

С учетом вышеизложенного, и особенно в случае окончательного перехода на четырехлетнее инженерное образование, следует констатировать, что единственно возможным вариантом выхода из данной ситуации является изучение студентами специальности ПГС всех основных строительных конструкций (металлических, деревянных, железобетонных) на единой методологической основе. Этому требованию в полной мере отвечают только нормы проектирования строительных конструкций, действовавшие в СССР и откорректированные к настоящему времени в Российской Федерации.

УДК 624.012+519.673

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СЖАТЫХ КАМЕННЫХ И АРМОКАМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ

ХАТКЕВИЧ А. М.

Полоцкий государственный университет
Полоцк, Беларусь

Введение. Сжатые элементы (столбы, простенки, фундаменты, пилоны и другие конструкции), изготовленные из каменной кладки, широко применяются в зданиях и сооружениях различного назначения. Процесс их проектирования включает идеализацию для получения данных о напряженно-деформированном состоянии и выполнения расчетов по предельным состояниям, которая отличается достаточно большим разнообразием. Известны модели кладки, в которых она представляется материалом со сложной композитной структурой, состоящим из кладочных элементов, заключенных в растворную матрицу; физико-механические характеристики камней и раствора резко отличаются между собой. Такие модели рассматривались в работах Н. К. Hilsdorf [1, 2], Pöschel и Sabha [3], В. В. Пангаева [4] и других. Расчет выполняется в том числе с применением метода конечных элементов, что пока не получило широкого распространения для практических целей из-за необходимости введения большого количества исходных данных (конечных элементов), сложности описания их взаимодействия в зоне контакта, необходимости наличия

специализированного программного обеспечения и т. п. К тому же к недостаткам данных моделей следует отнести невозможность учета многих случайных факторов, таких как: изменчивость геометрии кирпича и толщины швов, неплотность заполнения, усадка раствора в швах и другие технологические особенности.

В реальных каменных и армокаменных элементах, когда чередующиеся объемы однородного вещества значительно меньше размеров самой конструкции, при расчете напряженно-деформированного состояния применяется метод сечений с гомогенизацией (заменой неоднородной структуры каменной кладки на однородную изотропную либо анизотропную с осредненными физико-механическими характеристиками). Физико-механические характеристики зависят от многих факторов (характера и направления приложения усилий, технологических особенностей каменной кладки, свойств материалов) и устанавливаются опытным путем либо по аналитическим зависимостям, построенным по результатам физического эксперимента. Практика проектирования и эксплуатации зданий и сооружений подтверждает обоснованность применения такого подхода. Определение обобщенных характеристик кладки было выполнено рядом советских ученых, созданы нормы проектирования. Вначале были разработаны положения расчета каменных элементов по допускаемым напряжениям, а позже переработаны в метод расчета по разрушающим усилиям и предельным состояниям. В направлении разработки критериев разрушения кладки как однородного материала, в том числе и с учетом диаграмм деформирования, известны работы Г.Г. Кашеваровой [5; 6], Г.А. Гениева [7; 8], А.В. Раге [9], В. Lishak [10] и других.

Методика расчета сопротивления сжатию с учетом физической нелинейности. В [11–14] при расчете сжатых элементов каменная кладка рассматривается как однородный с осредненными физико-механическими характеристиками материал. Применяя метод сечений, сопротивление сжатию, соответствующее прочности каменного элемента в предельной стадии, находится из уравнений равновесия внутренних и внешних усилий. При этом фактически криволинейная эпюра напряжения в сжатой зоне сечения (рис. 1, а) в предельной стадии заменяется на укороченную прямоугольную (рис. 1, б, в).

Данное упрощение в виде замены криволинейной эпюры на прямоугольную вызвано отсутствием методики, позволяющей учесть фактическое распределение напряжений.

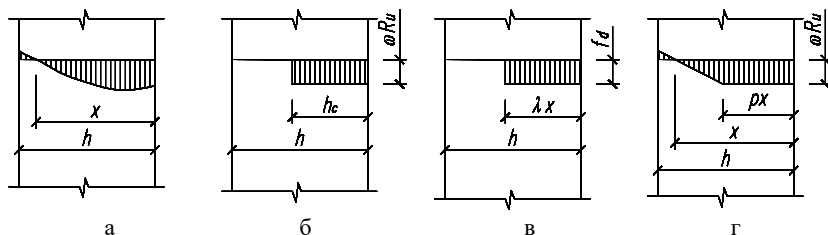


Рис. 1. Распределение нормальных напряжений в поперечном сечении: условное фактическое (а); идеализированное по [11, 12] (б); идеализированное по [13, 14] (в); идеализированное по [15] (г)

На рис. 1 введены следующие обозначения: h – высота сечения в плоскости эксцентриситета; x – фактическая высота сжатой зоны; h_c – высота сжатой зоны сечения по [11; 12]; λx – высота сжатой зоны сечения по [13, 14]; p – число пластичности; R_u – предел прочности кладки [11]; w – коэффициент, учитывающий величину эксцентриситета; f_d – сопротивление кладки сжатию по [13, 14].

Общими положениями расчета сжатых элементов в EN 1996-1-1-2008 (Еврокод 6), ТКП 45-5.03-308-2017 является соблюдение гипотезы плоских сечений, учет диаграмм деформирования, вводятся ограничения на величину предельных относительных деформаций соответственно материалу, рис. 2. Сущность предлагаемой методики заключается в рассмотрении сечения сжатого каменного или армокаменного элемента в виде совокупности k элементарных площадок (слоев) с площадью A_{mi} , и n продольных стержней с площадью A_{sj} в пределах которых напряжения считаются равномерно распределенными.

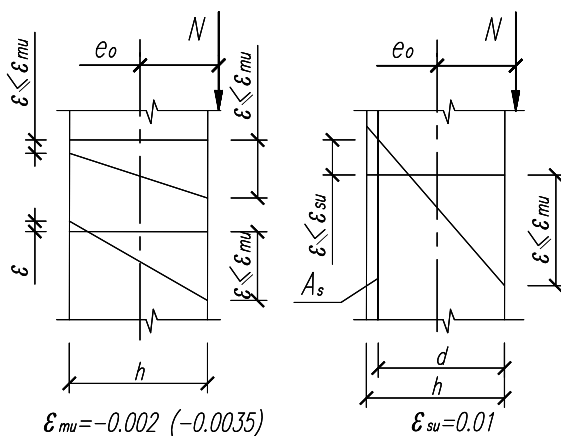


Рис. 2. Ограничение относительных деформаций для каменной кладки и арматуры по [13, 14]

Методика расчета позволяет рассчитывать параметры напряженно-деформированного состояния нормальных к продольной оси сечений сжатых каменных и армокаменных элементов на любой стадии нагружения, основана на учете физической нелинейности в виде диаграмм деформирования кладки и арматуры; она рассматривалась в работах [16; 17; 18]. Расчет параметров сечений производится из следующих условий: равновесия усилий; соблюдения гипотезы плоских сечений; учета диаграмм деформирования кладки и арматуры. Алгоритм определения параметров напряженно-деформированного состояния, нормального к продольной оси сечения от заданной величины усилия предусматривает итерационный процесс вычисления относительных деформаций и напряжений в элементарных площадках (слоях). Если напряжения в растянутой зоне элементарной площадки (слоя) превышают предельные значения, то это свидетельствует об образовании трещины. Учет их наличия выполняется принятием в последующих расчетах нулевой жесткости такой площадки (слоя).

Критерием окончания процесса последовательных приближений является заданная точность вычисления деформационных параметров на смежных итерациях.

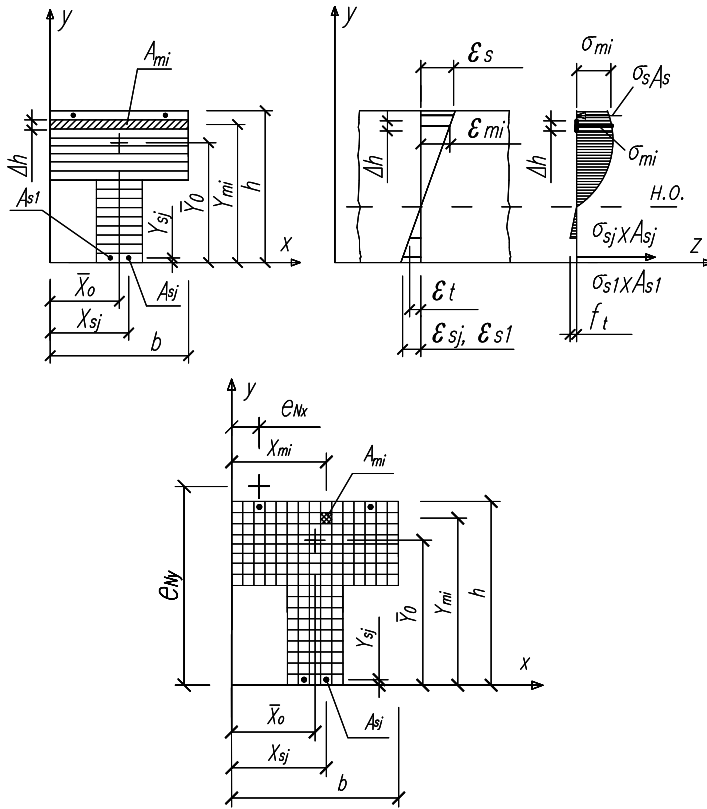


Рис. 3. Расчетная схема нормального к продольной оси сечения, разбиение на элементарные слои либо площадки

Алгоритм определения сопротивления сжатию в предельной стадии (прочности сечения) предусматривает пошаговый метод последовательных нагружений с итерационным процессом вычислений относительных деформаций и напряжений в элементарных площадках на каждом шаге до заданной точности вычисления деформационных параметров. За прочность сечения в предельной стадии рекомендуется принимать максимальное усилие от нагрузки, при котором сходится процесс последовательных приближений в виде уравнений равновесия:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum N = 0 \\ \sum Mx = 0 \\ \sum My = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^k \sigma_{mi} A_{mi} + \sum_{j=1}^n \sigma_{sj} A_{sj} - N = 0; \\ \sum_{i=1}^k \sigma_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0) + \sum_{j=1}^n \sigma_{sj} A_{sj} (x_{sj} - x_0) - N \cdot e_x = 0; \\ \sum_{i=1}^k \sigma_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0) + \sum_{j=1}^n \sigma_{sj} A_{sj} (y_{sj} - y_0) - N \cdot e_y = 0. \end{array} \right.$$

Применение данной методики расчета позволяет выявить истинное напряженно-деформированное состояния сечений, состоящих из материалов с разными физико-механическими характеристиками, учет которых в настоящее время основан на применении эмпирических правил и коэффициентов. Так, например, прочность кладки в комплексных элементах с железобетоном уменьшается введением постоянного, не зависящего от объемного соотношения кладки и железобетона, коэффициента 0,85; в комплексных и внецентренно сжатых армокаменных элементах вводятся ограничения по проценту продольного армирования, к расчетному сопротивлению арматуры вводятся коэффициенты условий работы. Указанные мероприятия необходимы для учета неполного использования прочностных свойств кладки и арматуры, вызванного разными деформационными свойствами составляющих сечение сжатого элемента материалов. К тому же существующие методики расчета рассматривают лишь одну стадию работы – стадию разрушения, не позволяя оценить напряженно-деформированное состояние сжатых элементов на других стадиях.

Предлагаемая методика реализована в программном комплексе «Вета» (разработка д.т.н. Д. Н. Лазовского и к.т.н. Д. О. Глухова), позволяет учитывать истинные деформационные свойства составляющих сечение материалов, позволяет выявить неполное использование прочностных свойств арматуры, каменной кладки и проводить расчеты без введения эмпирических коэффициентов. Для проверки методики была сформирована выборка из экспериментально испытанных каменных и армокаменных элементов в количестве 84 шт. В выборку включены четыре группы элементов – каменные, армокаменные с продольным армированием, армокаменные с поперечным армированием, комплексные элементы из каменной кладки

и железобетона. Сравнивая рассчитанные параметры напряженно-деформированного состояния сечений, включая сопротивление сжатию в предельной стадии по прочности, с экспериментальными, установлена их хорошая сходимость, что позволяет рекомендовать применение разработанной методики.

Заключение. Предлагаемая методика расчета сопротивления сжатию, основанная на положениях общей деформационной модели, позволяет определять параметры напряженно-деформированного состояния нормальных к продольной оси сечений каменных и армокаменных элементов на любом этапе нагружения, учитывая при этом физическую нелинейность деформирования исходных материалов (каменной кладки, арматуры, бетона и другие).

За критерий разрушения в предельной стадии предлагается принимать максимальное усилие от внешней нагрузки, при котором сходятся уравнения равновесия, благодаря чему исключается необходимость нормирования параметра предельной сжимаемости, появляется возможность учета полного перераспределения усилий в сечении каменных и армокаменных элементов, состоящих из двух и более материалов с различными физико-механическими характеристиками, в т.ч. усиленных в процессе эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hilsdorf, H.K. Investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression / H.K. Hilsdorf // Designing, engineering and constructing with masonry products. Gulf Publishing Company. – 1969. – P. 34–41.

2. Flohrer, C. Strength and Deformation Characteristics of Masonry with Fiber Reinforced Mortar Joints / C. Flohrer, H.K. Hilsdorf // Proceedings of the Fifth International Brick Masonry Conference, Washington, D.C., U.S.A., October 5–10, 1979 / Brick Institute of America.

3. Pöschel, G. Ein theoretisches Modell zum Tragverhalten von Elbsandsteinmauerwerk / G. Pöschel, A. Sabha // In: Wenzel F. (ed.) Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke. – 1996. – SFB 315. – P. 111–118.

4. Пангаев, В.В. Развитие расчетно-экспериментальных методов исследования прочности кладки каменных конструкций : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01 / В.В. Пангаев ; Новосиб. гос. архитектурно-строительный ун-т (Сибстрин). – Новосибирск, 2009. – 35 с.

5. Кашеварова, Г.Г. Натурные и численные эксперименты, направленные на построение зависимости напряжения от деформации кирпичной кладки / Г.Г. Кашеварова, М.Л. Иванов // Приволж. науч. вестн. – 2012. – № 8 (12). – С. 10–15.

6. Кашеварова, Г.Г. Моделирование процесса разрушения кирпичной кладки / Г.Г. Кашеварова, А.Ю. Зобачева // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Строительство и архитектура. – 2010. – № 1. – С. 106–116.

7. Гениев, Г.А. О критериях прочности ортотропного материала типа каменной кладки при плоском напряженном состоянии / Г.А. Гениев, А.Н. Воронов // Труды ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Исследование и методы расчета строительных конструкций. – 1985. – С. 94–101.

8. Гениев, Г.А. О критерии прочности каменной кладки при плоском напряженном состоянии / Г.А. Гениев // Строительная механика и расчет сооружений. – 1979. – № 2. – С. 7–11.

9. Page A.W. The biaxial compressive strength of brick masonry / A.W. Page // Proceedings of Institution of Civil Engineers, Part 2. – 1981. – Vol. 71, Sept. – P. 893–906.

10. Lishak V.I. 2-D Orthotropic failure criteria for masonry / V.I. Lishak, V.I. Yagust, D.Z. Yankelevsky // Engineering Structures. – 2007. – № 36. – P. 360–371.

11. Каменные и армокаменные конструкции : СНиП II-22-81*. – Введ. 31.11.81. – М. : Стройиздат, 1983. – 40 с.

12. Пособие по проектированию каменных и армокаменных конструкций (к СНиП II-22-81) : утв. 15.08.1985. – М. : (ЦИТП) Госстроя СССР, 1989. – 149 с.

13. Еврокод 6. Проектирование каменных конструкций. Ч. 1-1 : Общие правила для армированных и неармированных конструкций : СТБ EN 1996-1-1-2008. – Введ. 1.07.2009. – Минск : Госстандарт, 2009. – 128 с.

14. Каменные и армокаменные конструкции. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-5.03-308-2017 (33020). – Введ. 01.01.2018. – Минск.: Минстройархитектуры, 2017. – 112 с.

15. Беленцов, Ю.А. Усиление каменных стен и простенков с учетом упругопластической работы каменной кладки реконструируемых жилых зданий : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Ю.А. Беленцов ; Петерб. гос. ун-т путей сообщения. – СПб., 2001. – 24 с.

16. Хаткевич, А.М. Метод расчета прочности нормальных к продольной оси сечений конструкций из каменной кладки с учетом диаграмм деформирования / А.М. Хаткевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2014. – № 8. – С. 45–53.

17. Глухов Д.О. Метод расчета прочности сжатых каменных элементов по сечениям, нормальным к продольной оси / Д.О. Глухов, А. М. Хаткевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2016. – № 8. – С. 73–79.

18. Лазовский Д. Н. Расчет сопротивления сжатию каменных и армокаменных элементов с учетом физической нелинейности / Д. Н. Лазовский, А. М. Хаткевич // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. Ф. – 2017. – № 16. – С. 41–50.

УДК 691.328.43

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ИЗГИБАЕМЫХ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СО СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРОЙ

ХОТЬКО А. А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Существующие нормы и рекомендации по расчету конструкций с композитной арматурой в большинстве случаев являются модификацией норм по расчету железобетонных конструкций со стальной арматурой. Отличия методик связаны с назначением расчетных характеристик композитной арматуры, а также некоторых эмпирических соотношений, основанных на опытных данных.

Общим для всех норм является принцип расчета конструкций по методу предельных состояний (по прочности и по пригодности к нормальной эксплуатации). Основное отличие существующих нормативных документов в области расчета конструкций с композитной арматурой заключается в принципах обеспечения надежности. Для европейских норм и рекомендаций [5], [6], [7] надежность расчетов обеспечивается с помощью частных коэффициентов