

УДК 624.012

Г.Г. Кашеварова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА УЧЕТА СТАТИСТИЧЕСКОГО РАЗБРОСА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Предлагается алгоритм учета разброса физико-механических свойств материалов, который включен в проблемно-ориентированную программу AnSysBuildingBlock (ASBB), предназначенную для автоматизации процесса создания программного кода на языке APDL для программного комплекса ANSYS. Рассмотрен пример расчета модели диафрагмы кирпичной кладки с учетом разброса свойств материала в сравнении с результатами эксперимента.

Ключевые слова: алгоритм, программа, статистический разброс механических свойств материала, кирпичная кладка, модель диафрагмы.

В соответствии с ГОСТ 27.002–89 «при проектировании строительных сооружений и конструкций в явной или неявной форме должен учитываться *статистический разброс механических свойств материалов*, элементов и соединений, а также изменчивость (во времени и в пространстве) параметров, характеризующих внешние нагрузки и воздействия». Однако нормативного документа, определяющего порядок учета статистического разброса механических свойств при проектировании зданий и сооружений, не существует. Поэтому для любой строительной конструкции традиционно используются усредненные механические свойства материалов, и при выполнении расчетов зданий и сооружений на разнообразные внешние воздействия принимается некий идеализированный материал однородного состава, значения физико-механических свойств которого являются детерминированными.

Это приемлемо для металлических конструкций, для которых статистический разброс механических свойств материалов чаще всего не велик. Но в каменных кладках и бетонных конструкциях механические свойства могут значительно отличаться в разных частях конструкции. Это может быть вызвано монтажными погрешностями, укладочными условиями (часть кирпичной кладки укладывалась в теплое время года, другая – в холодных условиях), человеческим фактором (некачественная, небрежная работа строителей), самой структурой ма-

териала и производственными условиями (часть конструкций может подвергаться агрессивному воздействию среды), а также другими факторами.

Случайный характер механических свойств материалов наглядно проявляется при испытаниях конструкций, даже при абсолютно точном выполнении всех установленных технических требований. Данный фактор порождает явление *неопределенности* – как недоступность всей необходимой информации по рассчитываемой конструкции, так и ее неполноту (точно узнать физико-механические свойства сооружения и основания в любой точке практически невозможно).

Обычно возможные отклонения физико-механических свойств материала от нормы учитываются в СНиПах системой нормируемых коэффициентов надежности, поэтому при расчетах строительных конструкций господствует вера в то, что узаконенная нормами система коэффициентов надежности обеспечивает если не безопасность самого объекта, то безопасность исполнителя в тех случаях, когда произошли какие-нибудь отказы или аварийные явления.

В настоящее время в практике проектирования объектов строительства широко применяются численные методы и современные программные комплексы (SCAD Office, Lira, MicroFE, ANSYS и др.), которые позволяют выполнить расчет намного детальнее и точнее, чем это предусматривается нормативными документами. Но при этом ни в одном из программных комплексов не предусматривается учет разброса физико-механических свойств материала, имеющих случайный характер, т.е. материал с детерминированными характеристиками считается однородным по всей конструкции. Параметры расчетной модели, которыми оперирует исследователь, практически всегда являются величинами неточными, случайными, и, принимая то или иное значение, мы имеем дело с некоторой реализацией такой случайности [1].

В данной работе сделана попытка учесть разброс свойств материалов конструкций и использовать это при расчете зданий и сооружений в программе ANSYS. ANSYS имеет встроенный язык параметрического проектирования – APDL, который расширяет возможности программы за пределы традиционного конечно-элементного анализа и позволяет управлять вводом исходной информации, в том числе и свойствами материала. Это является существенным достоинством этого программного комплекса.

Разработаны алгоритм и проблемно-ориентированная программа *ANSYSBuildingBlock* (ASBB), предназначенная для автоматизации процесса создания программного кода на языке параметрического проектирования APDL и для эффективного проведения вычислительных экспериментов по исследованию несущей способности строительных конструкций. Подробное описание этой программы представлено в работе [2]. Программа разработана на профессиональном языке программирования Microsoft Visual Basic, работает в среде Microsoft Windows и является отдельным приложением Windows; имеет собственный GUI (интерфейс пользователя), предназначенный для специалистов строительного профиля. На ANSYSBuildingBlock получено свидетельство Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Программа ASBB имеет встроенную функцию учета разброса физико-механических свойств материалов, которую можно включить для следующих характеристик: плотности материала, модуля упругости и коэффициента Пуассона. Эта функция реализована в виде модуля – макроса на языке APDL, в котором разработаны и реализованы следующие алгоритм и методика учета разброса свойств материалов.

1. Пользователем задается усредненное значение механического свойства материала (Z_{cp}), как правило, взятое из нормативных документов или ГОСТов.

2. Активируется опция разброса механических свойств для конкретного свойства материала (рис. 1). Опцию можно включить для всех свойств сразу.

Рис. 1. Опция учета разброса механических свойств материала (знак #) в диалоге формирования материалов и задание V_{max}

3. Задается коэффициент вариации – максимального разброса свойств – V_{\max} , в %, определенный либо экспериментальным путем, либо в соответствии с рекомендациями СНиПов о коэффициентах запаса по материалу, который в дальнейшем можно изменить.

4. На этапе формирования расчетной модели в последние строки препроцессорного цикла программного кода на языке APDL автоматически вносятся дополнительные строки для модификации материалов. При этом включается датчик случайных чисел и для каждого конечного элемента (КЭ) материала, которому задавался разброс свойств.

5. Создается *потомственный* материал с новыми свойствами, отличными от родительского материала, с разбросом, не превышающим

V_{\max} . По формуле $V_{\max} = \frac{|Z_{\text{cp}} \pm Z_i|}{Z_{\text{cp}}} \cdot 100\%$ автоматически определяются

фактические значения свойства Z_i , которые будут присвоены i -м конечным элементам расчетной модели, и обрабатываются все КЭ, принадлежащие одному и тому же материалу трехмерной модели. В итоге получаем разнородный материал со случайной структурой, с механическими свойствами, не превышающими заданные пределы значений в большую и меньшую стороны по отдельным конечным элементам.

Значение V_{\max} рекомендуется принимать в пределах от 0 до 30 %. Это в первую очередь связано с непредсказуемым разбросом свойств материала при очень больших значениях V_{\max} . В соответствии с законами математической статистики и теории вероятности картина распределения значений свойств потомственных материалов будет выглядеть приблизительно так, как изображено на рис. 2.

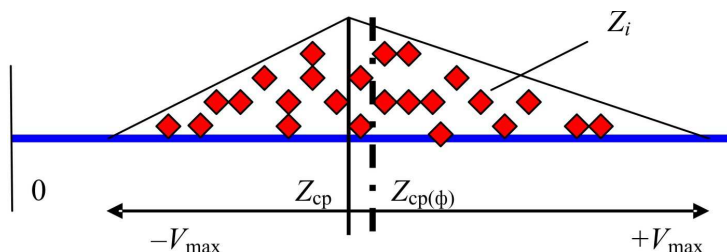


Рис. 2. Картина распределения значений свойств

Как наглядно видно из рис. 2, среднее фактическое значение свойства $Z_{\text{cp}(ф)}$, как среднее значение всех Z_i , не совпадает с усредненным значением, заданным изначально, и имеет относительную по-

грешность, которая при увеличении значения V_{\max} также увеличивается. Это может привести к ошибочным результатам при больших значениях V_{\max} . Данный эффект вызван непосредственным влиянием абсолютного нуля в меньших значениях, так как коэффициент $-V_{\max}$, являющийся результатом соотношений значений, не может создать отрицательное значение, а верхний предел значений фактически ничем не ограничен. Таким образом, при значениях V_{\max} больше 30 % $Z_{\text{ср}(\phi)}$ начинает заметно отличаться от $Z_{\text{ср}}$.

Ниже (рис. 3) приведен пример расчета кирпичной диафрагмы, соответствующей одной из моделей натурального эксперимента, проведенного австралийскими учеными для определения предельной прочности кирпичных стен и схем их разрушения (рис. 4) [3].

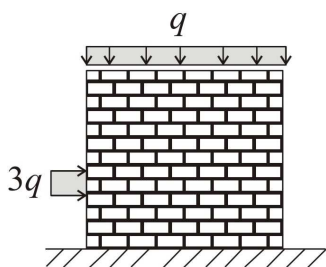


Рис. 3. Фрагмент кирпичной стены (диафрагма), испытывающий двухосное напряженное состояние

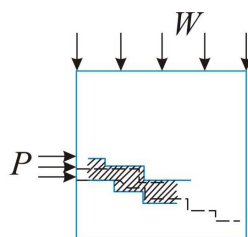



Рис. 4. Схема образования трещин в образцах каменной кладки при отношении плеча сдвига к ширине стены 0,34: --- механизм разрушения, полученный экспериментально;  – зона разрушения, полученная расчетным путем [5]

Размеры кирпичной диафрагмы – 2500×2500×120 мм; отношение плеча сдвига к ширине стены составляет 0,34. Модуль упругости кирпича и раствора приняты соответственно 7×10^3 МПа и $1,02 \times 10^2$ МПа; коэффициенты Пуассона для кирпича и раствора 0,3 и 0,22; плотность кирпича и раствора 2200 и 2000 кг/м³.

Исследовалось влияние разброса механических свойств раствора кирпичной кладки на напряженно-деформированное состояние и процесс разрушения конструкции. Численное решение задачи разрушения модели кирпичной кладки проводилось методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS. Учитывалась неоднородность материала, границы конечных элементов располагались

на границах разделов «раствор – кирпич». При решении использовались объемные конечные элементы (SOLID65) в виде прямоугольного параллелепипеда.

Механическое поведение упруго-хрупкого материала кирпичной кладки описывалось с использованием математической модели [4–7], учитывающей накопление структурных повреждений и деформационное разупрочнение, т.е. коэффициенты жесткости C_{ijkl} в определяющих соотношениях при появлении трещин изменялись скачком.

Учитывались разные виды повреждений (растрескивание и раскрашивание) для бесконечно малого элемента среды. При этом принимались следующие гипотезы: материал кирпича и раствора в кирпичной кладке изначально считается изотропным линейно упругим, а при появлении трещин становится ортотропным; трещины возникают в кирпичной кладке только в плоскостях, ортогональных глобальной декартовой системе координат (ДСК), так что оси ортотропии свойств при разрушении совпадают с ДСК. Появление «трещины» в плоскости, перпендикулярной одной из координатных осей x_i , приводит к падению жесткости материала в данном направлении. *Трещина* – это образование в бесконечно малом элементе среды *зоны со сниженными механическими характеристиками* в результате накопления повреждений. Для каждой трещины рассматривалось два состояния: трещина может быть *открыта* или *закрыта*.

Расчет проводился для 5 вариантов материала со случайным разбросом механических свойств раствора кирпичной кладки (в частности, модуля упругости) в пределах $V_{\max} = 30\%$. Как показали результаты расчета, картина распределения напряжений (рис. 5) для этих вариантов заметно отличается, хотя расположение зоны максимальных напряжений во всех вариантах соответствует полученной экспериментально.

Меняются также значения деформаций DX и DY и напряжений: SX и эквивалентных по Мизесу $SEQV$ (рис. 6). А это, в свою очередь, влияет на развитие системы трещин в конструкции при одних и тех же критических нагрузках (рис. 7): трещины могут более или менее активно распространяться по конструкции или вообще не появиться.

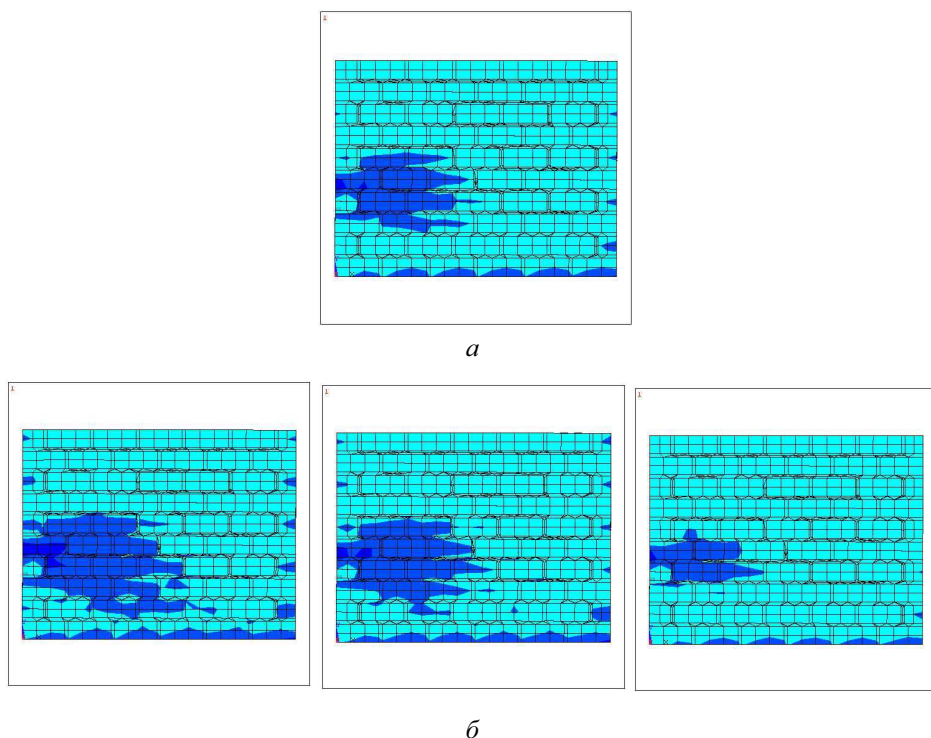


Рис. 5. Картина распределения напряжений по оси X : *a* – без применения функции разброса свойств; *б* – с применением функции разброса свойств – три варианта результатов

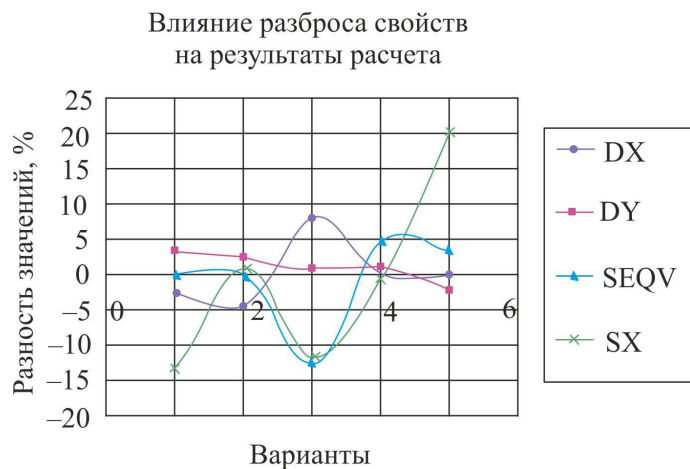


Рис. 6. Разница максимальных напряжений и деформаций для вариантов моделей с применением функции разброса свойств и модели с детерминированными характеристиками, %

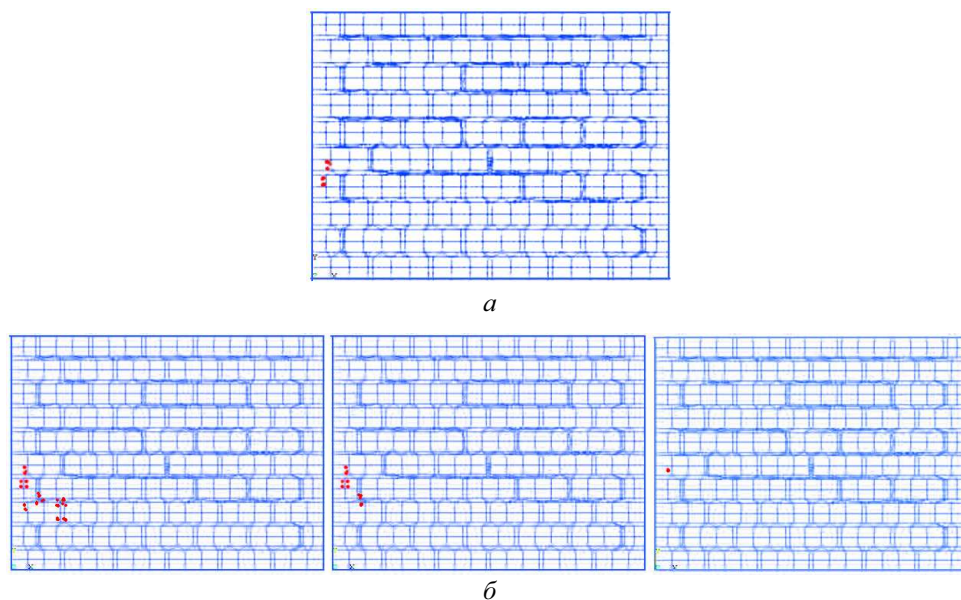


Рис. 7. Картина развития системы трещин: *a* – без применения функции разброса свойств; *б* – с применением функции разброса свойств – три варианта результатов

Таким образом, данный пример наглядно показал, что в каменных кладках случайный характер механических свойств материала оказывает влияние не только на величину напряжений, но и на характер разрушения, хотя возможная зона повреждений конструкции определяется однозначно.

Библиографический список

1. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – М.: ДМК Пресс, 2007.
2. Кашеварова Г.Г., Поварницын Д.А. Программа для строительного проектирования AnSysBuildingBlock (ASBB) – приложение к многоцелевому пакету ANSYS // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – Т. 2, № 7–2. – С. 25–27.
3. Samarasinghe W., Page A.W., Hendry A.W. A finite element model for the in-plane behaviour of brickwork // Proc. Inst. Civ. Eng. – 1982. – Vol. 73. – P. 171–178.
4. Кашеварова Г.Г., Труфанов Н.А. Численный анализ эффективных упругих свойств материала кирпичной кладки // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2005. – Т. 11, № 1. – С. 49–60.

5. Кашеварова Г.Г., Зобачева А.Ю. Моделирование процесса разрушения кирпичной кладки // Вестник ПГТУ. Строительство и архитектура. – Пермь, 2010. – № 1. – С. 106–116.

6. Кашеварова Г.Г., Зобачева А.Ю., Дубинский С.И. Моделирование процесса разрушения кирпичной кладки зданий в натурных и численных экспериментах // Строительная механика и расчет сооружений. – Пермь, 2010. – № 1. – С. 69–73.

7. Kashevarova G., Zobacheva A., Leschev I. Experimental and numerical modeling of the destroying of brick masonry for the analysis of buildings accident // Advanced Materials Research. – 2011. – Т. 250–253. – С. 3670–3673.

Получено 2.10.2012

G.G. Kashevarova

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE ALGORITHM THE STATISTICAL VARIATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS

In the paper we propose an algorithm taking into account the spread of physical and mechanical properties of materials, which is included in the problem-oriented program AnSysBuildingBlock (ASBB), designed to automate the creation of the code for the language APDL to software package ANSYS. The example of calculation model aperture brick considering the scatter of material properties in comparison with experimental results.

Keywords: algorithm, program, the statistical spread of material's mechanical properties, masonry, diaphragm.

Об авторах

Кашеварова Галина Геннадьевна (Пермь, Россия) – д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой «Строительная механика и вычислительные технологии» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (e-mail: ggk@pstu.ru).

About the authors

Kashevarova Galina Gennadyevna (Perm, Russia) – Doctor of Technics, Professor, Head of Department Mechanics and computational technologies, Perm National Research Polytechnic University (e-mail: ggk@pstu.ru).