

УДК 624.012.82

© Б. А. Смирнов, ведущий инженер-геотехник
(ООО «Центр Диагностики Строительных
Конструкций»,
Санкт-Петербург, Россия)

© В. М. Полунин, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: bsmirnov@stpr.ru, n1ce2u@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-1-37-47

© B. A. Smirnov, leading geotechnical engineer
(LLC «Center for Diagnostics
of Building Structures»,
St. Petersburg, Russia)

© V. M. Polunin, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: bsmirnov@stpr.ru, n1ce2u@yandex.ru

РАЗВИТИЕ ПОДХОДОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДОПУСТИМЫХ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ИСТОРИЧЕСКОЙ ЗАСТРОЙКИ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

DEVELOPMENT OF APPROACHES TO DETERMINATION OF PERMISSIBLE ADDITIONAL SETTLEMENT OF HISTORICAL BUILDINGS BY NUMERICAL METHODS

Приведен обзор основных методов, применяемых для определения допустимых дополнительных деформаций окружающей исторической застройки, расположенной в зоне влияния нового строительства или реконструкции. Выполнено численное моделирование совместной работы системы «основание – фундамент – сооружение» с учетом развития неравномерных деформаций основания. Показана необходимость усовершенствования принятых подходов с помощью применения нелинейных моделей, воспроизводящих повреждение исторических зданий.

Ключевые слова: численное моделирование, совместные расчеты, нелинейное поведение материалов.

The paper presents an overview of the main methods used to determine the permissible additional settlement of the surrounding historical buildings located in the zone of influence of new construction or reconstruction. There has been performed a numerical simulation of the joint operation of the «basement – foundation – structure» system taking into account the development of non-uniform deformation of the base. The necessity of improving the currently used approaches through the application of complex nonlinear models reproducing the damage to historical buildings is substantiated.

Keywords: finite element modeling, joint calculations, nonlinear material behavior.

Введение

Строительство сооружений в условиях городской исторической застройки сопровождается определенными рисками, связанными с возможным повреждением окружающих зданий. Сохранность существующих сооружений играет в таком случае главную роль, и именно с целью обеспечения их без-

опасности и эксплуатационной пригодности подбираются все строительные технологические и конструктивные решения.

В настоящее время при выполнении геотехнического прогноза окружающая застройка учитывается, как правило, упрощенно, по сути как нагрузка на основание. Целью геотехнического расчета является определе-

ние допустимости внешнего воздействия на существующие сооружения, однако никаких расчетов, подтверждающих достаточную несущую способность и эксплуатационную пригодность здания, не выполняется. В то же время, согласно действующим нормативным документам, критерием сохранности окружающей застройки является некоторая величина дополнительной деформации основания (осадка, относительная разность осадок, крен), зависящая от конструктивной схемы и категории технического состояния сооружения. Этот подход был предложен С. Н. Сотниковым в 70–80-х годах XX века на основе натурных наблюдений за 16 объектами различного назначения. Сам автор рассматривал назначенные критерии «как первое и достаточно грубое приближение» [1]. Таблица дополнительных деформаций, предложенная Сотниковым, была доработана [2, 3] и представлена в действующих нормативных документах^{1,2}. Однако за последние 20 лет нормы в этой части не пересматривались, хотя было бы логичным развивать подход натурных наблюдений по мере накопления данных мониторинга.

Подход, заложенный в нормах, не лишен недостатков. Каждое здание, тем более историческое, имеет свои особенности, повреждения и дефекты, которые не всегда могут быть равнозначны даже при одинаковой конструктивной схеме и категории технического состояния. Как отмечено в работе [3], только в 30 % случаев критерии «допустимые дополнительные деформации» оказался верным. Это происходит по той причине, что деформации фундаментов являются косвенным показателем степени влияния дополнительного воздействия на существующее сооружение и не описывают в полной мере изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) его конструкций. Поэтому необходимо применять более гибкий

инструмент, способный предсказывать реакцию сооружения на внешнее воздействие. Таким инструментом, очевидно, является компьютерное моделирование/расчет. Однако применяемые в настоящее время подходы к расчетам исторических зданий не позволяют с достаточной точностью описать поведение столь ответственных объектов, имеющих накопленные за длительную эксплуатацию повреждения.

Методы моделирования поведения существующих сооружений

Анализ допустимости дополнительного внешнего воздействия от влияния нового строительства / реконструкции с учетом совместной работы системы «основание — фундамент — сооружение» в последнее время все чаще применяется на практике [4]. При выполнении геотехнических расчетов инженеры-геотехники используют сложные нелинейные модели поведения грунта. В то же время конструкционные материалы, в том числе каменную историческую кладку, принято представлять упрощенно с помощью упругой модели.

Поведение существующих зданий на практике, как правило, моделируется следующими способами:

1. Обычным (инженерным) подходом: созданием пространственной модели сооружения с помощью стержневых и оболочечных (пластинчатых) конечных элементов (КЭ) и последующей оценкой усилий с проверкой по соответствующим нормам.

2. Детальным квазиупругим подходом, представленным в работах [5, 6]. Этот подход заключается в следующем:

- моделирование несущих конструкций выполняется с помощью объемных КЭ;
- материал строительных конструкций здания принимается изотропным и линейно-упругим с пониженной жесткостью для учета повреждений;
- по результатам расчета определяются области, в которых главные растягивающие

¹ СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений.

² ТСН 50-302-2004. Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге.

напряжения превышают предел прочности кладки³. Предполагается, что эти области соответствуют местам образования или раскрытия трещин;

- оценка допустимости дополнительного воздействия основывается на величине относительной деформации, по которой определяется ширина раскрытия трещин. Как правило, величина дополнительного раскрытия трещин более 1 мм считается недопустимой. Дополнительное раскрытие трещин определяется по величинам главных деформаций растяжения:

$$W_{crc,ad} = \varepsilon L / n_{crc}$$

где $W_{crc,ad}$ — дополнительная ширина раскрытия трещины; ε — относительная деформация; L — длина участка трещинообразования; n_{crc} — количество трещин на участке трещинообразования.

Представленные выше наиболее распространенные в нашей стране расчетные методы имеют определенные недостатки.

В первую очередь, это учет фактического НДС сооружений. Все здания так или иначе имеют дефекты и повреждения, накопленные за период эксплуатации. Это утверждение особенно важно для исторических зданий, которые «как правило, не имеют I категорию технического состояния»⁴, и более того зачастую находятся в ограниченно работоспособном состоянии. Наиболее распространенные дефекты/повреждения — трещины — в проектной практике принято относить ко II группе предельных состояний, тогда как согласно механике разрушения [7] они играют первостепенную роль в оценке несущей способности конструкции: трещины снижают прочность тела, изменяют его поведение, жесткость и по сути являются предвестниками разрушения. Как правило, повреждения в модели не учитываются или учитываются косвенно с помощью различ-

ных коэффициентов⁵. Эти коэффициенты, накладываясь друг на друга, могут приводить к выводам о полной потере несущей способности, в то время как здание может иметь достаточный запас прочности [8]. Понятно, что при расчете на дополнительные внешние воздействия некорректный учет исходного НДС сооружения, равно как и природного НДС массива грунта, окажет существенное влияние на полученные результаты.

Во-вторых, это прогноз изменения НДС несущих конструкций сооружений с применением линейно-упругой модели материала. Историческая застройка в основном представлена каменными сооружениями, а, как известно из работ Л. И. Онищика [9], каменная кладка, кирпич и раствор характеризуются нелинейным поведением. Применение упругой модели не позволяет учесть перераспределение напряжений, изменение жесткости отдельных конструкций и здания в целом, недооценивает развитие деформаций. При применении квазиупругого подхода «зоны возможного зарождения трещин получаются достаточно широкими, поскольку соответствуют полю главных растягивающих напряжений» [5]. То есть возможна ситуация, когда значительная часть здания будет находиться в «красной зоне». В то же время известно, что «после образования трещин поле напряжений существенно изменяется, и область растягивающих напряжений сокращается» [5]. Таким образом, применение упругой модели может привести к получению ошибочных результатов. Кроме того, при решении задач инженерным методом обычно рассматривается простое одноосное НДС, тогда как реальные конструкции находятся под влиянием многоосного напряженно-деформированного состояния, которое может как увеличивать прочность (двух-трехосное сжатие), так и уменьшать (растяжение со сжатием).

³ СП 15.13330.2020. Каменные и армокаменные конструкции.

⁴ ГОСТ Р 56198–2014. Мониторинг технического состояния объектов культурного наследия. Недвижимые памятники.

⁵ СП 427.1325800.2018. Каменные и армокаменные конструкции. Методы усиления.

Для устранения указанных недостатков и более точной оценки состояния здания, на наш взгляд, необходимо при расчете сооружений напрямую учитывать влияние дефектов и повреждений с помощью нелинейных моделей, учитывающих теорию упругости, пластичности и механику разрушения.

Исходное НДС сооружений с учетом накопленных повреждений

Определение исходного состояния сооружения является сложной задачей, которая в настоящее время не является окончательно решенной.

Наиболее правильным путем получения действительного исходного НДС является совместный расчет здания с основанием. При этом подходе большое внимание должно быть уделено ретроспективному анализу, чтобы проследить историю здания. В то же время понятно, что некоторые воздействия могут быть упущены из-за отсутствия информации. Для этого направления большое значение имеет выбор нелинейной модели как для основания, что особенно важно для сложных инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга, так и для конструкций здания. Критерием адекватности комплекс-

ной расчетной модели является соответствие деформаций сооружения и зон образования трещин их фактическому распределению.

Другим возможным путем является задание в модели фактического расположения трещин с помощью разделения конечно-элементной сетки интерфейсными или контактными элементами, учитывающими наличие сцепления (трения зацепления) между двумя поверхностями трещины, либо введением слоя со сниженной жесткостью. Ширина раскрытия трещины в таком случае может быть отслежена по высоте конструкции как разница смещений отдельных конечных элементов (рис. 1, модель построена на основе работы [10]).

Нелинейные модели каменной кладки

Экспериментальными исследованиями установлено, что зависимость между напряжениями и деформациями в кирпичной кладке является нелинейной. Нелинейность обуславливается нарастанием повреждений камня и раствора с последующим перераспределением усилий в кладке. «Внешние воздействия (нагрузки, неравномерные осадки грунтового основания) приводят к появлению в стенах здания трещин, которые, накоп-

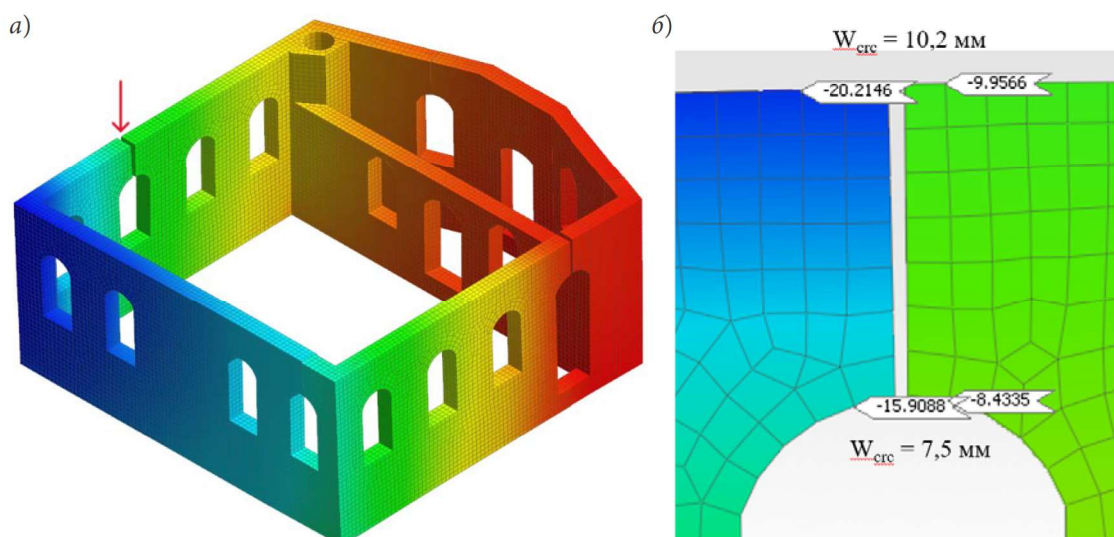


Рис. 1. Определение ширины раскрытия трещин по модели с контактными элементами: а — деформированное состояние здания; б — величины горизонтальных перемещений и ширины раскрытия трещин

ливаясь, могут привести к потере несущей способности здания. Однако этот момент не является внезапным, а является результатом накопления повреждения на разных структурных уровнях» [11].

Для определения момента образования трещин при сложном НДС, в котором находятся реальные конструкции, необходимо применение теории пластичности и определенных теорий прочности.

Поведение каменной кладки в запредельной стадии — на этапе развития/распространения магистральных трещин — может быть описано с помощью механики разрушения. Визуально этот этап для одноосного НДС представляется ниспадающей ветвью на диаграмме деформирования (рис. 2). Подобный эффект в иностранной литературе называется разупрочнением (softening). В [12] Lourenco определяет разупрочнение как «постепенное снижение механического сопротивления при непрерывном росте деформаций».

На сегодняшний день создано множество различных моделей каменной кладки [13]. В настоящей работе остановимся на моделях, реализованных в геотехнических программных комплексах, так как они позволяют учесть нелинейную работу как основания, так и строительных конструкций.

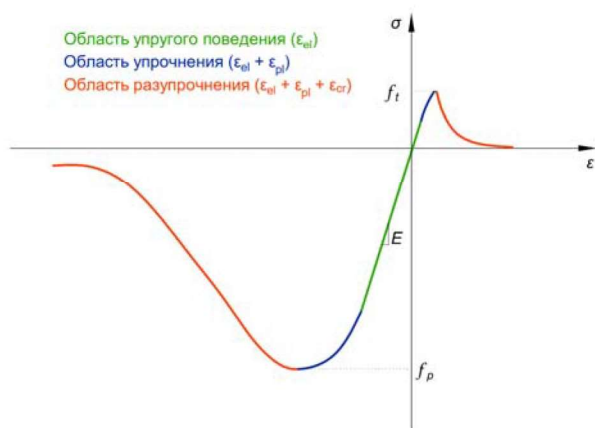


Рис. 2. Диаграмма деформирования каменной кладки при одноосном растяжении/сжатии

Результаты

Для иллюстрации изложенных положений была выполнена серия совместных (для системы «здание — основание») расчетов. Внешнее воздействие на здание моделировалось приложением нагрузки на прилегающий массив грунта. Рассматривались модели, реализованные в Midas FEA/GTS NX: «Masonry», «Concrete Smeared Crack» (CSC), «Concrete Damage Plasticity» (CDP)⁶. Применимость моделей CSC и CDP к каменной кладке была показана в работах [14–17]. За предел прочности кладки на растяжение принято значение 300 кПа, а на сжатие — 3000 кПа. В CSC-модели назначено хрупкое поведение кладки при растяжении, а в CDP-модели разупрочнение задано по экспоненциальной зависимости (рис. 3, а, б). В области сжатия работа кладки осуществлялась по диаграмме Thorenfeldt (рис. 3, в).

На рис. 4–6 показано влияние начальных повреждений на итоговое состояние здания. Моделировалось одно и то же дополнительное воздействие, показанное на рис. 4, при различном исходном деформированном состоянии здания:

- случай 0 — только собственный вес;
- случай 1 — собственный вес + незначительная накопленная осадка;
- случай 2 — собственный вес + существенная накопленная осадка.

В качестве модели каменной кладки принята модель «smeared crack» («размазанная трещина», CSC). По представленным иллюстрациям видно, что чем больше исходные поврежденность/деформации здания, тем большее влияние оказывают новые дополнительные воздействия. Таким образом, подтверждается тезис о необходимости корректного учета исходного НДС.

Как уже было отмечено ранее, другим способом учета начальных повреждений яв-

⁶ Пособие по расчетам. Midas GTS NX. URL: <https://workdrive.zohoexternal.com/external/c233dcad3fe28fa87593a9bc0bea90dc56126f7fdb4817ad7ee9bc8b273ae0bf?layout=list> (дата обращения: 22.12.2023).

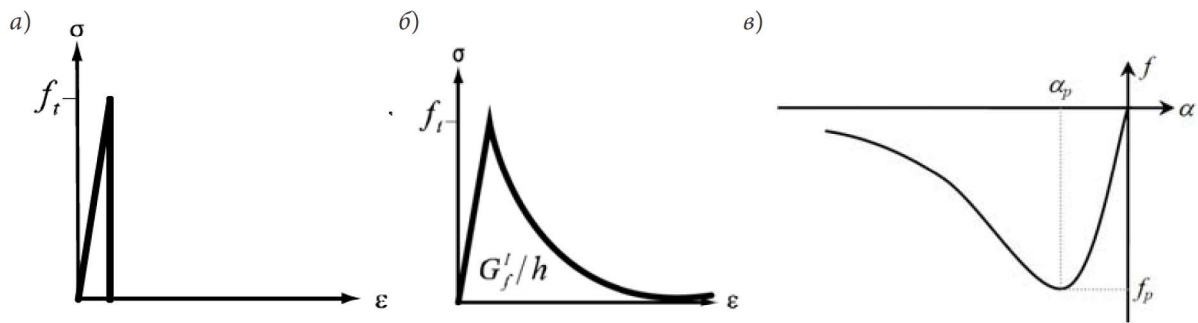


Рис. 3. Принятые диаграммы деформирования кладки при растяжении в CSC-модели (а), CDP-модели (б) и при сжатии (в)

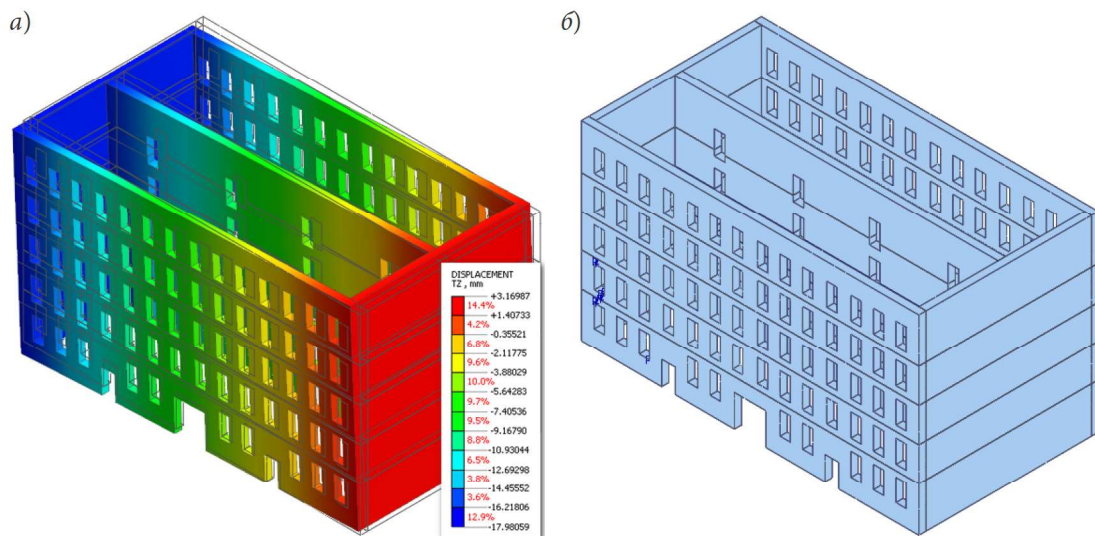


Рис. 4. Случай 0. Влияние внешнего воздействия на здание без учета истории деформирования: а — дополнительные осадки; б — зоны образования трещин

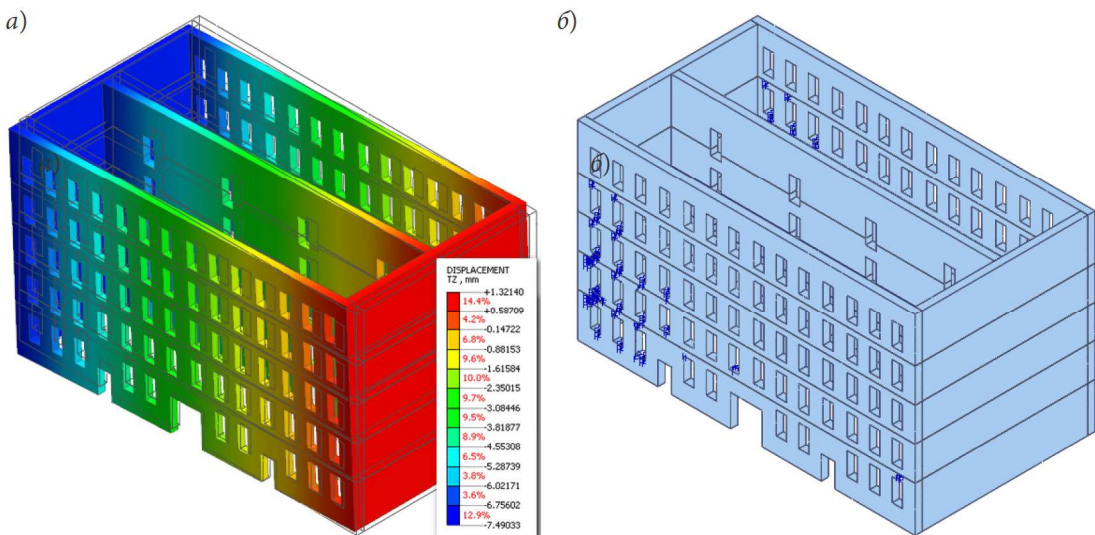


Рис. 5. Влияние внешнего воздействия на здание с учетом накопленных незначительных деформаций: а — дополнительные осадки, накопленные до рассматриваемого (на рис. 4, а) воздействия; б — зоны образования трещин

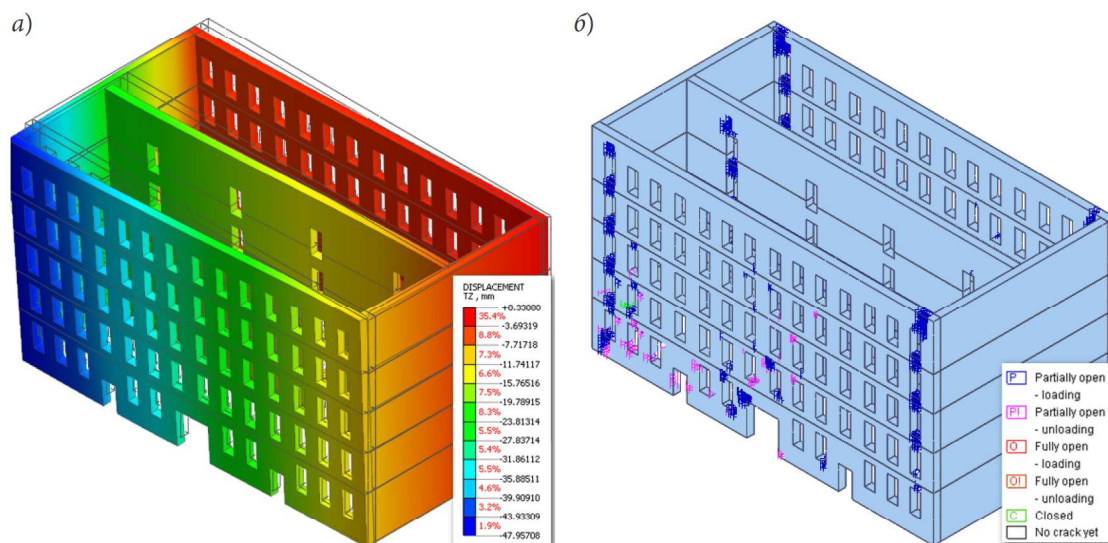


Рис. 6. Влияние внешнего воздействия на здание с учетом накопленных существенных деформаций: а — дополнительные осадки, накопленные до рассматриваемого (на рис. 4, а) воздействия; б — зоны образования трещин

ляется введение трещин с помощью так называемых интерфейсов. На рис. 7 видно, что наличие исходных трещин приводит к перераспределению деформаций — падению в местах расположения интерфейсов и росту в других локальных областях, что также доказывает важность учета начальных повреждений.

Для иллюстрации значимости выбора нелинейной модели выполнены совместные расчеты в идентичных условиях. Изменению подлежала только модель надземных кон-

струкций. По результатам расчетов максимальная дополнительная осадка здания составила 36 мм при относительной разности осадок 0,0036, что превышает нормативные предельно допустимые значения (рис. 8).

Для возможности сопоставления результатов по различным моделям выбран универсальный критерий — главные растягивающие деформации. Из работ [18–20] известно, что возникновение трещин в каменной кладке происходит при относительной деформации, равной 0,0005–0,00075. На рис. 9

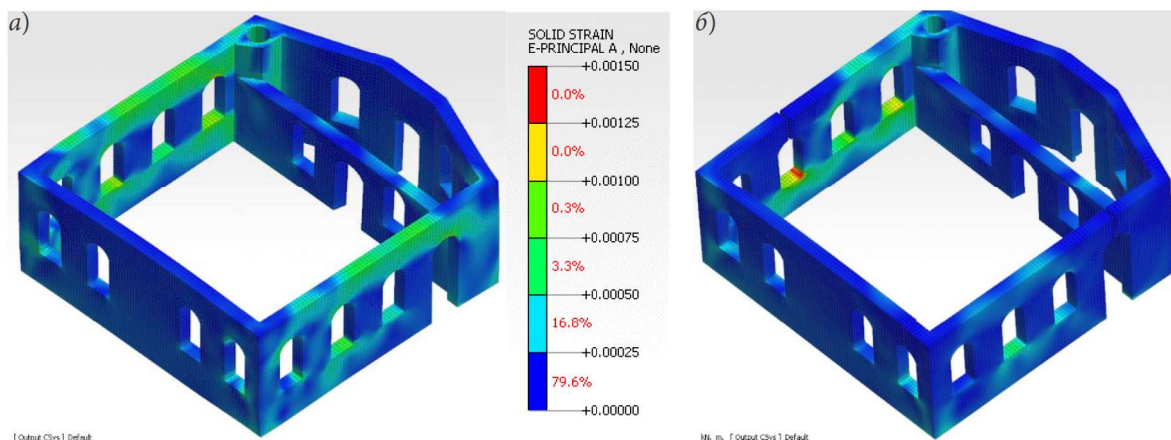


Рис. 7. Распределение главных деформаций растяжения: а — без учета интерфейсов/трещин; б — с учетом трещин

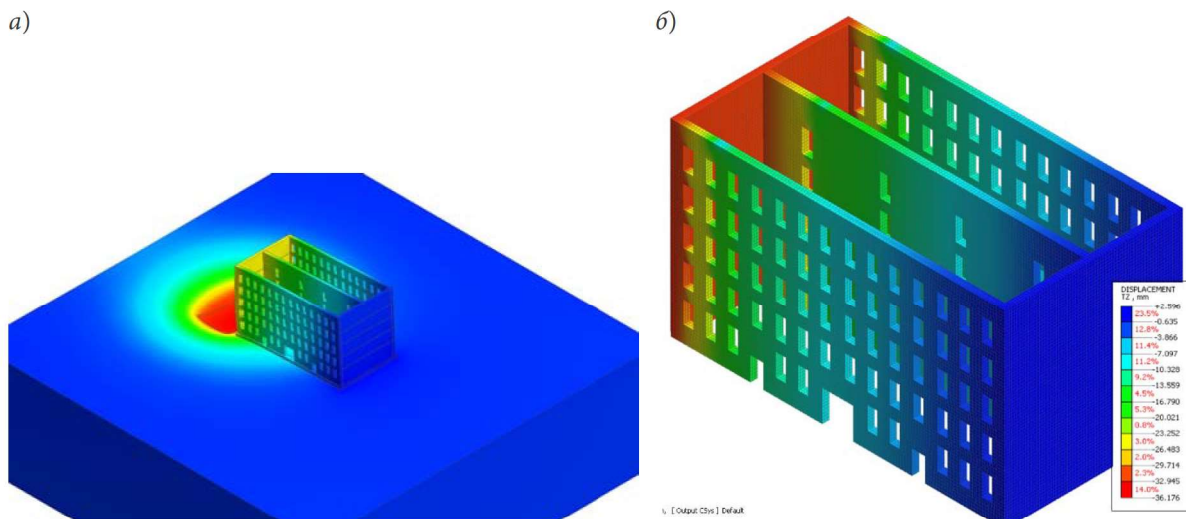


Рис. 8. Вертикальные осадки всей расчетной модели (а) и здания отдельно (б)

видно, что в зависимости от выбранной модели меняются зоны локализации трещин: в упругой модели трещины вообще не возникают, а в упруго-хрупкой повреждения затронули обширные области. Отсюда следует вывод, что необходимо подобрать для исторических зданий наиболее подходящую модель, а также достоверно определить ее параметры. То есть следует предъявлять особые требования к обследованию и испытаниям кладки, кирпича и раствора с целью получения более широкого набора параметров, необходимого для качественного моделирования. Важно отметить, что накопление базы данных детальных обследований с определением специальных параметров нелинейных моделей позволит в дальнейшем повысить точность расчетов.

Заключение

Для одновременного развития и сохранения исторической части города давно назрела необходимость широкого применения более универсального, нежели табличные/нормативные значения осадок, инструмента. В качестве такого инструмента, определяющего сохранность главного объекта — исторической застройки — следует применять совместный расчет взаимодействия здания и основания.

Используемые в настоящее время подходы основаны на предположении о линейно-упругом поведении каменной кладки, тогда как поведение этого материала является выражено нелинейным. Упругая модель не учитывает изменение жесткости и перераспределение напряжений при достижении предела прочности. Кроме того, накопленные повреждения зданий принято учитывать косвенно. Однако было показано, что исходное деформированное состояние здания существенно сказывается на величине допустимой дополнительной осадки. Совокупность перечисленных недостатков может привести к неверным выводам, что особенно опасно для объектов культурного наследия.

Для устранения указанных недостатков и более точной оценки состояния зданий предлагается моделировать нелинейные свойства не только основания, но и каменной кладки. Указанный подход позволит естественным образом с помощью теории пластичности и механики разрушения смоделировать исходное напряженно-деформированное состояние здания с учетом накопленных за длительную эксплуатацию деформаций/повреждений, спрогнозировать развитие и возникновение трещин при внешнем до-

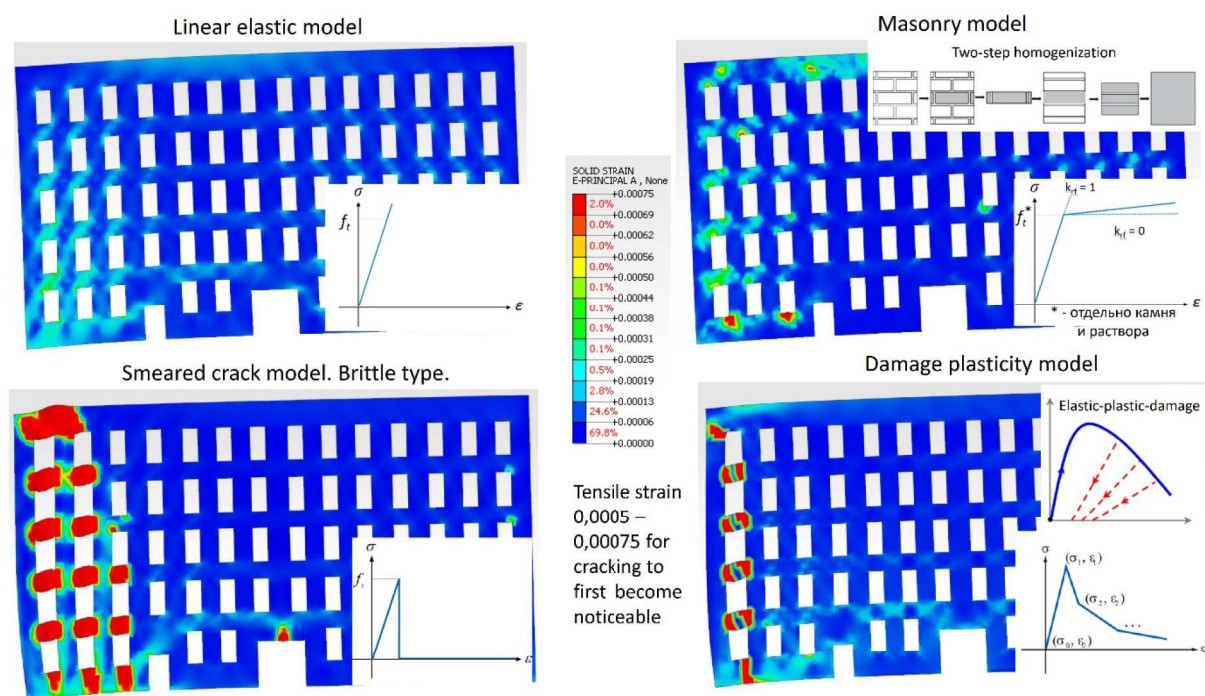


Рис. 9. Сопоставление результатов, полученных по нелинейным моделям каменной кладки

полнительном воздействии. Это позволит не только назначить индивидуальные граничные величины дополнительных деформаций для каждого конкретного здания по критерию недопущения возникновения/развития повреждений, но и определить такие деформации, при которых наступит исчерпание эксплуатационной надежности, а также несущей способности здания.

В то же время существует множество нелинейных моделей, и каждая из них может давать отличный друг от друга результат, поэтому необходимо выбрать наиболее подходящую для исторических каменных зданий модель и, более того, организовать комплекс лабораторных, полевых и численных экспериментов с верификацией результатов. Выполнение подобных исследований представляется обоснованным и необходимым, чтобы приблизиться к моделированию действительной работы каменных сооружений и обеспечить сохранность исторического облика города.

Библиографический список

1. Сотников С. Н., Симагин В. Г., Вершинин В. П. Проектирование и возведение фундаментов вблизи существующих сооружений (Опыт строительства в условиях Северо-Запада СССР). М.: Стройиздат, 1986. 96 с.
2. Улицкий В. М., Шашкин А. Г., Шашкин К. Г. Геотехническое сопровождение развития городов. СПб.: Стройиздат Северо-Запад; Группа компаний «Георе-конструкция», 2010. 551 с.
3. Ильичев В. А., Коновалов П. А., Никифорова Н. С. Влияние строительства заглубленных сооружений на существующую историческую застройку в Москве // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2001. № 4. С. 19–24.
4. Беляева Е. А., Дьяконов И. П. Проблемы проектирования и строительства новых зданий вблизи окружающей исторической застройки // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 1 (84). С. 76–82.
5. Улицкий В. М., Шашкин А. Г., Шашкин К. Г., Шашкин В. А. Основы совместных расчетов зданий и оснований. СПб.: Изд-во ин-та «Георе-конструкция», 2014. 328 с.
6. Васенин В. А., Шашкин А. Г. Вековые осадки зданий Санкт-Петербурга. СПб.: Изд-во ин-та «Георе-конструкция», 2022. 448 с.
7. Партон В. З. Механика разрушения. От теории к практике. М.: Наука, 1990. 240 с.

8. Орлович Р. Б. Повреждения и способы ремонта каменных конструкций. СПб.: Изд-во ин-та «Геореконструкция», 2023. 204 с.

9. Онищик Л. И. Прочность и устойчивость каменных конструкций. М.; Л.: ОНТИ. Глав. ред. строит. лит-ры, 1937. 292 с.

10. Dalgic K. H., Hendriks M., Ilki A., Broere W. A two-stage numerical analysis approach for the assessment of the settlement response of the pre-damaged historic Hoca Pasha Mosque // *International Journal of Architectural Heritage*. 2018. Vol. 13, № 5. Pp. 704–724.

11. Кашеварова Г. Г., Труфанов Н. А. Численное моделирование деформирования и разрушения системы «здание-фундамент-основание». Екатеринбург; Пермь: УрО РАН, 2005. 225 с.

12. Lourenço P. J. B. B. Computational strategies for masonry structures. PhD Dissertation. Delft: Delft University Press, 1996. 210 p. URL: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A4f5a2c6c-d5b7-4043-9d06-8c0b7b9f1f6f> (дата обращения 22.12.2023).

13. Ghiassi B., Milani G. (eds.). Numerical Modeling of Masonry and Historical Structures. 1st ed. Kidlington: Woodhead Publishing, 2019. 890 p.

14. Lofti H. R., Singh P. B. An appraisal of smeared crack models for masonry shear wall analysis // *Computer & Structures*. 1991. Vol. 41, № 3. Pp. 413–425.

15. Rots J. G. Numerical simulation of cracking in structural masonry // *Heron*. 1991. Vol. 36, № 2. Pp. 49–63.

16. D'Altri A. M., Sarhosis V., Milani G., Rots J., Cattari S., Lagomarsino S., Sacco E., Tralli A., Castellazzi G., de Miranda S. Modeling Strategies for the Computational Analysis of Unreinforced Masonry Structures: Review and Classification // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2020. Vol. 27, № 4. Pp. 1153–1185.

17. Almusaed A., Almssad A. Masonry for Sustainable Construction. London: IntechOpen, 2023. 122 p.

18. Токарь Р. А. О расчете оснований по деформациям // Тр. НИИОСП «Механика грунтов». Сб. № 30. Изд-во лит-ры по строительству и архитектуре. 1956. С. 5–38.

19. Burland J. B., Wroth C. P. Settlement of buildings and associated damage // *SOA Review. Conf. Settlement of Structures*, Cambridge, Pentech Press, London, April 1974. Pp. 611–654.

20. Son M., Cording E. J. Estimation of building damage in a 3D distorting structure to tunnel and underground excavation-induced ground movements // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020. Vol. 97 (3). 103222.

References

1. Sotnikov S. N., Simagin V. G., Vershinin V. P. *Proektirovanie i vozvedenie fundamentov vblizi sushchestvuyushchikh sooruzheniy (Opyt stroitel'stva v usloviyakh Severo-Zapada SSSR)* [Design and construction of building foundations near existing structures (Construction experience in the conditions of the North-West of the USSR)]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986, 96 p.

2. Ulitskiy V. M., Shashkin A. G., Shashkin K. G. *Geotekhnicheskoe soprovozhdenie razvitiya gorodov* [Geotechnical support of urban development]. St. Petersburg, Stroyizdat Severo-Zapad Publ.; Gruppа kompaniy «Georekonstruktsiya» Publ., 2010, 551 p.

3. Il'ichev V. A., Kononov P. A., Nikiforova N. S. *Vliyanie stroitel'stva zaglublennykh sooruzheniy na sushchestvuyushchuyu istoricheskuyu zastroyku v Moskve* [Influence of the construction of buried under the surface level structures on the existing historical development in Moscow]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, Foundations and Soil Mechanics*, 2001, no. 4, pp. 19–24.

4. Belyaeva E. A., D'yakonov I. P. *Problemy proektirovaniya i stroitel'stva novykh zdaniy vblizi okruzhayushchey istoricheskoy zastroyki* [Problems of design and construction of new buildings near the surrounding historical urban development]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2021, no. 1 (84), pp. 76–82.

5. Ulitskiy V. M., Shashkin A. G., Shashkin K. G., Shashkin V. A. *Osnovy sovместnykh raschetov zdaniy i osnovaniy* [Fundamentals of joint calculations of buildings and foundations]. St. Petersburg, Institut Georekonstruktsiya Publ., 2014, 328 p.

6. Vasenin V. A., Shashkin A. G. *Vekovye osadki zdaniy Sankt-Peterburga* [Centuries long settlement of buildings in St. Petersburg]. St. Petersburg, Institut Georekonstruktsiya Publ., 2022, 448 p.

7. Parton V. Z. *Mekhanika razrusheniya. Ot teorii k praktike* [Fracture mechanics. From theory to practice]. Moscow, Nauka Publ., 1990, 240 p.

8. Orlovich R. B. *Povrezhdeniya i sposoby remonta kamennykh konstruktsiy* [Fracture and methods of repair of stone structures]. St. Petersburg, Institut Georekonstruktsiya Publ., 2023, 204 p.

9. Onishchik L. I. *Prochnost' i ustoychivost' kamennykh konstruktsiy* [Strength and stability of stone structures]. Moscow, Leningrad, ONTI, Glav. red. stroit. lit-ry Publ., 1937, 292 p.

10. Dalgic K. H., Hendriks M., Ilki A., Broere W. Two-stage numerical analysis approach for the assessment of the settlement response of the pre-damaged historic Hoca Pasha Mosque. *International Journal of Architectural Heritage*, 2018, vol. 3, no. 5, pp. 704–724.

11. Kashevarova G. G., Trufanov N. A. *Chislennoe modelirovanie deformirovaniya i razrusheniya sistemy «zdanie-fundament-osnovanie»* [Numerical modeling of deformation and fracture of the “building–foundation–base” system]. Ekaterinburg, Perm, UrO RAN Publ., 2005, 22 p.
12. Lourenço P. J. B. B. Computational strategies for masonry structures. PhD Dissertation. Delft, Delft University Press Publ., 1996, 210 p. Available at: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A4f5a2c6c-d5b7-4043-9d06-8c0b7b9f1f6f> (accessed: 22.12.2023).
13. Ghiassi B., Milani G. (eds.). *Numerical Modeling of Masonry and Historical Structures*. 1st ed. Kidlington: Woodhead Publ., 2019, 890 p.
14. Lofti H. R., Singh P. B. An appraisal of smeared crack models for masonry shear wall analysis. *Computer & Structures*, 1991, vol. 41, no. 3, pp. 413–425.
15. Rots J. G. Numerical simulation of cracking in structural masonry. *Heron.*, 1991, vol. 36, no. 2, pp. 49–63.
16. D’Altri A. M., et al. Modeling Strategies for the Computational Analysis of Unreinforced Masonry Structures: Review and Classification. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2020, vol. 27, no. 4, pp. 1153–1185.
17. Almusaed A., Almssad A. *Masonry for Sustainable Construction*. London, IntechOpen Publ., 2023, 122 p.
18. Tokar’ R. A. *O raschete osnovaniy po deformatsiyam* [About calculation of bases regarding the settlement]. *Trudy NIIOSP «Mekhanika gruntov»* [Proceedings of the NIIOSP “Mechanics of Soils”]. Iss. 30. Lit-ra po stroitel’stvu i arkhitekture Publ., 1956, pp. 5–38.
19. Burland J. B., Wroth C. P. Settlement of buildings and associated damage. *SOA Review. Conf. Settlement of Structures*, Cambridge, Pentech Press Publ., London, April 1974, pp. 611–654.
20. Son M., Cording E. J. Estimation of building damage in a 3D distorting structure to tunnel and underground excavation-induced ground movements. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, vol. 97 (3), pp. 103222.