

УДК 624.048

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

АДЕКВАТНОСТЬ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ И ИХ АККОМОДАЦИЯ К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Приведены результаты численных исследований расчетных моделей зданий и сооружений для определения их адекватности реальным объектам. Представлена методика численно-экспериментальной оценки адекватности расчетных моделей и их аккомодации по аналитическим и экспериментальным данным.

Ключевые слова: здания и сооружения, расчетные модели, адекватность, аккомодация моделей

Актуальность проблемы. Для разработки методики моделирования взаимодействия строительных конструкций, зданий и сооружений с грунтовыми основаниями в сложных инженерно-геологических условиях с использованием численного эксперимента, основанного на применении расчетных моделей метода конечных элементов (МКЭ), необходимо подтверждение адекватности используемых для этих целей моделей.

Цель исследования: проведение численных исследований расчетных моделей системы «здание (сооружение) – основание» с целью определения их адекватности реальным объектам, а также разработка методики численно-экспериментальной оценки адекватности расчетных моделей и их аккомодации по аналитическим и экспериментальным данным.

Материалы исследования. Проверка адекватности разработанных расчетных моделей проводится сопоставлением данных экспериментальных исследований специальной физической модели с результатами численных исследований на расчетной. Так как экспериментальные данные содержат некоторую неопределенность, связанную с погрешностями измерительного комплекса, нагружающих устройств, изменением внешних условий во время эксперимента и т. д., а исходные параметры, закладываемые в расчетную модель, обладают существенной изменчивостью (физико-механические характеристики материалов, жесткости элементов и т. д.), то математически задачу проверки адекватности расчетной модели реальному объекту (физической модели) можно трактовать как проверку некоторой совокупности статистических гипотез.

В соответствии с системным подходом к исследованиям сложных строительных конструкций [1] контроль адекватности расчетных моделей

проводится в несколько этапов:

- установление адекватности по одному виду параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) локальной области;
- установление адекватности параметров НДС по всему объекту;
- проверка адекватности по всем параметрам.

Проверка адекватности расчетной модели по одному виду параметров в локальной области основана на сравнении экспериментальных и теоретических значений и их доверительных интервалов методами математической статистики. Для получения доверительных оценок теоретических значений параметров НДС в [1] предлагается инженерный метод, основанный на статистической динамике механических систем и математической теории планирования экспериментов, исходя из предположения о том, что, если область определения некоторой функции ограничена определенными доверительными интервалами, то эта функция с достаточной точностью может быть аппроксимирована полиномом определенного вида. Тогда доверительные интервалы параметров вычисляются как погрешность функции независимых случайных величин.

Один из наиболее удобных и достаточно простых способов установления глобальной адекватности как заключительного этапа проверки тождества расчетных моделей (оценка по всему множеству параметров напряженно-деформированного состояния) основывается на применении обобщенной функции желательности Харрингтона [2]. В основе метода – идея преобразования натуральных значений параметров в безразмерные величины согласно шкале желательности, или предпочтительности, назначение которой – установление соответствия между физическими и психологическими (умозрительными) параметрами (понимаются чисто субъективные оценки исследователем предпочтительности или желательности того или иного значения параметра).

Могут быть и другие граничные оценки. Для уменьшения влияния субъективного фактора следует воспользоваться мнением нескольких специалистов. При обобщении этих мнений и установлении степени согласованности между различными специалистами можно воспользоваться методом ранговой корреляции [3].

Адекватность расчетных моделей и достоверность расчетов наилучшим образом оценивается путем корректного проведения натуральных статических и динамических испытаний сооружения. На практике рассматриваются не только методики проведения специфических натуральных и лабораторных испытаний с корректировкой возможных погрешностей, но и расширяются возможности таких испытаний. Они применяются в качестве способа диагностики текущего

состояния конструкций как своеобразный вариант методов неразрушающего контроля [4].

В то же время, в отличие от статических моделей, решение проблемы адекватности динамических расчетных моделей осложняется тем, что они крайне чувствительны к подробности и правильности описания как отдельных конструкций и связей между ними, так и граничных условий и способов передачи динамических воздействий на здания и сооружения.

Для доказательства адекватности применяемой расчетной модели реальному объекту возможны следующие подходы:

– соответствие расчетных характеристик модели результатам натуральных замеров при статических или динамических воздействиях на здание или сооружение при его обследовании;

– соответствие расчетных характеристик модели параметрам НДС или собственных и вынужденных колебаний здания или сооружения, полученным в результате испытаний или обследования, а для динамических моделей – динамической паспортизации объекта методом динамической диагностики;

– соответствие расчетных характеристик модели результатам известных натуральных экспериментов или обследований, описание которых имеется в научной литературе.

В первом случае производятся натурные замеры параметров НДС конструкций, амплитудно-частотных характеристик динамической реакции здания или сооружения на конкретные виды вынужденных динамических воздействий, которые сопоставляются с результатами расчета модели. При этом соответствующим оборудованием в контрольных точках конструкций определяются перемещения (напряжения), виброперемещения и частоты, а виброскорости и виброускорения вычисляются по общепринятой методике.

Во втором случае результаты расчетов сопоставляются с данными паспорта объекта (в том числе и динамического). Такие паспорта предполагается получать для возведенных зданий и сооружений при сдаче объекта в эксплуатацию, а для эксплуатируемых – при реконструкции, капитальном ремонте или изменении формы собственности. Практически все основные характеристики НДС конструкций, свободных и вынужденных колебаний объекта являются его определяющими свойствами, дающими интегральную информацию о жесткостных, инерционных и диссипативных параметрах натурального объекта в момент проведения его испытаний или обследования. Получение динамических откликов зданий и сооружений от тарированной нагрузки при динамической паспортизации дает возможность тестировать расчетные модели на адекватность практически при любых видах динамических воздействий. Важность наличия динамического паспорта

строительного объекта подтверждается возможностью оценить действительную работу конструкций и их стыков при динамических воздействиях, а также выявить скрытые дефекты и неоднородности в конструктивной системе, места гашения или усиления колебаний, не поддающиеся прямому учету.

В третьем случае расчетная модель тестируется на адекватность при помощи данных, полученных ранее для аналогичного объекта при его экспериментальных исследованиях, испытании или обследовании. Такой вариант приемлем в основном для зданий типовых серий, так как в этом случае появляется возможность накопления базы данных достоверных расчетных моделей так называемых «зданий-представителей», статические и динамические реакции которых соответствуют реальным строительным объектам.

Таким образом, критерием адекватности расчетной модели при статических или динамических воздействиях может быть соответствие параметров НДС конструкций, собственных динамических характеристик, полученных в результате расчета модели, с характеристиками, замеренными приборами непосредственно в здании или сооружении, например, при их паспортизации. Для зданий типовых серий эта проблема решается созданием и накоплением базы данных подробных расчетных моделей, протестированных в процессе паспортизации одного из зданий-представителей этого типа. Для зданий, построенных по индивидуальным проектам, такие измерения могут быть выполнены непосредственно при их паспортизации.

В случае, когда расчетная модель не отвечает критериям адекватности, возникает необходимость ее корректировки для достижения соответствия поведения расчетной модели поведению реального объекта при статических или динамических воздействиях. Такая корректировка может быть многоступенчатой и заканчивается тогда, когда основные характеристики модели и реального объекта достигают соответствия с учетом допустимых погрешностей.

Наконец, при возможности возникновения сверхнормативных воздействий необходим анализ системы с позиций теории прогрессирующего разрушения с применением специфических расчетных моделей [5].

Оценка адекватности расчетных моделей может быть выполнена одним из способов, рассмотренных выше. Однако необходимо учитывать то обстоятельство, что результаты известных крупномасштабных экспериментов (испытания всего здания, например, по данным, описанным в [6]), проводившихся в 60...80-х гг. XX в., не могут быть универсальным критерием адекватности, так как отсутствует повторяемость результата.

Для подтверждения адекватности используемых в исследовании

расчетных моделей предлагается численно-экспериментальный метод, который заключается в комплексной оценке факторов, влияющих на НДС конструкций зданий и сооружений, способов отображения этих факторов в расчетных моделях, аналитических или экспериментальных данных, на основании которых делается вывод о соответствии расчетной модели реальному объекту, и, наконец, использование методики аккомодации расчетной модели по аналитическим или экспериментальным данным.

Под аккомодацией (от лат. *accommodatio* – приспособление) расчетной модели будем понимать процесс ее последовательного уточнения по результатам аналитических (точных) решений и экспериментальных данных. Это понятие можно трактовать как приспособление расчетных моделей к специфике объектов и условий, продиктованное возможным резким изменением расчетной ситуации в процессе эксплуатации.

Структурная схема методики численно-экспериментальной оценки адекватности расчетных моделей и их аккомодации по аналитическим и экспериментальным данным приведена на рис. 1.

Суть методики заключается в следующем:

- производится анализ конструктивной системы рассчитываемого здания (сооружения), выделяется несущий конструктивный каркас и необходимые элементы, подлежащие моделированию;

- определяются параметры сечений несущих и массивных (для динамических расчетов) конструкций, а также физико-механические характеристики материалов;

- при необходимости проводится испытание образцов материалов, тестирование моделей отдельных конструкций, варьируя физико-механические характеристики и параметры сечений в соответствии с результатами испытаний, и по ним выполняется аккомодация жесткостных характеристик отдельных конструкций;

- определяются характеристики внешних (условия опирания, связи в зоне контакта здания (сооружения) с основанием и т. д.) и внутренних (стыки, сопряжения конструктивных элементов и т. д.) связей системы, при необходимости уточняются их параметры и выполняется аккомодация модели к характеристикам связей и стыков конструкций;

- на основании полученных данных формируются расчетные модели компонентов (фрагментов) здания (сооружения), а также, при необходимости, и грунтовых оснований, и выполняется их тестирование;

- выполняется обоснование выбора расчетной модели здания (сооружения) на основании натуральных испытаний или обследований рассчитываемого объекта и аккомодации модели по этим результатам, и

разрабатываются принципы построения конкретной модели;

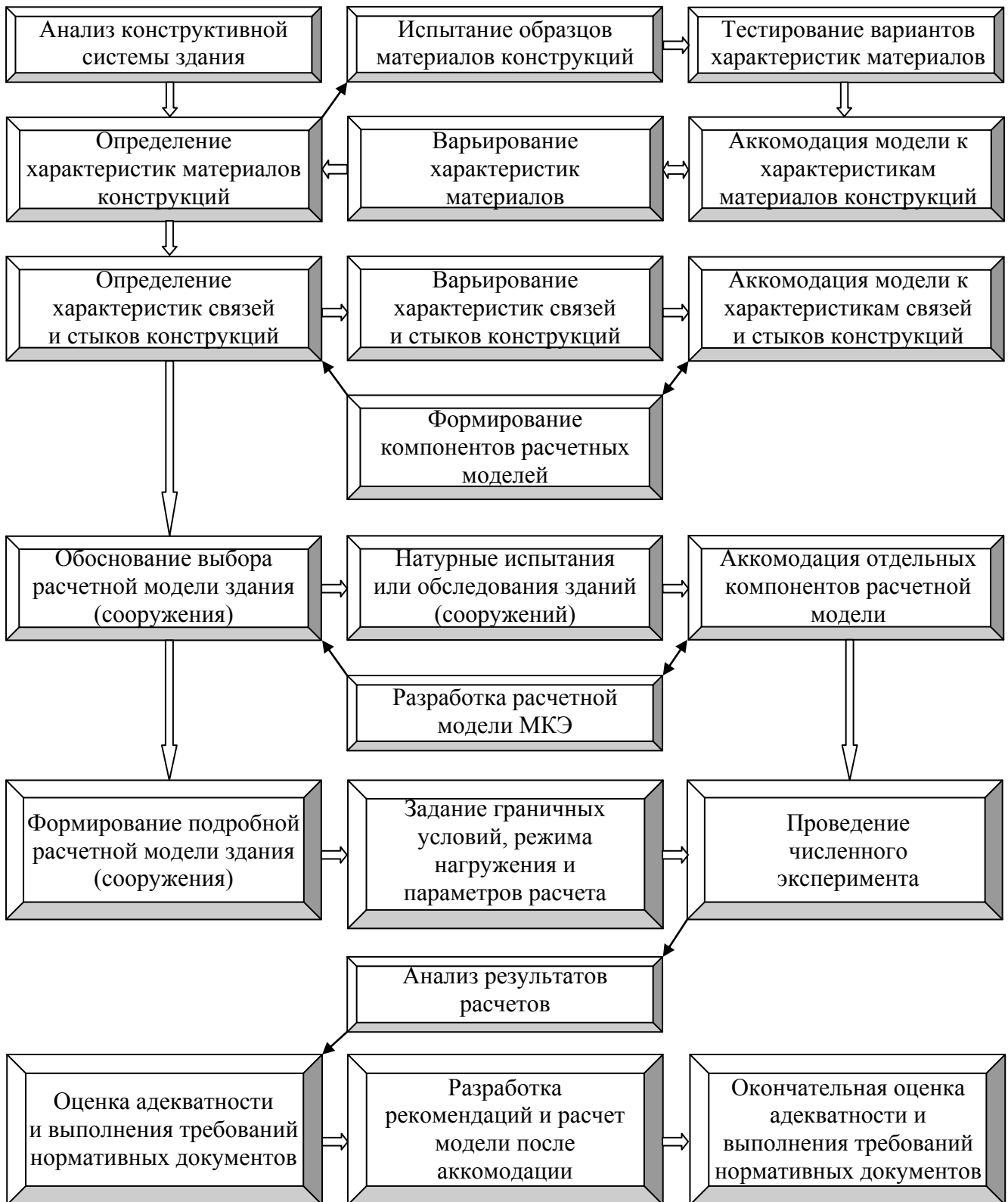


Рис. 1 – Структурная схема методики численно-экспериментальной оценки адекватности расчетных моделей и их аккомодации по аналитическим и экспериментальным данным

– из расчетных моделей компонентов (фрагментов) здания (сооружения) и грунтового основания с учетом аккомодации формируется подробная

расчетная модель рассчитываемой системы с заданием граничных условий, режима нагружения и параметров расчета;

– проводится численный эксперимент, анализ результатов расчета, их сопоставление с экспериментальными данными или аналитическими решениями, и оценивается адекватность применяемой расчетной модели и соблюдение в результате расчета требований нормативных документов;

– при необходимости выполняется окончательная аккомодация расчетной модели, разрабатываются рекомендации по ее формированию и выполняется расчет (при пошаговой аккомодации на заключительном этапе выполняется серия расчетов);

– производится окончательная оценка адекватности расчетной модели и соблюдение в результате расчета требований нормативных документов.

Применение предлагаемой методики предполагает наличие аналитических решений или результатов экспериментальных исследований, включая испытания конструкций зданий (сооружений) или их обследования. Примеры применения методики численно-экспериментальной оценки адекватности расчетных моделей и их аккомодации по экспериментальным данным при статических и динамических воздействиях приведено в [7-8] для реальных объектов с выполненным комплексом экспериментальных исследований в виде обследования их технического состояния.

Выводы. Для разработки методики моделирования взаимодействия строительных конструкций, зданий и сооружений с грунтовыми основаниями в сложных инженерно-геологических условиях с использованием численного эксперимента, основанного на применении расчетных моделей МКЭ, необходимо подтверждение адекватности используемых для этих целей моделей.

Критерием адекватности расчетной модели при статических или динамических воздействиях может быть соответствие параметров НДС конструкций или собственных динамических характеристик, полученных в результате расчета модели, с характеристиками, замеренными приборами непосредственно в здании или сооружении, например, при их паспортизации или проведении натурного эксперимента.

Для подтверждения адекватности используемых в исследовании расчетных моделей предложен численно-экспериментальный метод, который заключается в комплексной оценке факторов, влияющих на НДС конструкций зданий и сооружений, способов отображения этих факторов в расчетных моделях, аналитических или экспериментальных данных, на основании которых делается вывод о соответствии расчетной модели реальному объекту, и, наконец, использование методики аккомодации расчетной модели по

аналитическим или экспериментальным данным.

Литература

1. Методические рекомендации по исследованию строительных конструкций с применением математического и физического моделирования : [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.gosthelp.ru/text/Methodicheskierekomendacii368.html>.
2. Harrington E. C. The desirability function / Harrington E. C. // Industrial Quality Control. – 1965. – № 21 (10). – P. 494-498.
3. Адлер Ю. П. Введение в планирование эксперимента / Адлер Ю. П. – М. : Металлургия, 1969. – 279 с.
4. Кулябко В. В. Динамика конструкций, зданий и сооружений. Ч. 1 : Статико-динамические модели для анализа свободных колебаний и взаимодействия сооружений с основаниями и подвижными нагрузками / В. В. Кулябко. – Запорожье: ЗГИА, 2005. – 232 с.
5. Ключева Н. В. Основы теории живучести железобетонных конструктивных систем при запроектных воздействиях : автореф. дис. на соискание науч. степени доктора техн. наук : спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / Н. В. Ключева. – М., 2009. – 42 с.
6. Клепиков С. Н. Расчет зданий и сооружений на просадочных грунтах / Клепиков С. Н., Трегуб А. С., Матвеев И. В. – К. : Будівельник, 1987. – 200 с.
7. Банах В. А. Моделювання динамічних впливів на систему «будівля – ґрунтова основа» в складних інженерно-геологічних умовах : монографія / В. А. Банах, А. В. Банах. – Запоріжжя: Видавництво ЗДІА, 2012. – 186 с.
8. Банах В. А. Статико-динамические расчетные модели зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях : монография / В. А. Банах. – Запорожье: Издательство ЗГИА, 2012. – 334 с.
9. Безопасность эксплуатируемых зданий и сооружений : монография / [под ред. В. И. Теличенко и К. И. Ерёмина]. – М.: ВЕЛД, 2011. – 428 с.

Анотація

Наведені результати чисельних досліджень розрахункових моделей будівель і споруд для визначення їхньої адекватності реальним об'єктам. Надана методика чисельно-експериментальної оцінки адекватності розрахункових моделей та їхньої акомодатії за аналітичними та експериментальними даними.

Ключові слова: будівлі та споруди, розрахункові моделі, адекватність, акомодатія моделей

Abstract

Results of numerical researches of calculation models of buildings and structures for determination of their adequacy to the real objects are given. The methods of numeric-experimental estimation of adequacy of calculation models and their accommodation on the analytical and experimental data are presented.

Keywords: buildings and structures, calculation models, adequacy, accommodation of models