

УДК 624.04:69.05:624.131.5

канд. техн. наук, профессор Банах В.А.,
Запорожская государственная инженерная академия

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ С ГРУНТОВЫМИ ОСНОВАНИЯМИ В СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Исследованы факторы, влияющие на изменение напряженно-деформированного состояния конструкций зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях. Предложены методы, приемы и механизмы учета этих факторов при расчетах зданий и сооружений. Разработаны принципы, методика и рекомендации по моделированию взаимодействия зданий и сооружений с грунтовыми основаниями в сложных инженерно-геологических условиях для стадий проектирования, возведения, эксплуатации, реконструкции, аварийных ситуаций и их ликвидации, при статических и динамических воздействиях.

Ключевые слова: расчетные модели взаимодействия зданий и сооружений с основаниями, сложные инженерно-геологические условия, предварительные деформации, деформированная схема, напряженно-деформированное состояние, статические воздействия, динамические воздействия, мониторинг, обследование конструкций

Актуальность проблемы. При эксплуатации строительных объектов в сложных инженерно-геологических условиях практически всегда возникают неравномерные деформации их грунтовых оснований, следствием которых становятся деформации зданий и сооружений. Исследования показывают, что в таких условиях большинство строительных объектов находится в деформированном состоянии. При статических и динамических воздействиях такое деформированное состояние зданий и сооружений, которое можно условно назвать предварительным, влияет на их поведение и изменяет напряженно-деформированное состояние (НДС) отдельных конструктивных элементов и их комплексов.

До настоящего времени не решена проблема корректного моделирования поведения зданий и сооружений, деформированных и как бы «нагруженных» после воздействий неравномерных деформаций оснований, возникающих в сложных инженерно-геологических условиях и как результат силового и кинематического статико-динамического взаимодействия системы «здание (сооружение) – основание», и в ходе самостоятельных физико-химических процессов в сложных грунтовых слоях и включениях. Учитывая мероприятия,

закладаються в соответствии с нормативными требованиями [1, 2] в проекты таких зданий и сооружений, их эксплуатацию, осложняемую предварительными деформациями и сложным напряженным состоянием конструктивных элементов, а также реконструкцию, зачастую стихийную, и возможность аварийных состояний отдельных конструкций и объекта в целом, необходима методика формирования адекватных расчетных моделей взаимодействия конструкций зданий и сооружений с грунтовыми основаниями при статических и динамических воздействиях. При этом важно количественно и качественно исследовать факторы, влияющие на работу таких объектов, методы моделирования, механизмы передачи статических и динамических воздействий на конструкции, а также разработать принципы моделирования и рекомендации по формированию расчетных моделей зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях для стадий проектирования, возведения, эксплуатации, реконструкции, некоторых аварийных ситуаций и их ликвидации.

Конкретные модели взаимодействия зданий и сооружений с основаниями будут существенно отличаться в зависимости от конструктивных систем, например, для высотных зданий, мостов, башен и других разнообразных сооружений, лежащих на основаниях, имеющих в общем случае совершенно различные виды и свойства грунтов, неоднородности, флуктуации, а также условий работы (примеры моделирования работы многоэтажных каркасных и бескаркасных, крупнопанельных и кирпичных гражданских зданий и высотных промышленных сооружений приведены в отчетах о выполнении госбюджетных и хоздоговорных работ кафедры городского строительства и хозяйства Запорожской государственной инженерной академии, а также в публикациях с участием автора [9...17]). В данной статье рассмотрены лишь некоторые обобщения, даны алгоритмы и рекомендации, охватывающие все указанные примеры.

Анализ последних исследований и публикаций. Решению проблем, связанных с моделированием внешних воздействий на здания и сооружения, учетом их взаимодействия с грунтовыми основаниями при статических и динамических нагрузках (с применением не только метода конечных элементов, но и других методик), посвящен ряд исследований И.П. Бойко, А.С. Городецкого, Е.В. Горохова, А.А. Дыховичного, Б.Н. Жемочкина, В.А. Ильичева, С.Н. Клепикова, С.Ф. Клованича, В.В. Кулябко, И.В. Матвеева, В.Ф. Мущанова, Ю.И. Немчинова, А.В. Перельмутера, А.А. Петракова, С.Ф. Пичугина, И.А. Симвулиди, Г.И. Черного, В.Г. Шаповала, В.Б. Швеца, В.С. Шокарева и других [3...8].

Однако проблеме учета в расчетных статико-динамических моделях

взаимодействия зданий и сооружений с неравномерно-деформируемыми основаниями предварительно накопленных напряжений и деформаций, а также дефектов отдельных конструктивных элементов, до сих пор не уделялось достаточного внимания. Методика формирования расчетных моделей такого взаимодействия для сложных инженерно-геологических условий отсутствует.

Цель исследования заключается в новом решении научной задачи, состоящей в комплексной оценке факторов, подлежащих обязательному учету при моделировании взаимодействия зданий и сооружений с грунтовыми основаниями в сложных инженерно-геологических условиях, и в оценке влияния этих факторов на НДС несущих конструкций на стадиях проектирования, возведения, эксплуатации, реконструкции, аварийных ситуаций и их ликвидации, при статических и динамических воздействиях. При этом создана методика формирования адекватных расчетных моделей взаимодействия зданий и сооружений с грунтовыми основаниями в сложных инженерно-геологических условиях.

Материалы исследования. Работа выполнялась в соответствии с Постановлением Кабинета Министров Украины № 409 то 05 мая 1997 г. «Об обеспечении надежности и безопасной эксплуатации зданий, сооружений и инженерных сетей», а также в рамках госбюджетных исследований Запорожской государственной инженерной академии «Особенности проектирования, эксплуатации и реконструкции зданий и сооружений, методов их расчета и объемно-планировочных решений в сложных условиях строительства».

Одним из определяющих факторов при формировании расчетных моделей зданий и сооружений, проектируемых, возводимых и эксплуатируемых в сложных инженерно-геологических условиях, является учет их деформированной схемы, которая включает напряжения и деформации, прогнозируемые при возможных или накопленные в процессе эксплуатации при фактических неравномерных деформациях основания.

На основе анализа сложных инженерно-геологических условий, механизмов развития неравномерных деформаций оснований и их влияния на НДС конструкций зданий и сооружений, предложены варианты учета деформированной схемы объектов в их расчетных моделях.

Деформированная схема используется для учета возможных (при проектировании и возведении) или фактических (при эксплуатации и реконструкции) деформаций, вызванных неравномерными осадками оснований. Для получения деформированной модели предусмотрено три возможности:

– корректировка геометрической схемы расчетной модели по данным натурного обследования (для эксплуатируемых зданий и сооружений) или по

результатам расчета прогнозируемых перекосов и кренов (для проектируемых зданий и сооружений);

– сохранение деформированной схемы расчетной модели метода конечных элементов (МКЭ) (или иных методов, позволяющих учитывать в статике и динамике сложно моделируемые МКЭ «большие» деформации), полученной в результате статического расчета системы «здание (сооружение) – основание», как исходных данных для следующего этапа расчета по специальному алгоритму (заметим, что для учета известных сегодня и иногда весьма существенно влияющих на процессы геометрических, физических и даже конструкционных нелинейностей, описывающих наиболее сложные грунтовые условия и процессы срывов и просадок, статико-динамическая модель взаимодействия с основанием может быть значительно упрощена для получения основных параметров НДС определяющих ситуацию несущих нагрузок объекта);

– преобразование перемещений узлов модели, полученных при расчете системы «здание (сооружение) – основание», в эквивалентные нагрузки, реализованное в некоторых, в том числе и конечноэлементных, программных комплексах (ПК) (например, ПК LIRA-Windows).

Такие способы задания деформированной схемы здания (сооружения) учитывают предысторию его нагружения, когда текущая реакция конструкций здания (сооружения) на внешние воздействия накладывается на его напряженное состояние, возникшее в результате действия неравномерных деформаций грунтового основания.

Для рассмотренных вариантов расчетных моделей реальных строительных объектов результаты сопоставления параметров НДС, а именно – перемещений узлов моделей – показал, что учет предварительных деформаций при статических и динамических расчетах зданий и сооружений приводит по сравнению с традиционными методиками расчетов к увеличению перемещений в конкретных случаях до 30 % для моделей с учетом грунтового основания специальными конечными элементами (КЭ), моделирующими односторонние упругие связи, и до 13 % – для моделей с учетом основания в виде грунтового массива, представленного объемными КЭ.

Адекватность используемых расчетных моделей подтверждена натурными данными, полученными в результате обследований технического состояния нескольких эксплуатируемых зданий и сооружений, а именно – значениями перекосов, кренов, смещений и дефектов строительных конструкций, удовлетворительно совпадающих с расчетными (в пределах допустимых отклонений).

Проведенные численные эксперименты с моделями объектов, различных

по конструктивной схеме и структуре, позволили исследовать чувствительность параметров их взаимодействия с основаниями к изменению расчетной ситуации при развитии неравномерных деформаций. Предложена методика прогнозирования изменений НДС конструкций строительных объектов при их эксплуатации в сложных грунтовых условиях.

Была также оценена чувствительность расчетных моделей взаимодействия к подробности их описания, а именно – учет пространственной работы и сложного напряженного состояния конструкций при неравномерных деформациях основания, влияние точности и подробности описания конструктивной схемы в расчетных моделях, необходимость и возможность моделирования стыков и связей между конструктивными элементами, а также влияние функции формы КЭ на результаты расчета (по данным массовых расчетов объектов при вариациях конструкций и свойств их стыков).

Были изучены особенности моделирования зданий и сооружений с длительным сроком эксплуатации. По результатам расчетов сопоставлено влияние и выявлены наиболее существенные факторы, которые необходимо учитывать в расчетных моделях: предварительные деформации, дефекты, снижение физико-механических характеристик материалов конструкций, учет условий эксплуатации (пожары, аварийные ситуации, близость транспортных магистралей, строительных и промышленных площадок, агрессивные компоненты окружающей среды, влияющие на ограждающие конструкции, и прочее). Особое внимание уделено моделированию дефектов строительных конструкций в эксплуатируемых и прогнозированию их образования и развития в проектируемых зданиях и сооружениях.

Реконструкции существующих зданий и сооружений, как правило, предшествует обследование их технического состояния. При этом для заключения о техническом состоянии объекта, в котором предполагается реконструкция, необходимо проведение проверочных расчетов остаточной несущей способности основных конструктивных элементов, а для заключения о возможности реконструкции необходим расчет с учетом перепланировки, изменения назначения помещений, устройства новых проемов, расширения или заделки существующих, частичного изменения конструктивной схемы здания (сооружения), пристройки, надстройки, устройства новых конструктивных элементов (например, балконов и лоджий, элементов усиления несущих конструкций) и т. п. В исследовании показаны примеры некоторых, опасных для прочности объекта, конструктивных решений.

При дальнейшей эксплуатации таких зданий и сооружений возможны неравномерные осадки основания в результате воздействия просадки, горной подработки, влияния структурно-неустойчивых грунтов, оползней и прочих

сложных для строительства грунтовых условий. Такие деформации могут происходить скачкообразно или равномерно, за один этап или за несколько последовательных этапов. Таким образом, здания и сооружения, эксплуатируемые в сложных инженерно-геологических условиях, в случае проведения в них реконструкции также находятся в предварительно деформированном состоянии, что сказывается на условиях работы конструкций и на величине внутренних усилий в основных элементах.

Результаты многочисленных обследований зданий и сооружений, эксплуатируемых в сложных грунтовых условиях, подтверждают их деформированное состояние (крены и перекосы), наличие трещин и дефектов. В этом случае необходимо осторожно подходить к реконструкции, связанной с пробивкой проемов, частичным изменением конструктивной схемы здания или сооружения (пристройки, надстройки, устройство подвалов, новых балконов и другие). Так как исходная геометрия конструктивной системы нарушена, мероприятия по реконструкции могут вызвать дополнительные нагрузки, напряжения в элементах могут достигнуть предельных значений и вызвать местное разрушение конструкций.

В исследовании изучено влияние перепланировки и перепрофилирования помещений зданий (сооружений) на их расчетные модели, устройства новых проемов в несущих элементах на их нагруженность, приведены принципы и критерии определения допустимости возведения пристроек и надстроек, устройства новых и расширения существующих балконов и лоджий. Рассмотрены особенности усиления несущих конструкций зданий и сооружений, эксплуатируемых в сложных грунтовых условиях, разработаны принципы выбора рациональных конструкций усиления элементов зданий и сооружений, и учета их влияния на параметры НДС элементов расчетных моделей.

Разработана методика моделирования так называемого жизненного цикла эксплуатируемых зданий и сооружений на основании информации, полученной системами мониторинга их состояния. Схема такого моделирования может быть представлена следующей последовательностью:

- создается оптимально подробная пространственная модель существующего здания или сооружения, по возможности с учетом нелинейной работы материалов конструкций, податливостью стыков, односторонним характером связей конструкций фундаментов с основанием и т.д.;

- по результатам обследования здания или сооружения определяются дополнительные воздействия на него за период эксплуатации, как деформационные (крены, перекосы, дефекты), так и силовые, на которые и выполняется расчет подробной модели;

- проверяется адекватность расчетной модели сопоставлением результатов натуральных наблюдений и результатов расчета, причем показателем достоверности может служить совпадение мест расположения дефектов в натурном здании или сооружении с местами в расчетной модели, где достигнуты предельные состояния;

- по данным приборного контроля системы мониторинга, установленной в здании или сооружении (желательно, измеряющей в контрольных точках деформационные характеристики в виде пространственных линейных и угловых перемещений), выполняется последовательная корректировка расчетной модели в ручном или автоматизированном режиме с расчетом параметров напряженно-деформированного состояния конструкций шаговым методом с моделированием деформационных воздействий основания на здание или сооружение на каждом этапе;

- выполняется комплексный анализ результатов расчетов с целью выявления участков конструкций и их элементов, работающих в предельном состоянии, а также разрабатываются мероприятия по усилению этих элементов и соседних конструкций, в которые происходит перераспределение усилий;

- расчетная модель корректируется введением элементов усиления конструкций, при этом обязательно учитывается характер крепления конструкций усиления к существующим элементам, выполняется расчет;

- составляется прогноз дальнейшей работы здания или сооружения, определяются неблагоприятные ситуации, связанные с развитием деформационных воздействий основания на объект, выявляются участки конструкций и их элементов, напряжения в которых близки к предельным, составляются рекомендации по усилению этих конструкций или участков основания, и дальнейшей безопасной эксплуатации здания или сооружения.

В настоящее время не решена задача комплексного хранения всей накопленной информации о строительном объекте за период его эксплуатации. Все эти работы предлагается эффективно выполнить с использованием геоинформационных систем (ГИС), которые сочетают в себе возможности работы с графическими изображениями, например, картами или планами, и реляционными базами данных, в которых можно организовать хранение любого количества информации об объектах на местности. Основная отличительная особенность ГИС от систем автоматизированного проектирования и систем управления базами данных – наличие мощных аналитических возможностей. Это дает возможность, кроме хранения полной информации о зданиях и сооружениях, вводить в базы данных их расчетные модели, и при изменении условий эксплуатации (реконструкция, изменение назначения, перепланировка, неравномерные деформации грунтовых

оснований, динамические нагрузки, аварийные ситуации и др.) – выполнять расчеты скорректированных моделей и накапливать информацию, позволяющую прогнозировать дальнейшую эксплуатацию. Такой подход может в ближайшем будущем дать возможность при значительных объемах накопленной информации об объекте перейти к интеллектуальным экспертным системам, осуществляющим непрерывный мониторинг, динамическую паспортизацию и прогнозирование технического состояния такого объекта.

Также предложены динамические модели взаимодействия зданий и сооружений с основаниями с учетом механизмов передачи динамических воздействий через грунт. Использована возможность решения динамических задач во временной области при помощи модуля «Динамика-плюс» ПК LIRA-Windows, реализующего возможность прямого интегрирования уравнений движения для расчета динамических процессов во времени. Учитывая известные противоречия и недостатки конечноэлементного подхода к решению задач динамики многокомпонентных систем, усовершенствована статико-динамическая (инерционная и упруго-диссипативная) модель основания.

Методика формирования расчетных моделей взаимодействия зданий и сооружений с грунтовыми основаниями в сложных инженерно-геологических условиях приведена в виде рекомендаций и готова к использованию в специализированных проектных и строительных организациях. Апробация методики проведена на объектах городской и промышленной застройки, о чем имеются акты внедрения результатов исследований в проектную и расчетную практику, а также результаты проведенных исследований были положены в основу п. 8.4 «Расчеты системы «основание – фундамент – сооружение»» раздела 8 «Расчеты фундаментов по конструктивным особенностям и условиям взаимодействия с основаниями» ДБН В.2.1-10-2009 «Основания и фундаменты сооружений. Основные положения проектирования».

Выводы:

1. Решена научная задача, состоящая в комплексной оценке факторов, подлежащих обязательному учету при моделировании взаимодействия зданий и сооружений с грунтовыми основаниями в сложных инженерно-геологических условиях.

2. Исследовано влияние различных факторов и параметров на НДС несущих конструкций зданий и сооружений на стадиях проектирования, возведения, эксплуатации, реконструкции, аварийных ситуаций и их ликвидации, при статических и динамических воздействиях.

3. Источником информации об объектах городской застройки, особенно эксплуатируемых в сложных условиях, может служить геоинформационная система, в базе данных которой накапливаются сведения о техническом

состоянии объектов, инженерно-геологических условиях площадки, особенностях и проблемах эксплуатации, реконструкциях, авариях и т.п.

4. Для моделирования взаимодействия зданий и сооружений с основаниями при динамических воздействиях, передаваемых через грунтовую толщу, усовершенствована статико-динамическая (инерционная и упруго-диссипативная) модель основания и механизма передачи вибрации, которая применялась для решения существенно нелинейных динамических задач во временной области.

5. Создана методика формирования адекватных расчетных моделей взаимодействия зданий и сооружений с грунтовыми основаниями в сложных инженерно-геологических условиях при статических и динамических воздействиях.

Литература

1. ДБН В.1.1-5-2000. Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах. Ч. I: Здания и сооружения на подрабатываемых территориях / Государственный комитет по строительству, архитектуре и жилищной политике Украины. – К.: Госстрой Украины, 2000. – 66 с.

2. ДБН В.1.1-5-2000. Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах. Ч. II: Здания и сооружения на просадочных грунтах / Государственный комитет по строительству, архитектуре и жилищной политике Украины. – К.: Госстрой Украины, 2000. – 84 с.

3. Городецкий А. С. Компьютерные модели конструкций / А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров. – К.: Издательство «Факт», 2005. – 344 с.

4. Дыховичный А. А. Модели строительных конструкций и их идентификация : дис. ... доктора техн. наук : 05.23.01 / Дыховичный Александр Александрович. – К., 1995. – 322 с.

5. Клепиков С. Н. Расчет сооружений на деформируемом основании / С. Н. Клепиков. – К.: НИИСК, 1996. – 202 с.

6. Клованич С. Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики / С. Ф. Клованич. – Запорожье, 2009. – 400 с.

7. Перельмутер А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – М.: Издательство ДМК Пресс, 2007. – 595 с.

8. Шаповал В. Г. Особенности взаимодействия весомого водонасыщенного основания с расположенными на нем зданиями и сооружениями : монография / В. Г. Шаповал, П. Н. Нажа, А. В. Шаповал. –

Днепропетровск: Пороги, 2010. – 251 с.

9. Банах В. А. Использование результатов обследования существующих зданий для формирования и корректировки их расчетных моделей / В. А. Банах // Коммунальное хозяйство городов. – Вып. 76. – К: «Техніка», 2007. – С. 101-106.

10. Банах В. А. Мониторинг напряженно-деформированного состояния зданий при устранении их сверхнормативных кренов / Шокарев В.С., Шаповал В.Г. и др. // Геотехника Беларуси: наука и практика / Сборник статей Междунар. науч.-тех. конф. – Минск: БНТУ, 2008. – С. 399-409.

11. Банах В. А. Нелинейные упрощенные модели несущих конструкций сооружений с демпфирующими устройствами для анализа задач динамического взаимодействия во временной области / В. В. Кулябко, В. А. Банах // Актуальные проблемы исследований по теории сооружений / Сборник научных трудов. – Ч. 3. – М.: ОАО «ЦПП», 2009. – С. 1-4.

12. Банах В. А. Аналіз напружено-деформованого стану попередньо деформованої металевої димової труби заввишки 72 м з урахуванням дефектів / В. А. Банах, А. В. Банах // Баштові споруди: матеріали, конструкції, технології / Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури: Збірник наукових праць. – Вып. 2009-4 (78). – Макіївка, 2009. – С. 29-33.

13. Банах В. А. Проблемы моделирования динамических нагрузок и расчетных схем сооружений, проведения динамических испытаний и анализа их результатов / В. В. Кулябко, В. А. Банах, В. П. Редченко // Баштові споруди: матеріали, конструкції, технології / Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури: Збірник наукових праць. – Вып. 2009-4 (78). – Макіївка, 2009. – С. 104-110.

14. Банах В. А. Безопасность зданий и сооружений (прочность конструкций, работоспособность оборудования, комфорт людей) – состояние и необходимые исследования / Кулябко В.В., Банах В.А., Банах А.В. // Коммунальное хозяйство городов. Вып. 91. – К.-Харків: «Основа», 2010. – С. 279-285.

15. Банах В. А. Застосування геоінформаційних технологій для формування баз даних розрахункових моделей об'єктів міської забудови // Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник. Вып. 37. – К.: КНУБА, 2010. – С. 31-38.

16. Банах В. А. Особливості формування розрахункових моделей при сейсмічних впливах на будівлі у складних інженерно-геологічних умовах // Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник. Вып. 38. – К.: КНУБА, 2010. – С. 10-16.

17. Банах В. А. Напряженно-деформированное состояние

железобетонных конструкций зданий, эксплуатируемых длительное время в сложных инженерно-геологических условиях // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць. – Вип. 74: В 2-х кн.: Книга 2. – К.: ДП НДІБК, 2011. – С. 433-440.

Анотація

Досліджені фактори, що впливають на зміну напружено-деформованого стану конструкцій будівель і споруд у складних інженерно-геологічних умовах. Запропоновані методи, прийоми та механізми врахування цих факторів при розрахунках будівель і споруд. Розроблені принципи, методика і рекомендації по моделюванню взаємодії верхніх будов з ґрунтовими основами в складних інженерно-геологічних умовах для стадій проектування, зведення, експлуатації, реконструкції, аварійних ситуацій та їх ліквідації, при статичних та динамічних навантаженнях.

Ключові слова: розрахункові моделі взаємодії будівель і споруд з основами, складні інженерно-геологічні умови, попередні деформації, деформована схема, напружено-деформований стан, статичні навантаження, динамічні впливи, динамічні моделі, моніторинг, обстеження конструкцій

Annotation

Factors, influencing on the change of the stress-strain state of constructions of building in difficult engineer-geological conditions, are investigational. Methods, receptions and mechanisms of account of these factors, are offered at the calculations of building. Principles are worked out, methods and to recommendation on the design of co-operation of overhead structures with the grounds in difficult engineer-geological conditions for the stages of planning, building, exploitation, reconstruction, emergency situations and their liquidation, at static and dynamic influences.

Keywords: calculation models of co-operation of overhead structures with the grounds, difficult engineer-geological conditions, pre-deformed state, deformed chart, stress-strain state, static influences, dynamic influences, dynamic models, monitoring, inspection of constructions