

Экспертиза и технология усиления каменных конструкций

*Д.т.н., профессор В.В. Белов**

ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет;

*к.т.н., заместитель директора филиала В.Н. Деркач***

РУП «БелНИИС»

Одним из наиболее распространенных видов повреждений построек из камня является их растрескивание. Наиболее частыми причинами, вызывающими образование трещин в каменных конструкциях, по статистике являются [1]:

- неравномерные осадки оснований (65-75%);
- перегрузка конструкций (10-15%);
- температурные деформации (10-15%);
- влажностные деформации (5-8%);
- особые нагрузки и воздействия (2-5%).

В последнее десятилетие появились новые технологии кладочных работ, позволяющие при высоком качестве кладочных элементов возводить кладку на тонких растворных швах. Благодаря этому уменьшаются мостики холода, которыми являются растворные швы, снижается расход раствора, увеличивается производительность труда, а прочность кладки на сжатие возрастает. Однако такие кладки имеют и весьма существенные недостатки. Обладая более высокой однородностью по сравнению с кладками на обычных растворных швах, они по своим свойствам приближаются к неармированному бетону (в случае применения в качестве кладочных элементов полнотелых блоков из газосиликата, пенобетона или керамзитобетона). Ситуация усугубляется, когда кладка возводится из пустотных щелевых камней, особенно керамических с высоким (50% и выше) объемом пустот. Высокотехнологичные, экономичные и эффективные с точки зрения тепловых и акустических свойств, стеновые конструкции с применением данных кладок, к сожалению, имеют низкую трещиностойкость, а в случае использования их в качестве наружного стенового заполнения каркасных зданий – высокую чувствительность к перекосам. Так, например, за минувшие пять лет в Москве и Подмосковье было зафиксировано более 420 случаев отказа фасадных систем каркасных зданий [2]. По итогам обследования каркасно-монолитных зданий в Москве в 2008 г. в результате повреждений стенового ограждения в аварийном состоянии на сегодняшний день находятся 36 объектов. Специалисты считают, что в ближайшие 5-6 лет количество «проблемных» домов может резко возрасти.

Методы мониторинга каменных зданий

Основной целью обследования зданий и сооружений является получение информации, необходимой для оценки технического состояния и несущей способности строительных конструкций. От степени достоверности полученной информации зависит правильность выводов о пригодности конструкций к эксплуатации, а также эффективность проектных решений по их ремонту и усилению.

В случае возникновения трещин в каменных конструкциях, прежде всего, должна быть установлена динамика их развития во времени. Эта задача решается путем мониторинга выявленных трещин. В отечественной практике для этой цели чаще всего используются гипсовые, цементно-песчаные или стеклянные маяки, реже – устанавливаются индикаторы перемещений часового типа. В зарубежной практике обследования зданий мониторинг трещин проводится с использованием механических, индукционных, пьезоэлектрических и других датчиков. Первые из перечисленных, являющихся наиболее дешевыми и простыми, работают по принципу штангенциркуля (рис. 1).

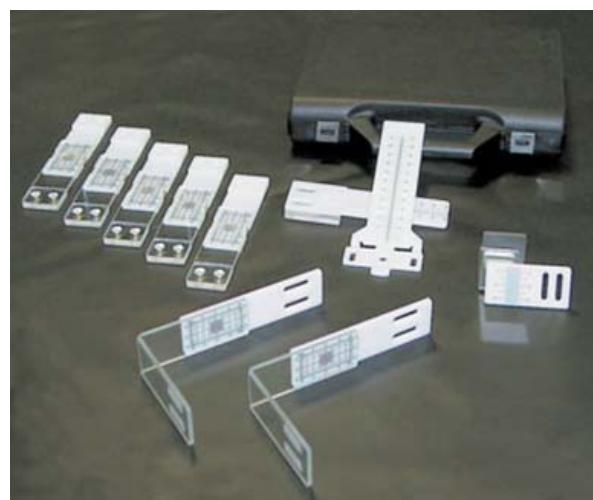


Рисунок 1. Измерители ширины раскрытия трещин из поликарбоната

Данные датчики позволяют измерить не только ширину раскрытия трещин, но и взаимный сдвиг их берегов. На рис. 2 приведены схемы установки датчиков, в зависимости от вида выполняемых измерений.

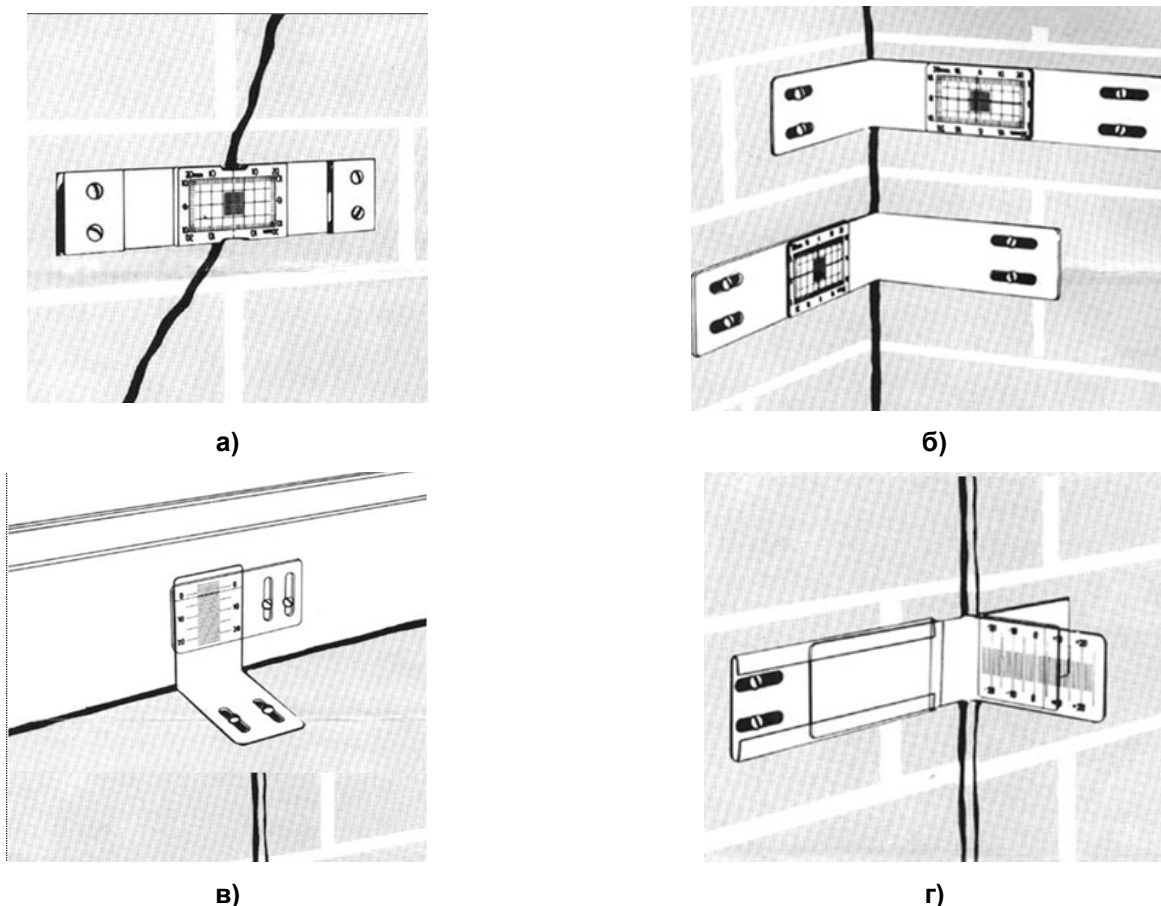


Рисунок 2. Возможные схемы установки измерителей трещин:
 а – трещина в плоскости стены; б – трещина в месте сопряжения стен;
 в – горизонтальная трещина; г – измерение сдвига берегов трещины

Достоинствами таких датчиков являются простота закрепления их на поверхности конструкции без повреждения отделки, возможность длительного непрерывного мониторинга жизнедеятельности трещин, возможность снятия отсчетов с удаленных объектов, в том числе фотографическим методом.

Широкое распространение при мониторинге трещин получил метод фотограмметрии. Суть его заключается в периодической съемке обследуемого объекта цифровой камерой с высокой разрешающей способностью матрицы и дальнейшей компьютерной расшифровкой полученных фотографий. Ширина раскрытия трещин определяется по изменению числа растровых точек между ее берегами.

Для определения глубины и длины развития трещин в толще стены широко используется тепловизионная техника. При этом производится оценка теплотехнического состояния поврежденной трещинами конструкции, по которой можно судить, является исследуемая трещина поверхностной или сквозной. Данная методика хорошо зарекомендовала себя при поиске скрытых каналов в стенах зданий старой постройки.

Наблюдая за поведением трещин, параллельно необходимо отслеживать температуру и влажность окружающего воздуха, вести геодезический мониторинг сооружения и оснований фундаментов.

Для каменных конструкций одной из важнейших характеристик, по которой производится оценка их эксплуатационной пригодности, является прочность каменной кладки при сжатии. В отечественной практике для приближенной оценки прочности кирпича и раствора в кладке при обследовании строительных конструкций чаще применяются приборы неразрушающего контроля, принцип действия которых основан на методе ударного импульса. В частности, для определения прочности раствора и строительной керамики используется измеритель прочности бетона ИПС-МГ4.01 с энергией удара 0.16 Нм. Практика обследования показала, что точность определения прочностных показателей кладочных материалов при сжатии по этой методике неудовлетворительна. Методом ударного импульса оцениваются прочностные показатели камня и раствора приповерхностных участков кладки, тогда как по толщине конструкции показатели могут существенно отличаться. Поэтому данный метод неразрушающего контроля рекомендуется использовать только для качественной оценки прочностных показателей кладочных элементов и раствора.

Для количественной оценки прочности кирпича и раствора служат разрушающие испытания отобранных из каменной кладки образцов [3]. Отбор образцов, как правило, производится из незагруженных (под окнами, в проемах) или слабо нагруженных элементов. Испытания кирпича выполняются по стандартной методике на сжатие и изгиб (рис. 3). Из пластинок раствора, отобранных из горизонтальных швов кладки, готовятся кубики с размером ребра 2-4см, которые испытываются на сжатие.

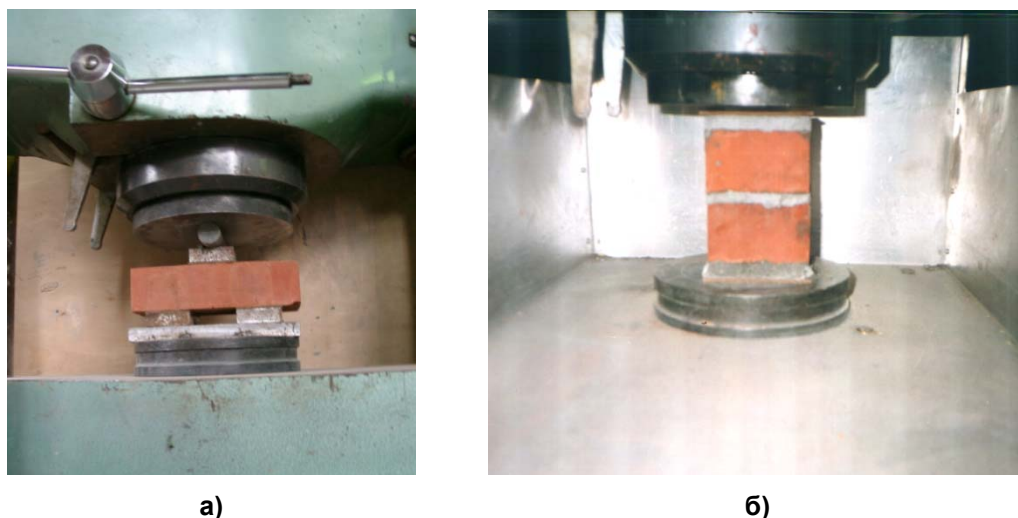


Рисунок 3. Испытания кирпича керамического: а – на изгиб, б – на сжатие

Достоверность оценки прочности каменной кладки по результатам испытаний, отобранных из конструкции образцов кладочных элементов и раствора недостаточна. Это обусловлено высоким коэффициентом вариации прочностных показателей кладочных элементов. Так, по данным работы [4], средняя прочность кирпича на сжатие и растяжение практически удовлетворяла требованиям стандартов. Однако коэффициент вариации прочности кирпича на сжатие составил 30-40%, на растяжение – около 40%. Вычисления показали, что прочность кирпича при нормируемых обеспеченностях (0.95-0.995) до 30-40% ниже средних ее значений на сжатие и до 40-50% – на растяжение [4].

Существенным недостатком разрушающего метода является то, что при отборе образцов кирпича и раствора происходит нарушение структуры кладки. Как следствие, не учитывается такой важный показатель как качество выполнения кладочных работ, или, другими словами, «рука каменщика».

В зарубежной практике обследования для определения фактической прочности кладки, как правило, используются разрушающие методы или методы ее частичного разрушения [5].

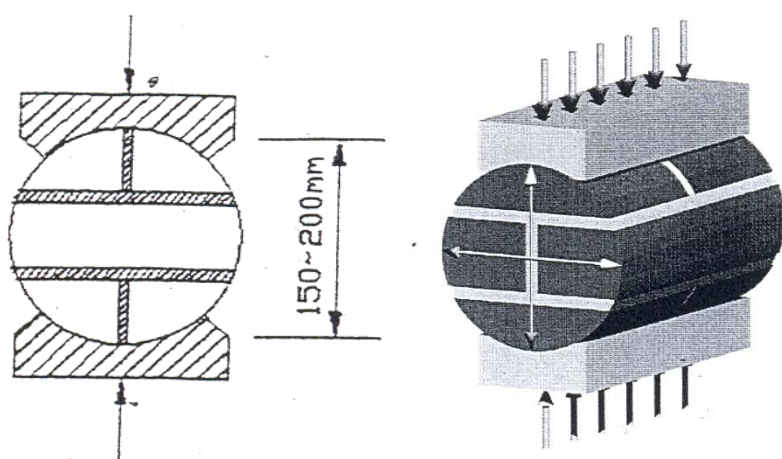


Рисунок 4. Схема испытаний образцов кладки на сжатие

Одним из этих методов является метод определения прочности кладки при сжатии на образцах – цилиндрах диаметром 150–200мм, отобранных из тела конструкции. Отбор цилиндров производится с помощью специальных буров, при этом в образцах сохраняется структура кладки. Испытания образцов кладки производят по схеме, показанной на рис. 4.

Данный метод оценки прочности кладки при сжатии преимущественно используется для кладок из полнотелого кирпича на прочном растворе. При растворах низкой прочности или пустотном кирпиче возникают сложности с отбором образцов кладки для испытаний.

Наиболее достоверные данные о прочности кладки при сжатии дает метод испытаний непосредственно в конструкции с помощью плоского пресса (Flat-Jack-Tests) (рис. 5). Плоские плиты пресса (плоские домкраты) устанавливаются в предварительно прорезанные в кладке конструкции горизонтальные щели шириной 20 мм (рис. 6, а). Сжатию подвергается участок кладки с ненарушенной структурой высотой 400–500мм (рис. 6, б). В ходе испытаний определяются не только прочностные, но и деформационные характеристики кладки. Нагружение кладки может производиться до определенного уровня напряжений или до полного исчерпания ее несущей способности. Соппротивление кладки сжатию S_f определяется по формуле:

$$S_t = K_f \cdot K_a \cdot P_f, (1)$$

где K_f и K_a – коэффициенты, учитывающие сдерживающее влияние плит пресса и прилегающей к разрезу кладки < 1 ;
 P_f – разрушающее давление, создаваемое прессом.

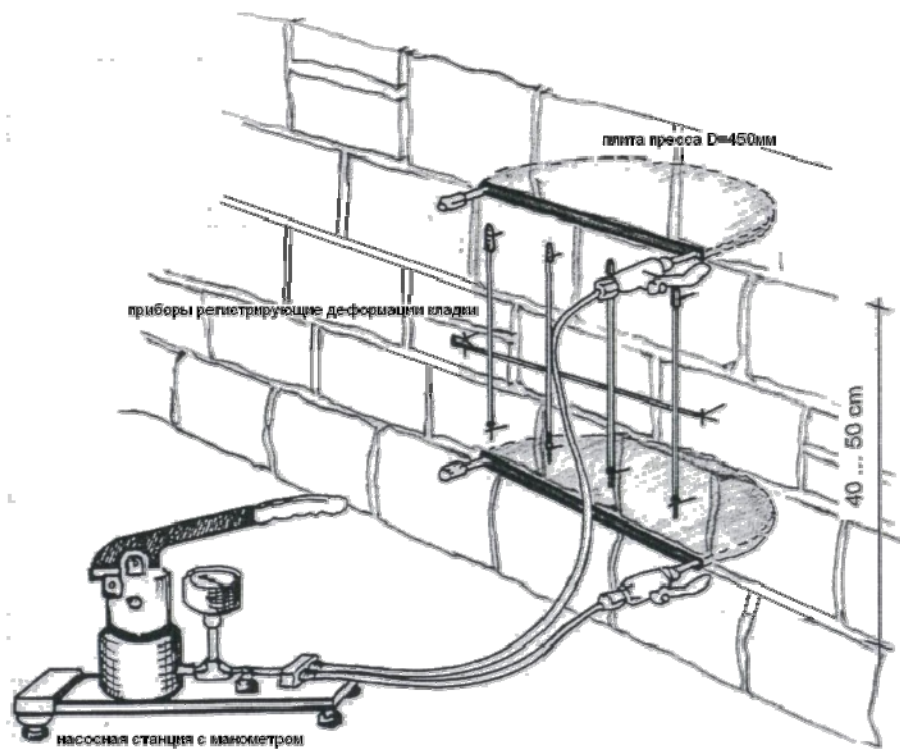
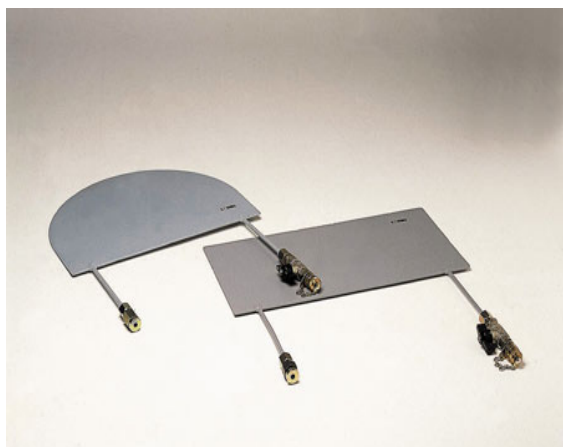


Рисунок 5. Схема испытаний каменной кладки методом «Flat-Jack-Tests»



а)



б)

Рисунок 6. Оборудование для испытаний каменной кладки методом «Flat-Jack-Tests»: а – плоские домкраты, б – насосная станция и измерители деформаций

Инновационные методы ремонта и усиления каменных конструкций

Среди традиционных способов усиления каменных конструкций наибольшее распространение получили стальные и железобетонные обоймы, металлические пояса и накладки, перекладка кладки и др. Большинство из них трудоемки в реализации, дорогостоящи, а применительно к историческим зданиям некоторые из них вовсе неприменимы по эстетическим соображениям. Вследствие этого для ремонта и усиления каменных конструкций все большее применение получают новые технологии и материалы. К последним, в частности, относятся композиты в виде ламелей, матов и сеток, изготавливаемые из углеродных, арамидных и

стекловолокон [6]. Их прочность зачастую превышает прочность стали, в связи с чем они используются для усиления не только каменных, но железобетонных и даже металлических конструкций в качестве поверхностного армирования. Соединение таких материалов с усиливаемой конструкцией обычно осуществляется с помощью составов на основе эпоксидной смолы. Коммерческое название такой системы усиления за рубежом известно как FRP (Fibre Reinforced Polymers). Эта система, однако, обладает рядом недостатков:

- для надежного сцепления материала усиления с конструкцией поверхность последней должна быть сухой и выровненной;
- работы по усилению должны осуществляться при положительных температурах и нормальной влажности воздуха для отверждения клея, а его низкая живучесть требует быстроты приклеивания;
- клеевое соединение обладает низкой огнестойкостью, поскольку деструкция эпоксидного клея начинается при температуре 50-100°C;
- учитывая органическое происхождение эпоксидных клеев, соединения с их помощью обладают низкой долговечностью из-за их строения;
- технология приклеивания на эпоксидном клее является вредной для здоровья;
- усиление должно выполняться высококвалифицированными рабочими и специализированными фирмами.

Отмеченных недостатков удается избежать при использовании вместо клея специальных штукатурных растворов из неорганических минеральных материалов с модифицированными полимерными добавками. Технология усиления при этом заключается в следующем. На очищенную от штукатурки и загрязнений поверхность каменной кладки после ее увлажнения наносится слой клеящего штукатурного раствора толщиной 3 мм, в который утапливается армирующая сетка из композиционных материалов. Затем наносится защитный штукатурный слой толщиной 8-10мм, поверхность которого подвергается финишной обработке. При необходимости, в защитный слой может утапливаться вторая сетка, обеспечивающая повышенную прочность усиления.

Такая система усиления известна за рубежом как FRCM (Fibre Reinforced Cementitious Matrix), а одной из ее разновидностей является система Ruredilx Mech. В указанной системе используются сетки из углеволокон, обладающие следующими механическими характеристиками: прочность на растяжение – 4800 МПа; модуль упругости – 240 ГПа; деформативность при разрыве – 1.8%. Рассматриваемая система обладает следующими достоинствами:

- простотой технологии;
- высокой сцепляемостью армирующего штукатурного слоя с поверхностью усиливаемой каменной кладки;
- высокой компатибельностью армирующего слоя с кирпичной кладкой, т.е. сближенными деформационными характеристиками (модули упругости, коэффициенты температурного расширения);
- высокой огнестойкостью и коррозионной стойкостью, паропроницаемостью и водостойкостью, что позволяет производить усиление каменных конструкций как изнутри, так и снаружи зданий.



а)



б)

Рисунок 7. Усиление поврежденных кирпичных сводов (а) и арочных конструкций (б) исторических зданий

К достоинствам рассматриваемого способа усиления следует отнести его универсальность и возможность применения для любых форм и очертаний усиливаемых конструкций (рис. 7).

В зарубежной практике рассматриваемый метод нашел широкое применение для усиления каменных зданий и сооружений, подвергаемых динамическим воздействиям (сейсмическим, техногенной вибрации).

Другим не менее эффективным методом усиления каменных конструкций, широко распространенным в странах Европы на протяжении последних 15 лет, является усиление с использованием спиралевидных связей и анкерных соединений. В Республике Польша данный метод усиления каменных конструкций применяется с 1999 г. и известен под названием «Brutt Technologies». Он основан на применении спиралевидных стержней «Brutt profiili», утапливаемых в специальный раствор «Brutt Saver Powder». Раствор укладывается в предварительно прорезанные в швах кладки щели или просверленные в ее теле отверстия. Спиралевидные связи изготавливаются из высокопрочной нержавеющей стали, устойчивы в щелочной среде. Наиболее часто в практике усиления каменных конструкций применяются связи диаметром 6, 8 и 10 мм. В необходимых случаях могут применяться и связи большего диаметра 12–14 мм. Длина связей может достигать 10 м. Связи можно укладывать с нахлестом, изгибать, соединять с помощью вязальной проволоки. Использование данного вида усиления позволяет устранить практически все распространенные виды конструктивных дефектов каменных конструкций, нанося минимальные повреждения внешнему облику последних.

На рисунках 8–9 показаны примеры усиления стен и каменных сводов, поврежденных трещинами.



Рисунок 8. Усиление наружных стен, поврежденных трещинами



Рисунок 9. Усиление кирпичных сводов

Спиралевидное ребро позволяет также производить установку связей методом забивания или вкручивания в материал основания при помощи ручного электроинструмента со специальной установочной насадкой-адаптером. В основание из ячеистого бетона и пустотелого кирпича связи устанавливаются при помощи химических анкеров. Спиралевидная связь дает возможность производить закрепления практически в любых строительных материалах, при минимальных расстояниях от края конструкции и осями креплений.

По мнению специалистов, метод усиления с помощью спиралевидных связей позволяет решать задачи сохранения оригинального внешнего облика зданий старой застройки, его можно использовать как одно из новейших инновационных средств усиления кирпичной облицовки в многослойных стенах [7].

Поскольку материалы, используемые в рассматриваемых методах усиления, имеют достаточно высокую стоимость, эффективность их применения должна быть обоснована соответствующим расчетом. Армирующие элементы должны размещаться так, чтобы их направления (волокна сеток или спиралевидные связи) были перпендикулярны трещинам либо, при отсутствии последних, совпадали с траекторией главных растягивающих напряжений. Для правильной оценки напряженно-деформированного состояния каменной кладки полезным является многоуровневый (иерархический) подход при ее математическом моделировании:

- а) камень, раствор;
- б) малый представительный элемент каменной кладки, для которого должны быть построены зависимости «нагрузка-перемещение»;
- в) характерные отдельные фрагменты каменной конструкции (столб, перемышка, свод и т.д.);
- г) каменная конструкция в целом.

При этом необходимо обеспечить инженерную доступность моделей на каждом уровне и практическую возможность их применения при проектировании и экспертизе.

Литература

1. Серов А., Орлович Р., Морозов И. Мониторинг трещин в каменных зданиях: современные методы // Архитектура, дизайн и строительство, Санкт-Петербург. – 2009. – №1[41]. – С. 62-63.
2. Слоистые кладки в каркасно-монолитном строительстве // Технологии строительства. – 2009. – 1(63).
3. Рекомендации по обследованию и оценке технического состояния крупнопанельных и каменных зданий / ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко. – М., 1988. – 57с.
4. Райзер В.Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций. – М. : АСВ. – 1995. – 344с.
5. Деркач В.Н., Жерносек Н.М. Методы оценки прочности каменной кладки, в отечественной и зарубежной практике обследования зданий и сооружений// Вестник Белорусско-Российского университета. – 2010.- №3. – С. 135-143.
6. Орлович Р., Мантегацца Д., Найчук А., Деркач В. Современные способы ремонта и усиление каменных конструкций // Архитектура, дизайн и строительство, Санкт-Петербург. – 2010. – №1[44]. – С. 86-87.
7. Павлова М., Моськина О., Пыхяла Я. Выполнено из кирпича // Строительный эксперт. – 2009. – №11(224). – С. 10-11.

** Вячеслав Вячеславович Белов, Санкт-Петербург
Тел. раб.: +7(812)535-16-32; эл. почта: belov@cef.spbstu.ru*

*** Валерий Николаевич Деркач, г. Брест, республика Беларусь
Тел. моб.: +3(752-96)41-19-62; эл. почта: v-derkatch@yandex.ru*