

## АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИЙ И УСТОЙЧИВОСТИ НАКЛОННОЙ БАШНИ В Г. НЕВЬЯНСКЕ

**В. В. ЛУШНИКОВ, Ю. Р. ОРЖЕХОВСКИЙ** – ОАО институт «УралНИИ-АС», Екатеринбург, Россия.

**А. В. ДОЛГОВ** - ГУ «УралНИИпроект», Екатеринбург, Россия.

Башня в Невьянске, построенная в XVIII в. Акинфием Демидовым, приобрела широкую известность во многом в связи со своим общим наклоном. Последний возник предположительно еще на стадии строительства, и к настоящему времени достигает примерно  $2^\circ$ . В этом отношении Невьянская башня похожа на Пизанскую. В докладе рассматриваются и оцениваются имеющиеся данные по осадкам фундаментов и крену сооружения; выполнены прогнозные расчеты.

Башня в г. Невьянске Свердловской области является одним из наиболее интересных и изучаемых памятников истории и архитектуры Урала. Она была построена в первой трети XVIII в. промышленником Акинфием Демидовым, сыном основателя металлургии на Урале – Никиты Антуфьева-Демидова. Башня широко известна в связи со своим наклоном.

Размер башни в плане – 18,1 х 9,6 м, высотой – 57,5 м (рис. 1, б) четверика, трех восьмериков, увенчанных шатром со шпилем и пристройки с высокой железной кровлей (рис. 1, а). Фундаменты башни сделаны из бутового рваного камня зеленокаменных пород и опираются предположительно на деревянные сваи. Стены сложены из красного глиняного кирпича и имеют толщину от 1,78 м внизу до 1,50 м вверху.

Сроки и условия строительства Башни достоверно неизвестны. По разным источникам [1, 2 и др.] она была построена в период с 1722–25 гг. до 1742 г. Однако в последнее время историки склоняются к тому, что она строилась в два этапа: сначала, до 1725 г. – четверик, затем (примерно к 1732 г.) восьмерики с шатром со шпилем. Тогда же на башне были установлены колокола, а на нижнем четверике – английские часы с боем.

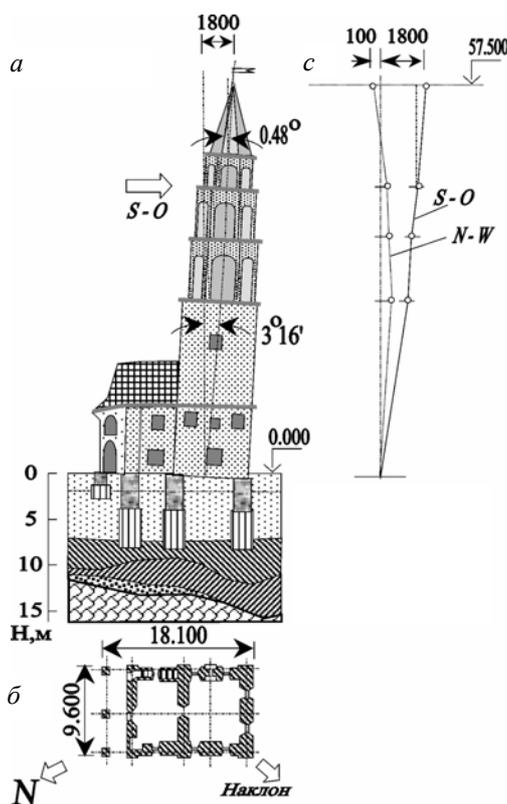


Рис. 1. Невьянская башня. а – разрез; б – план; с – отклонение оси башни от вертикали в северо-западном (N-W) и юго-восточном (S-O) направлениях. Обозначения грунтов: [шляк] - шляк; [суглинок мягкопластичный] - суглинок мягкопластичный; [суглинок тугопластичный] - суглинок тугопластичный; [дресва и щебень] - дресва и щебень; [разборная скала (известняк)] - разборная скала (известняк)

Со временем вокруг башни сформировался интересный архитектурный ансамбль, включающий Господский дом, Спасо-Преображенский собор (1827–1861 гг.) и ряд заводских строений (рис. 2).



Рис. 2. Вид ансамбля вокруг башни (на втором плане Спасо-Преображенский собор)

В 1914 г. возле башни было построено каменное здание электростанции. В военные годы оно было расширено, а некоторые конструкции пристроенной части станции уложены непосредственно на стены пристройки башни. В 30-е гг. Спасо-Преображенский собор был разрушен.

В 1890 г. в Невьянске произошел сильнейший пожар, во время которого деревянный город сгорел почти полностью; сгорел также архив, находившийся в башне. Серьезно пострадала и сама башня.

Башня вплоть до настоящего времени находится на территории машиностроительного завода, а открытый доступ к ней стал возможен только в последнее десятилетие.

В настоящее время прежний архитектурный ансамбль постепенно восстанавливается. В 1994 г. рядом с башней открыт памятник Петру I и основателю династии Демидовых – Никите. Завершается восстановление Спасо-Преображенского собора (рис. 3).

Существует множество легенд, связанных как с уникальностью для Урала башни и ее наклона, так и с отсутствием достоверной информации об истории строительства и даже о назначении башни.



Рис. 3. Современный ансамбль вокруг башни (на втором плане – восстанавливаемый собор)

Относительно наклона башни существует, по крайней мере, две легенды-гипотезы: 1 - башня была построена намеренно наклонно по образцу и подобию Пизанской кампанилы; 2 – наклон возник уже при строительстве либо о его продолжении в течение всего периода ее существования.

Существуют гипотезы, связанные с возможным существованием под башней или на окружающей территории множества подземных ходов и подземелий. Одна из схем размещения подземных ходов, заимствованная из старых источников [1, 2], показана на рис. 4.

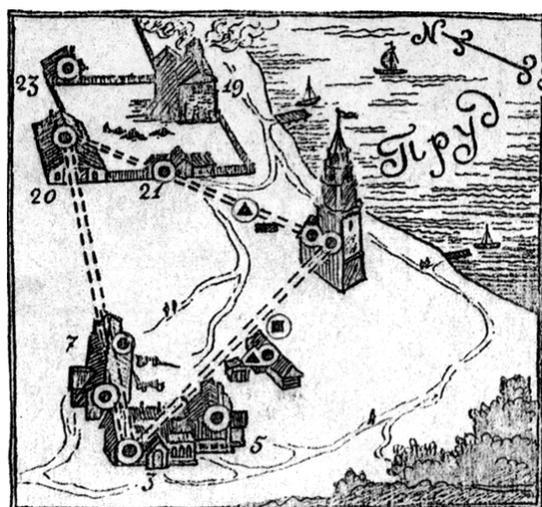


Рис. 4. Схема подземных ходов вокруг башни

Наиболее устойчивой является гипотеза о существовании под башней подвала («полатки»), где узники (крепостные или беглые мастеровые) якобы чеканили серебряные монеты. В Невьянском музее даже создана скульптурная композиция, показывающая процесс чеканки монет и условия содержания узников (рис. 5).

Заметим, что гипотезы, связанные с подземными ходами, пока не находят подтверждения и в настоящей статье не обсуждаются. Что же касается наклона башни и истории его возникновения, то он заслуживает самого серьезного обсуждения.

Авторы придерживаются точки зрения, согласно которой наклон возник еще на стадии строительства, продолжавшегося, как предполагается, около 20 лет.

Причиной образования наклона могли быть как слабые грунты в основании (что естественно вблизи реки Нейвы), так и возможное заложение фундаментов на мерзлом грунте, который после оттаивания привел к образованию неравномерных осадок и начального наклона. Об этом есть косвенные свидетельства в переписке, относящейся к середине – концу XVIII в.



Рис. 5. Экспозиция музея (чеканка монет)

Согласно измерениям, выполненным в 1977–1979 гг., отклонение верхушки шпиля от вертикальной оси строения составляет 1800 мм, а общий угол наклона достиг примерно  $2^\circ$ .

Интересно, что собственный наклон отдельных ярусов башни различен и уменьшается с высотой от  $2^\circ 53'$  (четверик) до  $0^\circ 48'$  (купол и шпиль). В результате продольная ось башни имеет характерную саблеобразную

форму (см. рис. 1, б), что роднит ее со знаменитой Пизанской башней.

Одна из гипотез, объясняющих такую форму, заключается в следующем. Каждый следующий ярус строители начинали возводить вертикально, однако продолжавшийся общий крен сооружения приводил к наклону и этого очередного яруса, но уже меньшему, чем у предыдущего. Вследствие этого к завершению строительства ось сооружения приобрела ломаное очертание. Дальнейший крен уже построенной башни происходил как жесткого тела.

Эта гипотеза позволяет оценить динамику крена Невьянской башни. Если ось шатра к концу строительства была вертикальной, то существующее ее отклонение в  $0^\circ 48'$ , «набежавшее» примерно за 250 лет с момента завершения строительства, как раз и представляет собой общий крен за этот период.

На основании этой оценки и с учетом результатов наблюдений, проводившихся в 1962–1964 и 1977–1979 гг., авторами статьи [3] был сделан прогноз развития наклона Невьянской и Пизанской башен (рис. 6).

Согласно этому прогнозу, Невьянская башня может исчерпать ресурс устойчивости к 2200–2250 гг., т. е. к этому году при самом неблагоприятном варианте коэффициент устойчивости достигнет значения  $k_{st} = 1$ . Подобный же прогноз для Пизанской башни приводил к  $k_{st} = 1$  значительно ранее – к 2150 г. (разумеется, при этом не могли быть учтены проводимые сейчас мероприятия по выправлению ее наклона).

Вместе с тем можно констатировать, что упомянутые наблюдения, показав продолжающийся и достаточно равномерный рост осадок основания башни (со скоростью около 1 мм в год), в то же время не зафиксировали значимого (т.е. существенно превосходящего погрешность измерений) дополнительного крена за период наблюдений.

Авторами статьи выполнен ряд расчетов для количественной оценки различных факторов, влияющих на деформации и устойчивость Невьянской башни. Достоверные данные о конструкции фундамента и его заглублении, как отмечалось, отсутствуют, поэтому расчеты носят оценочный характер.

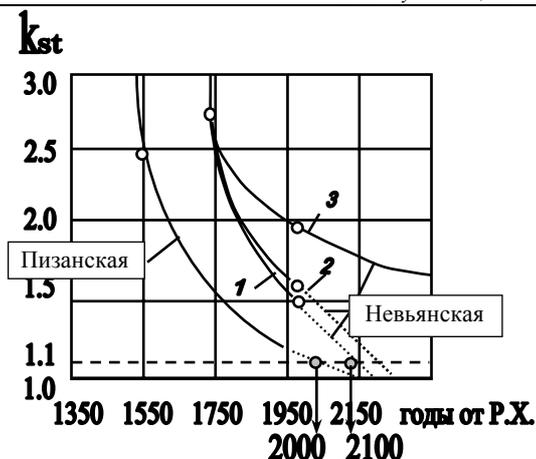


Рис. 6. Изменение коэффициента устойчивости Невьянской и Пизанской башен (1...3 – изменение коэффициента устойчивости Невьянской башни при различных гипотезах)

Согласно материалам последних инженерно-геологических изысканий, проведенных в 2000 г., в непосредственной близости от башни в основании фундаментов залегают грунты со следующими характеристиками:

насыпной грунт (шлак) с глубиной подошвы 4,5...7,8 м от поверхности, ориентировочное значение модуля деформации  $E = 15$  МПа;

аллювиальные суглинки – от твердых до мягкопластичных,  $E = 12...20$  МПа;

щебенистый грунт известняков,  $E = 25$  МПа;

скальный грунт известняка слабыветрелый средней прочности, расчетное сопротивление одноосному сжатию  $R_c = 25$  МПа.

При анализе материалов изысканий обращает на себя внимание достаточно резкое падение кровли скальных грунтов в направлении наклона башни (см. рис. 1, а). Так, на участке длиной в 4 м разница в отметках кровли скалы составляет более 2 м. Соответственно возрастает толщина сжимаемого слоя. Таким образом, основание по своей сжимаемости является неравномерным, и увеличение сжимаемости происходит именно в направлении крена. Это обстоятельство, хорошо известное и раньше [3], часто выдвигалось в качестве основной причины деформаций башни. Приводимые ниже результаты расчетов существенно уточняют и детализируют подобную точку зрения.

Рассчитанная величина средней осадки в разных вариантах (варьировались форма и глубина заложения фундаментов) менялась от 10 до 16 см. Однако при центральном действии нагрузки рассчитанная разность осадок краев фундамента  $dS$  не превысила 1,2 см. Учет «наведенного» эксцентриситета сил тяжести, вызванного наклоном башни (эквивалентен моменту примерно в 1500 кН·м), повышает величину  $dS$  до 7...8 см. Между тем, фактическая разница осадок краев фундамента, соответствующая наблюдаемому крену башни, составляет примерно 30 см. В расчете подобное значение можно получить лишь при величине модуля деформации несущего грунта 3,5...4,0 МПа.

Отсюда можно заключить, что деформативность грунтов основания в период строительства была значительно выше нынешней. Это представляется вполне естественным, учитывая наличие в основании «свежих» (по тем временам) насыпных грунтов, впоследствии самоуплотнившихся, а также значительное улучшение гидрогеологических условий территории.

Оценим ресурс устойчивости башни, используя содержащуюся в российских строительных нормах [4] формулу для определения крена  $i$  при внецентренном приложении нагрузки:

$$i = (1 - \nu^2) k_e N e / [E k_m (a/2)^3] = A N e, \quad (1)$$

где  $E$  и  $\nu$  – соответственно модуль деформации и коэффициент Пуассона грунта основания;  $k_m = 1$  и  $k_e = 0.5$  – коэффициенты, зависящие от расчетной схемы и формы фундамента;  $N, e$  – вертикальная нагрузка и ее эксцентриситет соответственно;  $a$  – ширина фундамента.

Формулу (1) можно записать в более общем и компактном виде:

$$I = A M, \quad (2)$$

где  $M$  – внешний, или возмущающий, момент, вызывающий крен  $i$  (в упомянутых нормах  $M = Ne$ ; здесь же нами рассматривается более широкий контекст).

Сравним величину  $M$  с наведенным моментом  $M_e = Ph$ , обусловленным возникшим креном (здесь  $P$  – вес сооружения,  $h$  – высота центра тяжести). Условие  $M_e < M$  или, в эквивалентной форме,  $P h A < 1$ , есть условие

устойчивости сооружения: при снятии возмущающего момента  $M$  конструкция вернется в исходное положение (последнее справедливо для упругого основания; конструкция на грунтовом основании займет некоторое промежуточное положение, соответствующее остаточной деформации). Напротив, при неравенстве  $P h A > 1$  сооружение неустойчиво: малейшее отклонение от положения равновесия приводит к прогрессирующему крену и в конечном счете – к обрушению.

Для неоднородного по сжимаемости основания формула (2) может быть обобщена следующим образом:

$$i = A M + i_0, \quad (3)$$

где  $i_0$  – крен сооружения при центральном действии нагрузки, обусловленный неоднородностью основания.

Условие устойчивости сооружения на неоднородном основании теперь имеет вид

$$P h A < 1 - i_0 / i. \quad (4)$$

Важнейшим следствием полученного соотношения является то, что устойчивое равновесие конструкции достигается лишь при условии  $P h A < 1$  и при вполне определенном значении крена:

$$i_{st} = i_0 / (1 - P h A). \quad (5)$$

Это означает, в частности, что начальный крен, возникший за счет неоднородности основания, является неустойчивым и будет прогрессировать вплоть до значения  $i_{st}$ . Если же  $P h A > 1$ , то равновесие конструкции невозможно ни при каком крене, конструкция неустойчива. Величину  $N_{st} = 1 / (P h A)$  можно, таким образом, рассматривать как критерий запаса устойчивости.

Согласно расчету, начальному (в период строительства) состоянию грунтов основания Невьянской башни соответствовало значение  $N_{st}$ , близкое к единице. Можно предположить следующую картину деформирования башни. Первоначальный наклон, обусловленный неоднородностью грунтового основания, башня получила в период строительства, причем на сравнительно ранней его стадии. Этот наклон был относительно невелик, однако в силу неустойчивости возникшего положения крен продолжал прогрессировать уже под действи-

ем нарастающего эксцентриситета (в сочетании с ростом нагрузки в процессе возведения) вплоть до достижения значения  $i_{st}$ , которое, согласно проведенным оценкам, примерно в 4...5 раз превосходит начальное.

При современных характеристиках грунтов значение  $N_{st}$  составляет не менее 4, поэтому нынешнее положение башни можно оценить как устойчивое. Если последующими исследованиями будет установлено отсутствие заметных негативных тенденций в состоянии грунтов основания, то дальнейший крен башни, и тем более потерю устойчивости, следует признать маловероятными.

Существует еще один аспект общей устойчивости сооружения: устойчивость (против выпора) грунтового массива в основании башни. Минимальное расчетное значение коэффициента устойчивости против выпора, согласно выполненным расчетам, составляет  $k_{st} = 1,05$ . Столь низкая оценка во многом связана с отсутствием точной информации о ключевых параметрах – площади подошвы фундамента, его заглублении, а также о свойствах грунтов непосредственно под башней. В связи с этим можно отметить, что максимальное расчетное значение, полученное также при вполне возможных параметрах, составляет  $k_{st} = 3,2$ . Тем не менее, определенная опасность выпора грунта имеется. Наиболее эффективным мероприятием, полностью исключающим такую возможность, было бы устройство контурной обоймы из буронабивных свай [5] со стороны наклона башни.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Очерки истории культуры и быта старого Невьянска. Люди, памятники, документы (к 300-летию города)* / Под общей научной редакцией В. И. Байдина. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2001. 248 с.
2. *Старый Невьянский завод*. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2001. 232 с.
3. *Прогноз устойчивости Невьянской башни* / Ю. К. Зарецкий, В. К. Капустин, В. В. Лушников, Б. И. Суханов. // Основания, фундаменты и механика грунтов. №6. 1981. С.19–21.
4. СНиП 2.02.01-83\*. Основания зданий и сооружений / Минстрой России. М.: ГП ЦПП, 1995.
5. В. В. Лушников, Ю. Р. Оржеховский. Усиление фундаментов в просадочных грунтах методом контурной обоймы // Усиление оснований и фундаментов аварийных зданий и сооружений: Материалы междунар. конф. Пенза, 2000. С.140–142.