



УДК 69.058 (075.8)

Р.А. Галимшин, А.З. Манапов, А.А. Абдюшев

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ БАШНИ “СЮЮМБИКЕ” КАЗАНСКОГО КРЕМЛЯ

Башня Сююмбике построена неизвестными мастерами в конце 17 - начале 18 веков. Начиная с 19 века признается архитектурным шедевром и копируется при создании других шедевров архитектуры, таких как: Казанский вокзал в Москве, Русский павильон на Всемирной выставке 1990 г. в Париже. В 20 веке становится главным символом города Казани.

Надземная часть башни высотой 58 метров выполнена в кирпичной кладке из глиняного кирпича на известковом растворе. Кирпич, использованный в кладке, глиняный, пластического формования, хорошо обожженный и сильнообоженный, на звук звонкий. Размеры и форма кирпича в виде параллелепипеда и фигур с параллельными горизонтальными поверхностями, близки к итальянским. Раствор кладки известковый, ярко-белый, без признаков желтизны. Система перевязки кладки близка к крестовой. В кладке башни использована система тяжей из кованого железа. Кладка 1-4 ярусов массивная, с толщиной стен от 1450 до 5000 мм. В этой части башни основной нагрузкой и одновременно силой, обеспечивающей связность кладки, является собственный вес кладки. Кладка 5 яруса среднemasивная, а 6 и 7 ярусов тонкостенная, с толщиной стенки кладки до 400 мм. Шпилевая часть башни высотой 9150 мм имеет сложную конструктивную схему. Стержневым несущим элементом шпилевой части башни является вертикальная деревянная мачта из бревна диаметром 270 мм, у основания заделанная в кирпичную кладку 7 яруса. Вокруг деревянной мачты выполнена кладка из кирпича, армированная тремя железными стержнями сечением 32*52 мм. Состояние древесины мачты в выступающей из кладки части удовлетворительное.

Фундамент башни выполнен из плоского бутового камня с заполнением из щебня и грунта. Глубина заложения фундамента неоднородна: от 1,2 м до 4,5 м. По непонятным причинам фундамент башни не соответствует критериям, применявшимся при строительстве каменных башен на рубеже 17-18 веков.

За время эксплуатации башня Сююмбике получила общие деформации и повреждения, такие, как крен башни; макротрещины в основном массиве кладки башни; макротрещины в выступающих частях кладки и в наружном слое

цокольной части; повреждения тяжей; выветривание раствора кладки; выветривание кирпичей кладки; отколы наружного слоя кладки; макротрещины в кладке.

Наружный слой кладки башни фрагментарно ремонтировался. Ремонт производился путем замены наружного слоя кладки в полкирпича на новый кирпич и нанесения растворного слоя. Кирпич, использованный для замены коренного, плохо обожженный, имеет значительно меньшую морозостойкость сравнительно с коренным. Раствор, использованный для ремонта, розового цвета, марка раствора низкая, адгезия к кирпичу кладки слабая.

Первые сведения об обнаружении крена башни относятся к 1910 году. В последующем наблюдения производились нерегулярно, различными организациями. В таблице 1 сведены все имеющиеся данные по наблюдениям за креном башни.

По имеющимся данным измерения крена можно сделать следующие обобщения:

- 1) средняя скорость приращения крена башни за полный период наблюдений между 1910-2003 годами составляет 8,65 мм/год;
- 2) максимальная скорость приращения крена по результатам наблюдений имела место между 1941 и 1946 годами по 36 мм/год и между 2001 и 2002 годами по 33 мм/год;
- 3) минимальная скорость приращения крена по результатам наблюдений имела место между 1910 и 1930 годами по 2 мм/год и между 1946 и 1957 - по 1 мм/год;
- 4) средняя скорость приращения крена после усиления буроинъекционными сваями между 1990 и 2003 годами составила 6,53 мм/год;
- 5) выполненные расчеты скорости приращения крена сделаны без учета погрешностей измерений, однако для длительных наблюдений достоверность результатов достаточно высокая;
- 6) просадка фундаментов башни и вызванный этим его крен могли произойти вследствие действия: просадки грунтов основания под фундаментом из-за значительного удельного давления на грунт до 8 кг/см²; деформаций сжатия и нарушений целостности самого фундамента, выполненного из плоского бутового камня с заполнением пустот щебнем и грунтом; общей подвижки холма, на котором расположена башня.



Таблица 1

Год наблюдения, организация выполнившая измерения, точка отсчета	Величина крена, мм	Приращение крена в мм/год
1910 г. Константиновский межевой институт. Точка отсчета - яблоко шпилья	1220	
1930 г. Московское эрогеодезическое предприятие. Точка отсчета -яблоко шпилья	1280	Между 1910 и 1930 годами по 2 мм/год
1941 г. Топограф Н.Н. Несмелов. Точка отсчета -яблоко шпилья	1460	Между 1930 и 1941 годами по 16 мм/год
20 апреля 1946 г. Точка отсчета - яблоко шпилья	1640	Между 1941 и 1946 годами по 36 мм/год
6 мая 1957 г. Точка отсчета - яблоко шпилья	1650	Между 1946 и 1957 годами по 1 мм/год
7 июня 1989 г. Казанский инженерно-строительный институт	1919 +-8	Между 1957 и 1989 годами по 8,7 мм/год
4 декабря 1990 г. Казанский инженерно-строительный институт	1940 +-10	Между 1989 и 1990 годами по 13 мм/год
Сентябрь 2001 г. Татинвестгражданпроект	1990	Между 1990 и 2001 годами по 5 мм/год
Декабрь 2003 г. Татинвестгражданпроект	2025 мм	Между 2001 и 2003 годами по 17 мм/год Между 1990 и 2003 годами средняя скорость приращения крена 6,53 мм/год

Наиболее известной из наклонных башен является Пизанская башня в Италии. Наклон Пизанской башни в 1992 году составлял 4,5 м при высоте башни 60 м. По результатам конкурса с значительным призовым фондом были отобраны наиболее приемлемые технические решения по усилению башни. К настоящему времени выполнены работы по усилению надземной части металлическим внутренним каркасом, усилен фундамент массивным железобетонным кольцом, выполнено

закрепление грунта основания цементным раствором. Из-под фундамента башни с северного направления, противоположного направлению наклона, маленькими объемами около 2 мешков в сутки произведена выемка грунта специальным механизмом, общим объемом 37 кубических метров. После производства этих работ измерения показали, что наклон башни стабилизировался, а затем постепенно башня выпрямилась на 40 см, что соответствует положению 1700 года.

Таблица 2

№	Место измерения прочности кирпича или раствора	Прочность кирпича или раствора на сжатие по показаниям склерометра (кгс/см ²)
1	1 ярус, кирпич	61,64,82,147
2	3 ярус, кирпич.	123,110,115,102,102,178,118,48,85,137
3	4 ярус, кирпич.	143,143,265,130,89,113
4	1 ярус, раствор	32,23

Для выполнения проверочных расчетов несущих конструкций башни Сююмбике определялись прочность на сжатие кирпичей и раствора при помощи электронного измерителя прочности ИПС-МГ4, результаты измерений приведены в таблице 2.

Расчетное сопротивление кладки башни с учетом результатов измерений прочности кирпичей и раствора принято равным 10 кгс/см².

Измерения натяжения тяжей кладки выполнялись частотным методом, результаты измерений приведены в таблице 3.



Таблица 3

Местоположение затяжки	Собственные частоты в вертикальной плоскости/горизонтальной плоскости (Гц)	Напряжение в затяжке (кгс/см ²)
3 ярус, направление север-юг, M=12,5кг/м, L=6,1 м, E=2*10 ¹¹ н/м ² , A= 0,0016м ² , q ₀ =0,07м	14,5/ 12	2400
3 ярус, направление запад-восток	14/ 12,5	2400
3 ярус, направление запад-восток	14/ 13	2400
4 ярус, направление север-юг M=12,5кг/м, L=5,3 м, E=2*10 ¹¹ н/м ² , A= 0,0016м ² , q ₀ =0,07м	16	2500
4 ярус, направление запад-восток	15	2400
4 ярус, направление запад-восток	16	2500

Расчет напряжений в кладке башни выполнен на базе пакета программ Сумрак. Расчетная модель башни представлена из 5064 конечных элементов изопараметрического параллелепипеда и 147 стержневых конечных элементов при 7565 узлах.

Выборка из результатов расчета представлена в таблице 4.

По результатам обследования и проверочных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Кирпичная кладка башни Сююмбике имеет повреждения в виде трещин, ширина раскрытия до 4мм. Трещины в кирпичной кладке башни возникли вследствие двух причин: первая причина - напряжения в толще кладки глобального характера, пронизывающие все тело башни и обусловленные действием собственного веса при существующем крене башни; вторая причина - местные напряжения, возникающие в периферийных выступающих областях кладки, например, около пилястр.

2. Расслоение наружного слоя кладки наиболее выражено в местах, где коренной кирпич был заменен на новый. При ремонте кладки с заменой кирпичей был использован кирпич низкого качества. Расслоение, выветривание и выкрашивание кирпичей и раствора имеет место на обширных площадях наружной поверхности кладки.

3. При ремонте наружных поверхностей кладки использовано в основном 4 технологии: при глубоких разрушениях замена кладки на новую на глубину 0,5 кирпича; при неглубоких повреждениях кладки ремонт с использованием цементного раствора и использованием раствора красного цвета; ремонт

горизонтальных поверхностей выполнен укладкой бетона на эти поверхности. Эффективным и качественным можно признать ремонт, выполненный с использованием цементного раствора, и ремонт горизонтальных поверхностей укладкой бетона. При ремонте кладки с заменой кирпичей был использован кирпич низкого качества, плохо обожженный, подверженный ускоренному расслоению и выветриванию. Раствор красного цвета, использованный для восстановления верхнего слоя кладки с прорисовкой на нем швов кладки, оказался недолговечным. В настоящее время этот раствор осыпается, стал рыхлым и потерял связность.

4. Усиление фундаментов башни буроинъекционными сваями оказало двоякое влияние на надземную кладку. С одной стороны, положительное - за счет замедления крена башни, с другой стороны, отрицательное - за счет местного повышения жесткости и перераспределения напряжений в кладке с их увеличением в кладке над сваями.

5. Наружные стальные обоймы по периметру 1 яруса повреждены и нуждаются в замене. Разрыв подарочной тяги на 1 ярусе необходимо устранить без применения сварки. У входа в башню имеется ниша, в которой в настоящее время находится электрощитовая. Угол башни с нишей в сочетании с местной концентрацией усилий над буроинъекционными сваями в настоящее время является одним из слабейших и критических участков в массиве башни.

6. Расчетное сопротивление кладки башни с учетом результатов измерений прочности кирпичей и раствора целесообразно принять равным 10 кгс/см².



7. Выполненный анализ результатов измерения крена башни показывает:

- средняя скорость приращения крена башни за полный период наблюдений между 1910-2003 годами

составляет 8,65 мм/год;

- максимальная скорость приращения крена по результатам наблюдений имела место между 1941 и

Таблица 4

Номер яруса	Наименование нагрузки	Минимальные напряжения (кгс/см ²)	Максимальные напряжения (кгс/см ²)
1 ярус	Собственный вес без учета наклона башни	-3,72	-7,42
	Собственный вес с учетом наклона башни	-3,03	-9,36
	Собственный вес с учетом наклона башни + ветровая нагрузка	-2,94	-9,59
2 ярус	Собственный вес без учета наклона башни	0	-2,88
	Собственный вес с учетом наклона башни	0	-3,17
	Собственный вес с учетом наклона башни + ветровая нагрузка	0	-3,26
3 ярус	Собственный вес без учета наклона башни	-0,93	-4,35
	Собственный вес с учетом наклона башни	-0,80	-4,65
	Собственный вес с учетом наклона башни + ветровая нагрузка	-0,74	-4,72
4 ярус	Собственный вес без учета наклона башни	-0,22	-2,92
	Собственный вес с учетом наклона башни	-0,24	-3,36
	Собственный вес с учетом наклона башни + ветровая нагрузка	-0,17	-3,58
5 ярус	Собственный вес без учета наклона башни	-0,64	-1,88
	Собственный вес с учетом наклона башни	-0,59	-2,19
	Собственный вес с учетом наклона башни + ветровая нагрузка	-0,57	-2,46
6 ярус	Собственный вес без учета наклона башни	-1,16	-1,35
	Собственный вес с учетом наклона башни	-0,97	-1,63
	Собственный вес с учетом наклона башни + ветровая нагрузка	-0,64	-2,09
Основание 7 яруса отм. 40.950	Собственный вес без учета наклона башни	-0,21	-1,11



6 ярус	Собственный вес без учета наклона башни	-1,16	-1,35
	Собственный вес с учетом наклона башни	-0,97	-1,63
	Собственный вес с учетом наклона башни + ветровая нагрузка	-0,64	-2,09
Основание 7 яруса отм. 40.950	Собственный вес без учета наклона башни	-0,21	-1,11
	Собственный вес с учетом наклона башни	-0,18	-1,26
	Собственный вес с учетом наклона башни + ветровая нагрузка	-0,12	-1,74
7 ярус отм. 2.600 Низ оконных проемов	Собственный вес без учета наклона башни	-0,42	-0,81
	Собственный вес с учетом наклона башни	-0,40	-0,89
	Собственный вес с учетом наклона башни + ветровая нагрузка	-0,41	-1,54
7ярус отм 45.650 верхняя отм. яруса	Собственный вес без учета наклона башни	-0,05	-0,38
	Собственный вес с учетом наклона башни	-0,06	-0,39
	Собственный вес с учетом наклона башни + ветровая нагрузка	0,00	-1,07

1946 годами по 36 мм/год и между 2001 и 2002 годами по 33 мм/год;

- минимальная скорость приращения крена по результатам наблюдений имела место между 1910 и 1930 годами по 2 мм/год и между 1946 и 1957 годами по 1 мм/год; - средняя скорость приращения крена после усиления буроинъекционными сваями между 1990 и 2003 годами составила 6,53 мм/год. Так как измерения крена производились различными приемами и с различной точностью, объективно достоверными следует признавать результаты только за длительный период наблюдений.

8. Просадка фундаментов башни и вызванный этим его крен могли произойти вследствие действия одной или нескольких причин: просадки грунтов основания под фундаментом из-за значительного удельного давления на грунт до 8 кг/см²; деформаций сжатия и нарушений целостности самого фундамента, выполненного из плоского бутового камня, с заполнением пустот щебнем и грунтом; общей подвижки холма, на котором расположена башня.

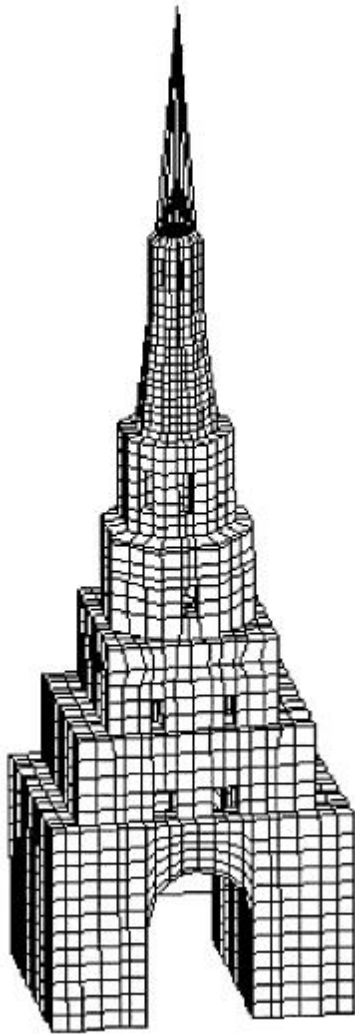
9. Максимальные напряжения сжатия в кладке у основания 1 яруса башни без учета наклона башни

составляют $S_c = -7,42$ кгс/см², для принятого

расчетного сопротивления на сжатие кладки $R=10$ кгс/см², коэффициент запаса прочности $K_{np}=1,34$. Максимальные напряжения сжатия в кладке у основания 1 яруса башни с учетом наклона башни составляют $= -9,36$ кгс/см², коэффициент запаса прочности $K_{np}=1,07$. Максимальные напряжения сжатия в кладке у основания 1 яруса, башни с учетом наклона башни и ветровой нагрузки составляют $= -9,59$ кгс/см², коэффициент запаса прочности $K_{np}=1,04$.

10. По результатам расчетов растягивающие напряжения имеют место в 7 ярусе башни $= +0,02$ кгс/см². Растягивающие напряжения возникают при совместном учете крена и ветровой нагрузки, наличие растягивающих напряжений в кладке башни является одним из признаков приближения к критическому состоянию.

11. При линейной интерполяции результатов расчета для принятого расчетного сопротивления на сжатие кладки $R=10$ кгс/см², без учета перераспределения напряжений от усиления фундаментов, при предположении разрушения от



напряжений сжатия основания 1 яруса критический уклон башни составляет 2453мм. С учетом концентрации напряжений в районе входной ниши и концентрации напряжений над буроинъекционными сваями существующее состояние башни можно признать критическим.

12. По результатам обследования и расчетов выявлены 3 критических участка в надземной кладке башни. Первый участок – угол 1 яруса у входа в башню. На этом участке имеют место максимальные напряжения сжатия, возникшие вследствие сочетания трех факторов. Первый фактор – максимальное увеличение напряжений сжатия от крена башни, второй фактор – наличие ослабляющей тело кладки ниши и третий фактор – концентрированная отпорность буроинъекционных свай. Второй критический участок расположен на 2 ярусе. Критичность этого участка возникла вследствие концентрации напряжений над и под оконными арками большого размера, расположенными в створе направления крена, и выражена в виде сквозных трещин. Третий критический участок – 7 ярус башни, наиболее подверженный воздействию растягивающих напряжений вследствие своей немассивности и отсутствия достаточного

пригруза вышерасположенными конструкциями.

13. По данным расчетов, нормальные напряжения сжатия на основании 1 яруса находятся в пределах 2,94-9,59 кгс/см². Учитывая, что фундамент башни своими контурами повторяет основание 1 яруса, есть основание считать, что нагрузки на основание фундамента близки к этим значениям.

14. Положительные растягивающие напряжения на отм. 12.05 представляют собой изгибные растягивающие напряжения от изгиба подоконной части арки от нагрузок, передаваемых по простенкам, и отпорных нагрузок от подоконной части кладки.

15. Для повышения надежности надземной кладки башни Сююмбике считаем целесообразным выполнение следующих работ:

- устройство железобетонного ростверка в цокольной части 1 яруса для перераспределения концентрированной отпорности от буроинъекционных свай;
- усиление тела фундамента закачиванием цементного раствора в тело фундамента через горизонтальные отверстия;
- устройство дополнительных буроинъекционных свай;
- частичная заделка ниши у входа в башню с обеспечением связности;
- преднапряжение кирпичной кладки 7 яруса, с установкой тяжей и передачей усилий от ветровой нагрузки и наклона на нижерасположенные ярусы; скрытое армирование кирпичной кладки по швам проволокой из легированной стали;
- устройство тяжей в приарочных и подоконных участках 2 яруса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Гендель. Пример методики подсчета нормативных нагрузок и рекомендации по расчету специфических элементов конструкций. 1961.
2. Стебнев В.И., Боровских В.С. Наблюдения за креном башни Сююмбике. Информационно-рекламный листок №22-92. Татарский центр научно-технической информации, 1992.
3. Татинвестгражданпроект. Рабочий проект Наблюдения за креном башни Сююмбеке на территории музея заповедника Казанский Кремль. 2003. Заказ №2462.
4. Пархоменко Н.И. Инженерно-геологические условия территории Кремля. Ленгипрокоммунстрой. Заключение по вопросу образования трещин в Кремлевском откосе и в стенах гаража Совета Министров ТАССР. Экспедиция №16, 1954.
5. Центральная проектно-реставрационная мастерская Академии архитектуры СССР. Проект укрепления фундаментов и постановка затяжек у свода башни Сююмбике в г. Казани. 1955.
6. Татаргражданпроект. Рабочий проект Пересчет усилий в конструкциях и проектирование затяжек башни Сююмбике. 1991. Заказ №2462-КМ.