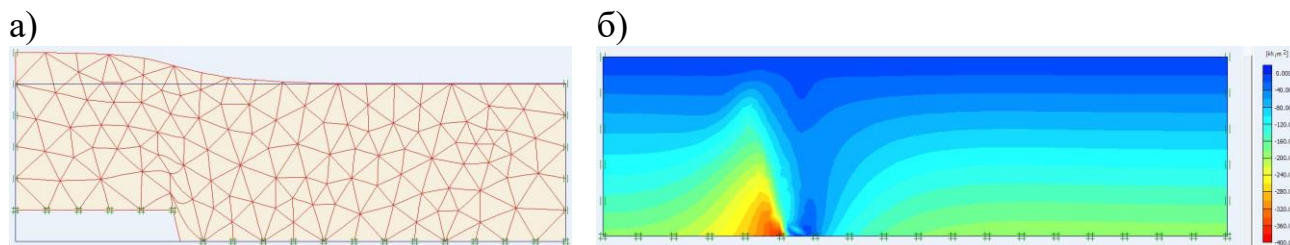


Рис. 11 Набухание при $z/B_w = 0,5$: а – деформации поверхности; б – изополя вертикальных напряжений

– при увеличении относительной глубины набухающего слоя происходит наложение эпюр дополнительных напряжений, друг на друга, в результате чего они суммируются (рис. 12б);

– форма бугра набухания, полученная в результате численных исследований, качественно соответствует описаниям в литературе (рис. 11а, 12а).

Величина подъема поверхности от набухания грунта определялась в соответствии с предложенным алгоритмом и в соответствии с действующими нормативными документами для различных параметров зоны замачивания, мощности и характеристик набухающего грунта (рис. 13).

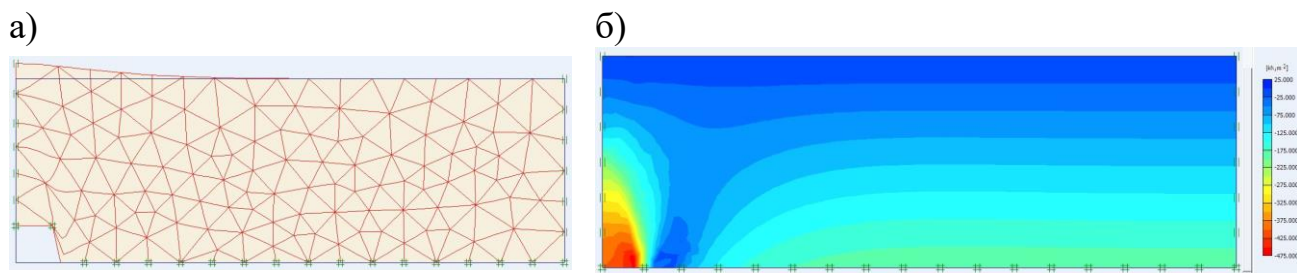


Рис. 12 Набухание при $z/B_w = 2,5$: а – деформации поверхности; б – изополя вертикальных напряжений

Следует отметить, что при изменении мощности набухающего грунта качественно зависимости не меняются, однако возможно изменение количественных значений относительного подъема поверхности (при увеличении мощности в меньшую сторону и наоборот).

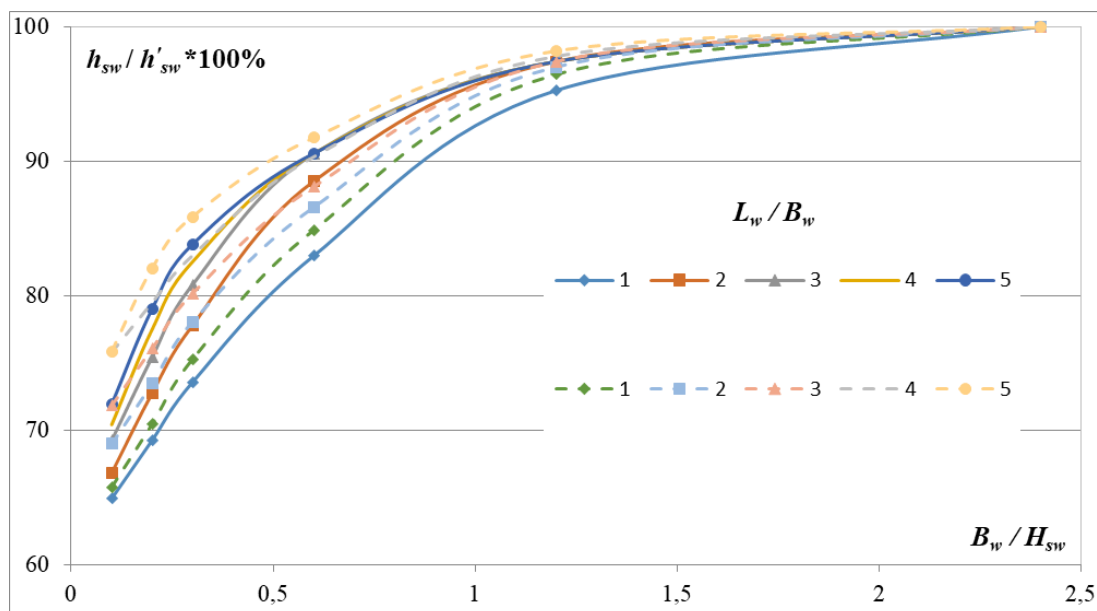


Рис. 13 Зависимость величины подъема поверхности в центре площади замачивания от относительных размеров площади замачивания (сплошные линии по предложенному автором алгоритму, пунктирные линии - по действующим нормативным документам), h'_{sw} – подъем поверхности, соответствующий замачиванию на значительной площади, например при подъеме УПВ

Влияние способа моделирования неравномерных деформаций основания, вызванных набуханием грунта, на НДС конструкций ЗиС исследовалось МКЭ. Моделирование основания выполнялось контактной моделью. Установлено:

– с увеличением площади замачивания величина подъема незагруженной поверхности увеличивается и достигает своего максимального значения при ширине площади замачивания приблизительно в два раза превышающей толщину зоны набухания. При этом, после того, как ширина площади замачивания

превысит толщину зоны набухания, происходит снижение неравномерных деформаций основания, вызванных набуханием грунта, и соответственно дополнительных усилий в конструктивных элементах ЗиС;

- при моделировании набухания эквивалентной нагрузкой максимальная величина эквивалентной нагрузки не зависит от площади замачивания. Увеличение площади замачивания приводит только к увеличению площади эквивалентной нагрузки и соответственно также снижает неравномерность деформаций основания;

- так как учет распределительной способности грунта, как правило, приводит к прогибу здания, то в этом случае расположение источника замачивания под углом (торцом) здания приводит к увеличению неравномерных деформаций основания, а расположение источника замачивания в центре наоборот снижает неравномерность деформаций. Особенно это заметно при ширине замачивания сопоставимой с размерами здания;

- при моделировании воздействий от набухания грунта вынужденными перемещениями основания вертикальные деформации основания и дополнительные усилия в конструкциях объекта существенно больше, чем при моделировании набухания дополнительной «эквивалентной нагрузкой»;

- при расчете зданий на набухающих грунтах неравномерные деформации основания, вызванные набуханием, следует моделировать, вынужденными перемещениями. Моделирование эквивалентной нагрузкой можно применять в случаях, когда давление по подошве фундаментов превышает давление набухания и подъем основания соответственно отсутствует.

6.6. Влияние изменения жесткостных характеристик элементов системы «ОФС» на ее НДС

Исследование влияния жесткости основания на распределение дополнительных усилий в конструкциях от действия вынужденных перемещений земной поверхности, выполненное МКЭ, показало, что:

- увеличение податливости основания позволяет существенно снизить максимальные дополнительные усилия в конструкциях. В некоторых случаях почти в два раза, то есть, по сути, уменьшить вредное воздействие подработки до средних значений более легкой группы подрабатываемых территорий;

- учет нелинейного деформирования грунтов основания и конструкций позволяет более точно определять усилия, возникающие в элементах здания. При этом пониженные значения дополнительных усилий позволяют применять более экономичные решения конструкций;

- мероприятия по увеличению податливости основания можно применять в сочетании с мероприятиями по повышению жесткости конструкций здания либо дополнительными конструктивными элементами, позволяющими воспринимать усилия от подработки, например, в сочетании со связями распорками.

Исследование влияния жесткости здания на усилия в конструкциях при вынужденных деформациях земной поверхности, выполненное МКЭ, показало:

- при определенной изгибной жесткости здания (относительной изгибной жесткости системы «ОФС») величина изгибающего момента становится практически постоянной, асимптотически приближаясь к своему максимальному значению. Соответственно данную величину относительной жесткости можно считать границей перехода от здания конечной жесткости к жесткому зданию.

- существенное снижение сдвиговой жесткости также может повлиять на величину изгибающего момента за счет депланации сечений и образования повреждений от деформаций сдвига (см. рис. 4б);

- моделирование основания пластинами и стержнями дает практически совпадающие результаты;

- моделирование деформаций земной поверхности, вызванных подработкой, изменением жесткости основания является некорректным, так как завышает дополнительные усилия в конструкциях. Следует отметить, что при определенных условиях (низкой жесткости основания) результаты могут приближаться к результатам, полученным при моделировании вынужденными перемещениями. С увеличением жесткости основания разница в результатах будет увеличиваться.

6.7. Численные расчеты устойчивости грунтового массива, выполненные при анализе решений по берегоукреплению побережья Азовского моря на примере набережной пансионата «Волна» в пгт. Седово, показали, что схема потери устойчивости, полученная МКЭ, практически воспроизвела схему потери устойчивости фрагментов существующей подпорной стены и бун, выявленную при натурном обследовании.

6.8. Исследование влияния карстовых деформаций на НДС здания на примере здания православного храма показало, что:

- при определении разуплотненной зоны основания, ослабленного карстовой воронкой, более точные результаты будут получены при использовании упругопластических моделей (Кулона-Мора или Hardening Soil), так как эти модели позволяют учитывать прочностные характеристики грунтового основания и сдвиговые деформации грунта, возникающие на бортах воронки;

- снижение связности грунта в упругопластических моделях основания приводит к увеличению расхождений в результатах с моделью упругого пространства;

- существенное влияние на изменение жесткости основания в окрестностях провала имеют: диаметр, глубина карстовой воронки, прочностные характеристики грунта, модель грунтового массива и давление на основание, так как эти факторы являются наиболее влияющими на устойчивость грунта в окрестностях провала.

– сопоставление результатов расчета, полученных при моделировании основания переменным коэффициентом жесткости с учетом разуплотнения грунта на бортах воронки и объемным моделированием МКЭ (нелинейная упруго-пластическая задача), показало, что разница в результатах не превышает 5%, увеличиваясь по мере роста сдвиговых деформаций. Учитывая меньшую трудоемкость моделирования основания переменным коэффициентом жесткости по сравнению с объемным моделированием, данный способ является более предпочтительным в практике проектирования.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Полученные в работе результаты исследований позволяют утверждать, что поставленная цель, заключающаяся в решении важной научно-технической проблемы, а именно в развитии методов совместного расчета зданий и сооружений с неравномерно деформируемым основанием в сложных инженерно-геологических условиях, достигнута.

2. Из рассмотренных моделей грунтового основания модель переменного коэффициента жесткости (Клепикова С.Н.) является одной из наиболее приемлемых для расчета зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях, в которых деформации основания не зависят от внешней нагрузки на основание. Данная модель позволяет учесть все новые предложения по развитию аналитических методов определения различных видов деформаций грунтового основания. При этом распределительная способность грунта может учитываться как частично, так и полностью при соотношении $E_{el}/E \approx 1$.

3. Учет нелинейной работы грунтового основания и материалов строительных конструкций позволяет реализовать излишние запасы прочности в конструкциях и получить значительный экономический эффект. В частности при проектировании 16-ти этажного жилого дома на подрабатываемой территории в квартале 191А по ул. Розы Люксембург в г. Донецке учет нелинейной работы конструкций и основания позволил снизить площадь рабочей арматуры в вертикальных железобетонных элементах (стенах, колоннах) в среднем на 20-25%, а в отдельных элементах на 30-40%.

4. Предложенные усовершенствования аналитических методов определения деформаций основания, вызванных отдельными видами сложных инженерно-геологических условий, позволяют существенно расширить область их корректного применения. При этом, в пределах области корректного применения общепринятых методов расчета расхождения в результатах не превышают 5 %.

5. В грунтовых условиях I типа по просадочности учет неравномерных деформаций основания бескаркасных зданий, вызванных просадками от собственного веса грунта, целесообразен только при $H_{sl} \leq 2 \cdot h_{sl,p}$ либо при просад-

ках от внешней нагрузки близких к 0. В остальных случаях просадку от собственного веса грунта учитывать не следует.

6. Предложенный алгоритм построения поверхности бугра набухания при замачивании набухающих грунтов сверху позволяет определять воздействия в виде вынужденных перемещений основания или дополнительных эквивалентных нагрузок на расчетную схему здания с учетом неоднородности геологического строения грунтового массива, формы обводненной зоны и полей напряжений, как от собственного веса грунта, так и от внешней нагрузки. Значения величины подъема поверхности в центре площади замачивания, определенные по предложенному алгоритму и по действующим нормативным документам, отличаются не более чем на 3%.

7. Моделирование неравномерных деформаций основания, не зависящих от внешней нагрузки на основание, при численных методах расчета следует выполнять вынужденными перемещениями основания. Моделирование таких деформаций изменением жесткости основания является некорректным, так как завышает дополнительные усилия в конструкциях. При определенных условиях (низкой жесткости основания) результаты могут приближаться к результатам, полученным при моделировании вынужденными перемещениями, однако с увеличением жесткости основания разница в результатах будет увеличиваться и может достигать 200% и более.

8. Относительную жесткость системы "основание – фундамент - сооружение" целесообразно регулировать путем изменения напряженно-деформированного состояния ее элементов. При этом целенаправленное увеличение податливости основания позволяет снизить дополнительные усилия в отдельных конструкциях, вызванные неравномерными деформациями основания, не зависящими от внешней нагрузки, на величину до 50%.

9. Наиболее неблагоприятной схемой неравномерных деформаций основания, учитываемой в особом сочетании воздействий от сложных инженерно-геологических условий, как правило, является схема, усугубляющая неравномерность деформаций основания от основного сочетания нагрузок.

10. Результаты исследования и разработанное программное обеспечение были внедрены при проектировании и технической диагностике более 100 строительных объектов, эксплуатирующихся в сложных инженерно-геологических условиях, что позволило: сократить затраты времени и труда на поиск наиболее неблагоприятных расчетных схем и выполнение расчетов; повысить экономичность и надежность проектных решений зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях; применить рациональные и эффективные меры защиты зданий и сооружений от неравномерных деформаций основания.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

– публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. **Яркин, В. В.** Определение осадок фундаментов за пределом линейной деформируемости основания [Текст] / В.В. Яркин // Будівельні конструкції, 2003. Вип. 58. С. 217 – 222.
2. Лобачева, Н.Г. Исследование несущей способности грунтового массива, уплотненного внутренними давлениями [Текст] / Н.Г. Лобачева, **В.В. Яркин** // Будівельні конструкції, 2011. Вип. 75. С. 81 – 87.
3. Петраков, А.А. Влияние расчетных моделей грунтового основания на напряженное состояние несущих конструкций каркасных зданий на плитных фундаментах [Текст] / А.А. Петраков, **В.В. Яркин**, Е.О. Брыжатая // Збірник наукових праць «Галузеве машинобудування, будівництво». – Полтава, 2013. – Вип. 3 (38), Т.2. С. 274 – 279.
4. **Viktor Yarkin.** Internal bed soils consolidation with application of hardening mortars / V. Yarkin, S. Polivtsev, Н. Kukhar, Т. Kosheleva // Современное промышленное и гражданское строительство, 2014. Вып. 2, Т.10. С.133 – 140.
5. **Яркин, В.В.** Влияние разуплотнения грунта вокруг карстовой воронки на НДС конструкций плитного фундамента [Текст] / В.В. Яркин, А.В. Кухарь // Будівельні конструкції, 2015. Вип. 82. С. 493 – 499.
6. **Яркин, В.В.** Регулирование усилий в плитном фундаменте в процессе возведения здания [Текст] / В.В. Яркин, А.В. Кухарь // Современное гражданское и промышленное строительство, Т.12, №3, 2016. С. 119 – 126.
7. **Яркин, В.В.** Определение просадочных деформаций по нормативным документам России и Украины [Текст] / В.В. Яркин, А.В. Кухарь // Современное гражданское и промышленное строительство, Т.13, №2, 2017. С.111 – 119.
8. Писаренко, А.В. Численное исследование напряженно-деформированного состояния конструкций здания, взаимодействующего с просадочным основанием при его частичном закреплении [Текст] / А.В. Писаренко, **В.В. Яркин** // Вестник ДонНАСА, №3(125), 2017. С. 86 – 93.
9. **Яркин, В.В.** Влияние вынужденных перемещений основания при подработке на напряженно-деформированное состояние многоэтажного каркасного здания [Текст] / В.В. Яркин, Т.В. Морозова, Е.О. Брыжатая // Металлические конструкции, Т.23, №2, 2017. С. 59 – 68.
10. **Яркин, В.В.** Сравнительный анализ решений по берегоукреплению побережья Азовского моря вертикальными стенками из заанкеренного шпунта различной конструкции [Текст] / В.В. Яркин, А.В. Кухарь // Металлические конструкции, Т.24, №4, 2018. С. 157 – 166.

11. **Яркин, В.В.** Определение неравномерных деформаций основания, вызванных набуханием грунта [Текст] / В.В. Яркин // Современное промышленное и гражданское строительство, Т.15, № 3, 2019. С.143 – 153.

12. **Яркин, В.В.** Неравномерные деформации основания зданий со стальным каркасом в грунтовых условиях I типа по просадочности [Текст] / В.В. Яркин, А.В. Кухарь, А.Д. Анисимова, В.В. Яркина // Металлические конструкции, Т.25, №4, 2019. С.171- 181.

13. Далинчук, В.С. Устранение просадки фундаментов с помощью технологии SLAB LIFTING [Текст] / В.С. Далинчук, М.С. Ильмендеров, **В.В. Яркин** // Строительство уникальных зданий и сооружений, №11(38), 2015. С. 15 – 26.

14. Лобачева, Н.Г. Сравнительный анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований метода уплотнения основания фундаментов внутренними давлениями [Текст] / Н.Г. Лобачева, **В.В. Яркин** // SCIENCE PROSPECTS, №1(112), 2019. С. 54 – 62.

– публикации в зарубежных журналах, индексируемых международной реферативной базой цитирования SCOPUS:

15. **Viktor Yarkin.** Determination of non-uniform settlements caused by decompression of soil in the excavation / Viktor Yarkin, Anna Kukhar // MATEC Web of Conferences. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2018), Vol. 245, 08002, 2018.

16. **Viktor Yarkin.** Non-linear settlements of shallow foundation / Viktor Yarkin, Hanna Kukhar, Natalia Lobacheva // E3S Web of Conferences. XXII International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2019), Vol. 97, 04034, 2019.

17. Lobacheva N. Experimental and numerical substantiation the efficiency method of compaction of soil base by creating sealing pressure inside soil massif / N. Lobacheva, **V. Yarkin** // J. Phys.: Conf. Ser., Vol. 1425, 012048, 2019.

18. **Viktor Yarkin.** Stress-strain state of expansive soils when soaking from above / V. Yarkin, N. Lobacheva // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol. 869, 052052, 2020.

– публикации по материалам конференций:

19. Писаренко А.В. Некоторые аспекты повышения прочности просадочных грунтов коллоидным раствором с добавлением полиакриламида / А.В. Писаренко, С.П. Высоцкий, **В.В. Яркин** //: материалы II Брянского междунар. инновац. форума «Строительство-2016». – Брянск: БГИТУ, 2016 (Т.1). С.117- 121.

20. Кухарь А.В. Использование полых свай с целью инъекции карстовых полостей / Кухарь А.В., **Яркин В.В.**, Малахова Е.А. // Сборник материалов междунар. научно-технической интернет конференции «Кадастр недвижимости и мониторинг природных ресурсов» - Тула, ТулГУ, 2019. С. 172-178.

21. **Яркин В.В.** Осадки фундамента мелкого заложения в нелинейной стадии работы грунта / В.В. Яркин, А.В. Кухарь // материалы научно-технической конференции с иностранным участием «Нелинейная механика грунтов и численные методы расчетов в геотехнике и фундаментостроении». – Воронеж, ВГТУ, 2019. С. 98-102.

– **патенты, авторские свидетельства:**

22. Деклараційний патент №10326 Україна, МПК E02D27/01. Фундамент-на плита стрічкового фундаменту / А. Г. Шарабарин, Е. Б. Дружко, **В. В. Яркин**, К. В. Сухоруков и др. №u200503477; заявл. 13.04.2005; опублік. 15.11.2005, Бюл. №11. – 3 с.

23. Патент №19237 Україна, МПК E21B11/00. Пристрій для утворення розширення в свердловині / Н. Г. Лобачева, А. Г. Шарабарин, А. А. Петраков, **В. В. Яркин** и др. №u200605466; заявл. 19.05.2006; опублік. 15.12.2006, Бюл. №2. – 3 с.

– **публикации в других изданиях:**

24. Петраков А.А. Определение просадок основания при замачивании просадочных грунтов [Текст] / А.А. Петраков, **В.В. Яркин** // Строитель Донбасса, 1(2), 2018. С. 49-54.

25. **Яркин, В.В.** Моделирование системы «Основание – фундамент – сооружение» в сложных инженерно-геологических условиях : монография / В.В. Яркин ; под редакцией А.А. Петракова. - Макеевка : Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ЭБС АСВ, 2020. - 391 с.

АННОТАЦИЯ

Яркин Виктор Владимирович. **Развитие методов расчета зданий в сложных инженерно-геологических условиях.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», Макеевка, 2020 г.

Диссертация посвящена совершенствованию методов совместного расчета системы «основание–фундамент–сооружение» («ОФС») в сложных инженерно-геологических условиях (СИГГУ). В работе усовершенствованы аналитические методы определения специфических деформационных воздействий для отдельных видов СИГГУ и учета физической нелинейности грунтов основания. Выполнена программная реализация предложенных методов и алгоритмов.

Первый раздел посвящен анализу состояния вопроса и уровня научных достижений в области моделирования и расчета системы «ОФС» в СИГГУ.

Второй раздел посвящен определению воздействий на здания и сооружения от СИГГУ и содержит ряд предложений автора по совершенствованию

аналитических методов определения неравномерных деформаций основания, учитываемых как в основном, так и особом сочетании нагрузок и воздействий. Рассмотрены возможные сочетания различных СИГГУ, воздействия от которых одновременно учитываются в особом сочетании нагрузок. Предложена классификация СИГГУ в зависимости от способа моделирования воздействий на систему «ОФС» со стороны неравномерно деформирующегося основания.

Третий раздел посвящен моделированию системы «ОФС» в сложных инженерно-геологических условиях. Выполнен анализ и систематизация различных способов моделирования элементов системы «ОФС» и учета воздействий на здание со стороны деформируемого основания. Рассмотрены и систематизированы основные факторы, влияющие на жесткость как отдельных элементов системы «ОФС», так и относительную жесткость системы в целом.

В четвертом и шестом разделах выполнен анализ результатов численных исследований, натурных обследований и мониторинга зданий, эксплуатирующихся в СИГГУ. Проанализировано влияние относительной жесткости системы «ОФС» на формы повреждений в конструктивных элементах.

В пятом разделе приведено руководство по использованию авторского программного обеспечения «DesCon», позволяющего определять жесткостные характеристики и вынужденные перемещения основания в СИГГУ, которые в дальнейшем могут использоваться для совместных расчетов системы «ОФС».

Ключевые слова: взаимодействие здания с основанием, коэффициент жесткости основания, сложные инженерно-геологические условия, неравномерные деформации основания, вынужденные перемещения основания

ABSTRACT

Yarkin Viktor. **Development of methods for calculating buildings in difficult geotechnical conditions.** – The manuscript.

The dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences on the specialty 05.23.01 – Building structures, buildings and structures. – The Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka, 2020.

The dissertation is devoted to the improvement of the methods of calculation of Soil–structure interaction in difficult geotechnical conditions. In the work, analytical methods for determining specific deformational effects for individual types of difficult geotechnical conditions and taking into account the physical nonlinearity of base soils are improved. The software implementation of the proposed methods and algorithms is completed.

The first section is devoted to the analysis of the state of the issue and the level of scientific achievements in the field of modeling and calculation of Soil–structure interaction in difficult geotechnical conditions.

The second section is devoted to the determination of impacts on buildings and structures by difficult geotechnical conditions and contains a number of suggestions

by the author to improve analytical methods for determining uneven base deformations, which are taken into account both in the main and the special combinations of loads. Possible combinations of various difficult geotechnical conditions are considered, the effects of which are simultaneously taken into account in a special combination of loads. The difficult geotechnical conditions classification is proposed depending on the method of modeling the impact on the buildings from the side of an unevenly deformed base.

The third section is devoted to modeling of "Soil–structure" system in difficult geotechnical conditions. The analysis and systematization of various methods of modeling of the elements of the "SS" system and the account of the impacts on the building from the side of the deformable base are carried out. The main factors affecting the stiffness of both individual elements of the "SS" system and the relative stiffness of the system as a whole are considered and systematized.

The fourth and sixth sections analyze the results of numerical studies, field surveys and monitoring of buildings operating in difficult geotechnical conditions. The influence of the relative stiffness of the "SS" system on the forms of damage in structures is analyzed.

The fifth section provides guidance on using «DesCon» software, which allows you to determine stiffness characteristics and forced displacement of the base in difficult geotechnical conditions, which can later be used for calculation of Soil–structure interaction.

Key words: Soil–structure interaction, base rigidity index, difficult geotechnical conditions, uneven deformations of the base, forced displacements of earth surface

