

## Активный мониторинг несущей конструкции храма «Во имя святой животворящей троицы», г. Балаково

*Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой А.А. Землянский;  
доцент В.А. Аридов;*

*к.т.н., доцент О.С. Вертынский\*,*

*ФГБОУ ВПО Саратовский государственный технический университет*

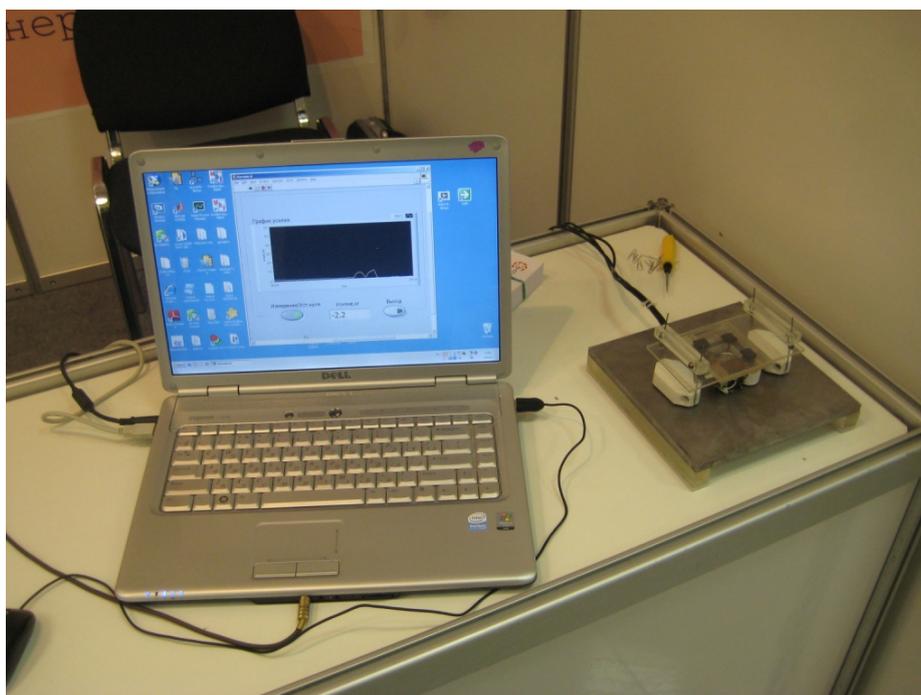
**Ключевые слова:** металлическая затяжка; напряженно-деформированное состояние; комплексное обследование; система активного мониторинга

Контроль напряженно-деформированного состояния (НДС) строительных конструкций на сегодняшний день более чем актуален и распространен во всех областях строительной отрасли от строительства сложных инженерных сооружений до реконструкции типовых зданий. Его цель – предотвращение возможных аварий в ходе эксплуатации объекта.

Напряженно-деформированное состояние, будучи критерием прочности, не может быть оценено прямыми методами, поэтому инженеру приходится использовать косвенные методы определения НДС, основанные на изменении ряда характеристик материала (частотных, оптических, магнитных) вследствие изменения НДС. Увеличение сложности инженерных сооружений требует более точного измерения НДС, т.к. допустимый интервал отклонений от проектных значений сужается. Поэтому разработка эффективных систем активного мониторинга НДС актуальна, а его точность является ключевым показателем эффективности системы [1-5].

Авторы настоящей работы разработали и защитили патентом на изобретение принципиально новую систему мониторинга, в основу которой положена зависимость относительной магнитной проницаемости ферромагнитных сред (в частности стали) от действующих напряжений [6]. Внешний вид системы активного мониторинга НДС представлен на рисунке 1.

Цель данной работы – апробация разработанной системы активного мониторинга на основе знаний об изменении магнитной проницаемости ферромагнитных материалов, подвергнутых силовому воздействию в реальных натуральных условиях, и определение степени сходимости результатов значений НДС, полученных системой, с теоретическими расчетами.



**Рисунок 1. Система активного мониторинга НДС**

Проверка работоспособности системы активного мониторинга НДС выполнялась в ходе реконструкции храма «Во имя святой животворящей Троицы» (г. Балаково).

Уникальный памятник архитектуры Балаково, храм «Во имя святой животворящей Троицы» был запроектирован и возведен великим архитектором Ф.О. Шехтелем в начале XX века. Выполненный проект, по мнению многих современников, был удивительно прост, но одновременно и великолепен. Храм был запроектирован по шатровой и бесстолповой расчетной схеме из белого камня (рис. 2). Тема Троицы нашла отражение в трехкратном повторении формы шатра в окончательном венчании основного объема храма, колокольни и крестильни, в мотиве тройных арочных окон на фасадах храма и других элементах фасадного декора [7, 8]. Строительство храма, начатое в 1910 году, было завершено к осени 1912 года. А в октябре того же года на колокольню были подняты 17 колоколов. Главным строителем храма являлся в то время некий инженер Антонов, который работал под непосредственным наблюдением и контролем архитектора Федора Шехтеля.



**Рисунок 2. Храм «Во имя святой животворящей Троицы»**

После революции большевики изъяли из храма все церковное имущество. В 1930 году, одновременно с разрушением всех Балаковских церквей, были разрушены все три главных шатра храма, а также полностью разобрана верхняя часть звонницы.

В 1964 году здание храма было передано на баланс машиностроительного завода им. Ф.Э. Дзержинского с полным перепрофилированием области его использования. В результате общее объемно-планировочное решение храма было коренным образом изменено, и в нем был размещен городской дворец культуры. При этом в здании была разрушена главная – несущая – металлическая затяжка в районе алтаря, которая обеспечивала общую прочность и пространственную устойчивость исследуемого объекта.

В результате здание храма стало интенсивно разрушаться вплоть до появления серьезных аварийных трещин в зоне алтаря и в куполе храма [9, 10, 11, 12]. В ходе обследования архитектурно-реставрационное товарищество «Арт-Дмитрий», г. Саратов, в целях возрождения храма разработало техническое решение по восстановлению уничтоженной затяжки. Однако в результате независимой экспертизы проекта восстановления храма авторами настоящей работы был выявлен ряд недостатков, обусловленных:

- сложностью устройства затяжки и создания в материале затяжки предварительного напряжения;
- невозможностью включения в работу второй (короткой) ветви затяжки, представленной в проекте;
- на практике по проекту Ф. Шехтеля сечение восстанавливаемой затяжки должно назначаться по условию ее жесткости, которая должна быть эквивалентной жесткости существующих затяжек, а не из условия прочности, как это сделано в проекте тов. «Арт-Дмитрий», принимая во внимание, что модули упругости современных строительных сталей и «сварочного железа» примерно одинаковы [13, 14].

Землянский А.А., Аридов В.А., Вертынский О.С. Активный мониторинг несущей конструкции храма «Во имя святой животворящей троицы», г. Балаково

Все отмеченное можно представить в виде следующего алгоритма расчета.

1. Относительное удлинение затяжки при растяжении:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\Delta H}{EA}, \quad (1)$$

где  $\Delta H$  – приращение распора при увеличении нагрузки, связанной с восстановлением шатра храма.

2. Считая  $\Delta H = \text{const}$ , можно записать:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta H}{EA}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\Delta H}{EA_B}, \quad (2)$$

где  $A$  – площадь существующей затяжки;  
 $A_B$  – площадь восстанавливаемой затяжки;  
 $A = 116,1 \text{ см}^2$ ;  $A_B = 16 \times 1 = 16 \text{ см}^2$ ;

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\Delta H/EA_B}{\Delta H/EA} = \frac{A}{A_B} = \frac{116,1}{16} = 7,26. \quad (3)$$

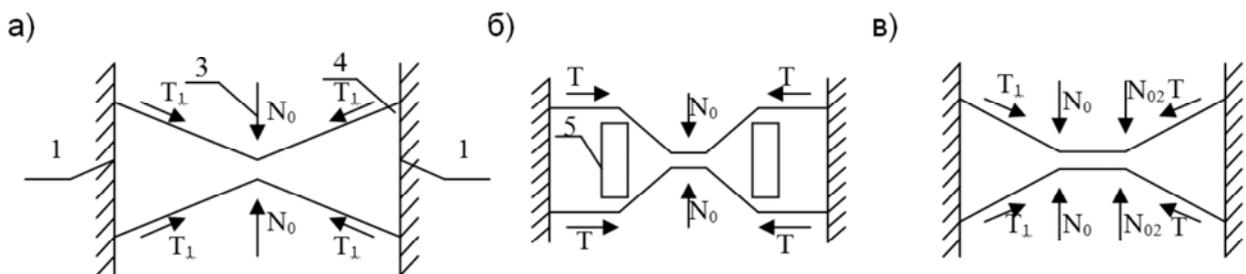
3. Если даже принять  $A_B = 16 \times 2 = 32 \text{ см}^2$  (вторая ветвь затяжки полностью участвует в работе), то в этом случае:

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{116,1}{32} = 3,63. \quad (4)$$

Таким образом, деформативность восстанавливаемой затяжки по предложению товарищества «Арт-Дмитрия» будет в 7 раз больше по сравнению с существующими затяжками на северной, западной и южной сторонах храма, что недопустимо.

Большая деформативность восстанавливаемой затяжки при увеличении внешней нагрузки за счет восстановления в последующем всех несущих конструкций шатра может привести к образованию и значительному раскрытию трещин в пилонах, стенах и арке с последующим неумолимым разрушением объекта, что просто недопустимо.

С целью повышения эксплуатационной надежности проектируемой затяжки и обеспечения полного включения ее в совместную работу с существующими пилонами исследуемого объекта авторами было разработано 3 варианта конструктивного исполнения 2-хветвевой затяжки с различными системами синхронного механического преднапряжения ветвей, расчетные схемы которых представлены на рис. 3.



**Рисунок 3. Расчетные схемы конструктивного исполнения 2-хветвевой затяжки в храме «Святой Троицы» г. Балаково: а) схема затяжки с одним регулятором натяжения ветвевой затяжки; б) схема затяжки с распорами; в) схема затяжки с двумя регуляторами натяжения ветвей затяжки; где: 1 – пилоны; 2 – рабочие ветви затяжки; 3 – усилие в регуляторе натяжения ветвей затяжки; 4 – усилие натяжения ветвей затяжки; 5 – распорный элемент**

В ходе анализа эффективности представленных вариантов затяжки авторами установлено, что на практике возможность эффективного включения восстанавливаемой затяжки в совместную работу с пилонами зависит только от:

- жесткости самих ветвей затяжки;
- размеров необходимого рабочего диапазона регулировки преднапряжения в ветвях затяжки;
- наличия в системе регулировки возможности полной и автоматической синхронизации усилий в каждой рабочей ветви затяжки.

По мнению авторов, все затяжки из предложенных вариантов конструктивного исполнения потенциально обеспечивают все вышеуказанные параметры с различной эффективностью регулировки усилия натяжения каждой из ветвей затяжки по ширине выбранного диапазона [15-18].

Для оценки эффективности регулировки усилий натяжения рабочих ветвей затяжки рассмотрим алгоритм расчета уровня преднапряжения в каждом из предложенных вариантов.

### I вариант решения затяжки

Сечение стальной затяжки по условию жесткости принимается эквивалентным проектному – из двух листов низкоуглеродной стали Ст3 ГОСТ 308-71, как показано на рис. 4. Площадь  $A_3 = 2 \cdot 24 \cdot 2,5 = 120 \text{ см}^2$ .

Натяжение в затяжке создается путем стягивания ветвей болтом, располагаемым в середине пролета затяжки на величине  $a$ , как показано на рис.5.

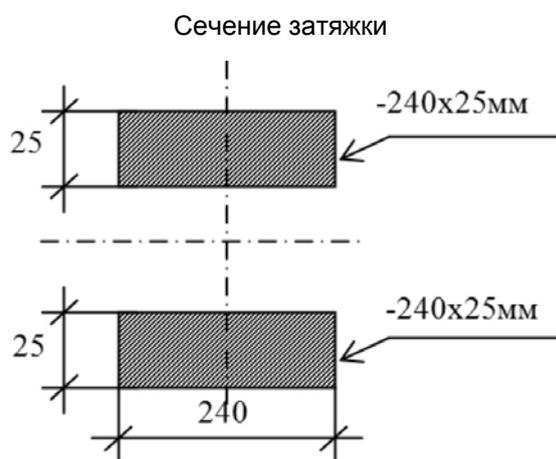


Рисунок 4. Схема поперечного сечения рабочих ветвей затяжки

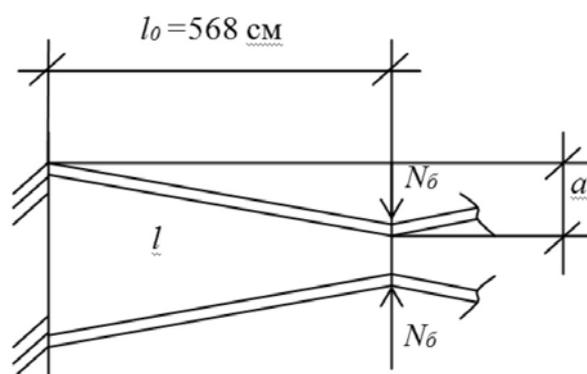


Рисунок 5. Расчетная схема затяжки по I варианту

Примем  $a = 8 \text{ см}$ , при этом:

$$l = \sqrt{l_0^2 + a^2} = \sqrt{568^2 + 8^2} = 568,056 \text{ см};$$

$$\Delta l = 0,056 \text{ см}.$$

Определим напряжение растяжения в затяжке:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot E = \frac{0,056}{568} \cdot 2,1 \cdot 10^6 = 207,04 \text{ кгс/см}^2.$$

Тогда усилие натяжения затяжки будет равно:

$$T = \sigma \cdot A_3 = 207,04 \cdot 120 = 24845 \text{ кгс} = 24,85 \text{ тс}.$$

### II вариант решения затяжки

Расчетная схема затяжки по 2-му варианту представлена на рис. 6.

Примем  $a = 6 \text{ см}$ , при этом:

$$l_1 = \sqrt{l_{01}^2 + a^2} = \sqrt{318^2 + 6^2} = 322,0566 \text{ см};$$

$$\Delta l = 0,0566 \text{ см};$$

$$\sigma = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot E = \frac{0,0566}{568} \cdot 2,1 \cdot 10^6 = 209,26 \text{ кгс/см}^2.$$

Определим усилие натяжения затяжки по формуле  $T = \sigma \cdot A_B$ :

$$T = 209,26 \cdot 120 = 25111 \text{ кгс} = 25,11 \text{ тс}.$$

Определяется осевое усилие в болте:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{6}{318} = 0,01887; \quad \sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = 0,01887;$$

$$-N_{\sigma} + 2 \cdot \frac{T}{2} \cos(90 - \alpha) = 0;$$

$$-N_{\sigma} + T \cdot \sin \alpha = 0;$$

$$N_{\sigma} = T \cdot \sin \alpha = 2511 \cdot 0,01887 = 0,474 \text{ тс} = 474 \text{ кгс};$$

Тогда усилие сжатия в распорке 5 достигнет следующего значения:

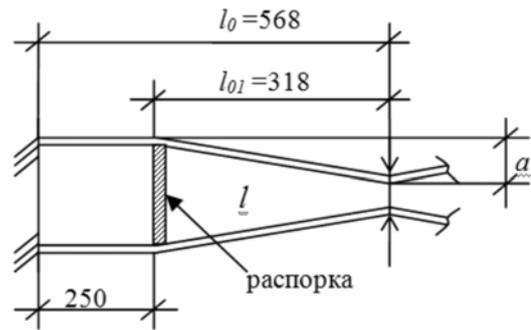
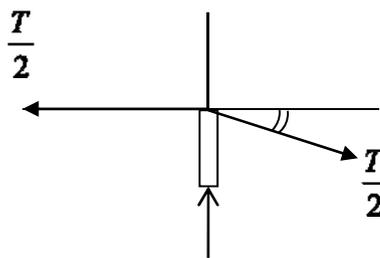
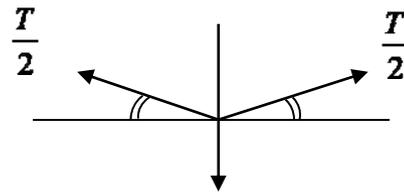


Рисунок 6. Расчетная схема затяжки по II-му варианту



$$N_p = \frac{N_{\sigma}}{2} = \frac{474}{2} = 237 \text{ кгс}$$

### III вариант решения затяжки (базовый вариант)

Конструктивно, затяжка располагается в алтаре на отм. ~ 5,5 м и в пределах части своей длины входит в габариты сечения швеллера, находящегося на стене (см. рис.7).

Натяжение в затяжке планировалось создать с помощью двух стяжных болтов, как показано на рис. 8.

Относительное удлинение затяжки можно определить по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0},$$

$$\text{где } L_0 = 2l_1 + l_2; \quad L = 2l + l_2 = 2\sqrt{l_1^2 + a^2} + l_2.$$

В результате выполненных преобразований можно получить, что:

$$\varepsilon = \frac{2\sqrt{l_1^2 + a^2} + l_2 - 2l_1 - l_2}{L_0} = \frac{2\sqrt{l_1^2 + a^2} - 2l_1}{L_0}.$$

Тогда растягивающие напряжения в затяжке будут равны:

$$\sigma = E\varepsilon = \frac{2\sqrt{l_1^2 + a^2} - 2l_1}{L_0} \cdot E.$$

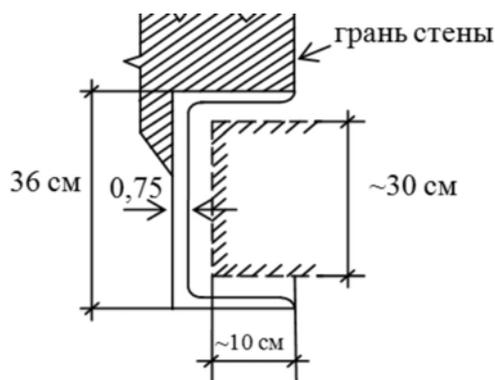


Рисунок 7. Схема расположения затяжки в стенке алтаря

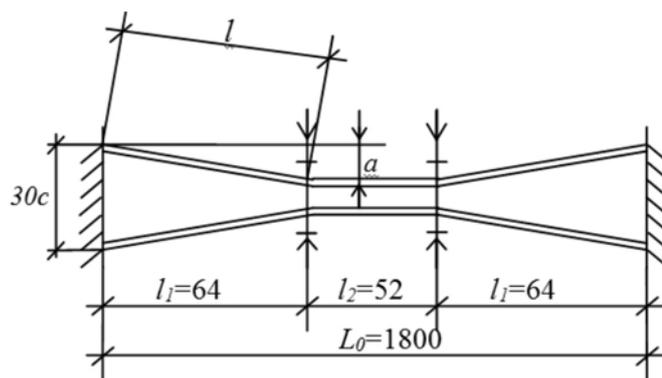


Рисунок 8. Расчетная схема затяжки, III вариант

Зная интенсивность напряжения в затяжке и ее рабочую площадь, можно получить суммарное усилие, воспринимаемое затяжкой:

$$T = \sigma \cdot A \quad (A - \text{площадь сечения затяжки}).$$

Рассматривая  $a$  как переменную величину, имеем:

$$\sigma = E\varepsilon = \frac{2\sqrt{640^2 + a^2} - 1280}{1800} \cdot 2,1 \cdot 10^6 \text{ [кгс/см}^2\text{]}.$$

Зависимость усилия  $T$  в затяжке от параметра  $a$  можно представить в виде графика.

Общий анализ полученной модели свидетельствует о том, что III вариант затяжки является наиболее эффективным, так как обеспечивает самый широкий диапазон регулировки усилия натяжения затяжки, что создает благоприятные условия для полного восстановления эксплуатационной надежности храма без нарушений его прочности, жесткости и объемно-планировочной целостности и полностью соответствует всем проектным требованиям, заложенным акад. Ф. Шехтелем в ходе работы над проектом храма «Во имя святой, животворящей Троицы».

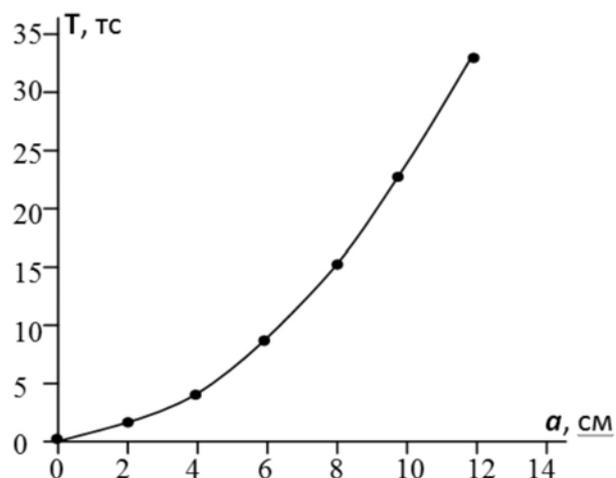


Рисунок 9. График зависимости  $T=f(a)$

Практическое использование разработанной системы мониторинга НДС при восстановлении храма «Во имя святой животворящей Троицы» (г. Балаково) позволило авторам выполнить детальную экспериментальную проверку результатов вариантного проектирования восстановления разрушенной затяжки в зоне алтаря. Применение в ходе исследований и обработка многофакторного эксперимента позволили установить фактические показания датчика системы и сопоставить их со значениями, полученными в ходе проектирования [19]. Сводные результаты представлены в таблице.

Таким образом, разработанная система позволила измерить фактическое напряженное состояние в восстановленной затяжке с точностью 0,05 МПа во всем диапазоне преднапряжения последней. При этом расхождение результатов теоретических расчетов и фактических показаний прибора не превысило 5%.

Проведенные исследования позволили установить высокую эффективность и работоспособность предложенной системы мониторинга НДС, что говорит о необходимости продолжения данной работы с апробацией разработанной системы на более сложных инженерных объектах.

**Таблица 1. Результаты определения интенсивности напряжения и усилия в затяжке в выбранном диапазоне регулировки натяжения рабочих болтов**

№ п/п	а, см	Теоретические значения		Практические показания	Примечание
		$\sigma$ , кгс/см <sup>2</sup>	T, тс	$\sigma$ , кгс/см <sup>2</sup>	
1	2	7,3	0,88	7,52	
2	4	29,2	3,5	27,6	
3	6	65,6	7,9	68,1	
4	8	116,7	14,0	120,3	Проектный вариант
5	10	182,3	21,9	186,9	
6	12	262,5	31,5	270,0	

### Литература

1. An expert system for erosioncorrosion inspections / Bridgeman Jim, Theisen Ken, Whang Bill, Shankar Ramesh // 10 th Int. Cont.NDE Nucl. and Pressure Vessel Ind. Glasgow, 11 – 14Jun, 1990. Materials Park (Ohio), 1990. Pp. 569-572.
2. Pat. US2895332. Int G01L 500 . Magneto-elastic transducer / Orvar D., Folke V., Jan N. ASEA Aktiebolag, 1990.
3. Майоров М.М. Бесконтактные датчики крутящего момента // В кн.: Измерительная аппаратура и средства автоматизации процессов бурения. М., ГОСНИТИ, 1962. С. 35-45.
4. Гуляев В. Г. Магнитоупругий датчик с сердечником из никеля. Донецк: ДПИ, 1961. 52 с.
5. Marinescu A., Tircomnicu R., Marinescu E. TRADEC – A New Reduced Power Consuming Magnetoelastic Force Transducer // Proceedings of the 17th International Conference on Force, Mass, Torque and Pressure Measurements. Istanbul: IMEKO TC3, 17-21 Sept. 2001. Pp. 12-17.
6. Пат. 2295118 РФ, МПК G01L1/12 . Магнитоупругий датчик / Землянский А.А., Землянский К.А. // БИ. 2007. №7.
7. Попова Н. А. Белокаменный Феникс // Православие и современность. 2009. №10. С. 113-118.
8. Бирюкова Н. В. История архитектуры. М.: ИНФРО-М, 2006. 367 с.
9. Землянский А. А. Эксплуатационная надежность стальных резервуаров // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2004. № 9. С. 14-17.
10. ВСН 58-88(р). Положение об организации, проведении реконструкции, ремонта и технического обследования жилых зданий объектов коммунального хозяйства и социально-культурного назначения.
11. Землянский А. А. Обследование и испытание зданий и сооружений. М.: АСВ, 2001. 240 с.
12. Гучкин И. С. Диагностика повреждений и восстановление эксплуатационных качеств конструкций. М.: АСВ, 2001. 173 с.
13. Палагушкин В. И. Активное управление строительными конструкциями при статических и вибростатических воздействиях. Красноярск, 2002. 198 с.
14. Maclochlainn Coilin. A plastics guide // Technol Irel. 1991. 23. III 4. Pp. 26-27.
15. Bidaux R., Conte R., Nasser J. A. Magneto-elastic coupling by dipolar interactions: spin operation in MNO // Journal of Applied Physics. 1979. Vol. 50, issue B3 March 01. Pp. 1683-1684.
16. Землянский А. А., Ращепкин С. В. Ращепкина С. А. Исследование строительных конструкций современными электронными приборами. Саратов, 2002. Деп. ВИНТИ, №320-B2002. 54 с.
17. Землянский А. А. Мониторинг и управление надёжностью зданий и сооружений различного назначения // Промышленное и гражданское строительство. 2004. № 9. С. 39-40.
18. Овчинников И. Г. Прочностной мониторинг инженерных конструкций // Архитектура и строительство Беларуси. 1994. №5/6. С. 21-25.
19. Землянский А. А., Мордовин Г. М. Планирование эксперимента и статистическая обработка результатов. Саратов: Сар. гос. техн. ун-т, 2004. 32 с.

\* Олег Станиславович Вертынский, г. Балаково, Россия  
Тел. моб.: +79271489846; эл. почта: olvert@bk.ru

© Землянский А.А., Аридов В.А., Вертынский О.С., 2012

Землянский А.А., Аридов В.А., Вертынский О.С. Активный мониторинг несущей конструкции храма «Во имя святой животворящей троицы», г. Балаково

doi: 10.5862/MCE.33.8

## Active monitoring of bearing structure of St. Trinity Church in Balakovo

A.A. Zemlyanskiy,  
V.A. Aridov,  
O.S. Vertynskiy,

Saratov State Technical University, Saratov, Russia  
+79271489846; e-mail: olvert@bk.ru

### Key words

metal tightening; complex survey; variant designing; active monitoring; deflected mode

### Abstract

Previously the authors developed and protected by a patent a new monitoring system based on the dependence of relative permeability of ferromagnetic mediums on acting stresses. The aim of this work is testing this monitoring system in natural conditions and determining convergence of deflected mode values received by system and theoretically calculated.

The results of complex examination of St. Trinity Church (the city of Balakovo) are presented in the given work. As a result several variants of tightening reconstruction were suggested and calculated.

Results of theoretical and experimental determining deflected mode of basic variant of tightening with using new monitoring system were considered. Divergence of results of theoretical calculation and actual instrumental data did not exceed 5%.

### References

1. An expert system for erosioncorrosion inspections. Bridgeman Jim, Theisen Ken, Whang Bill, Shankar Ramesh. *10 th Int. Cont.NDE Nucl. and Pressure Vessel Ind.* Glasgow, 11 - 14Jun, 1990. Materials Park (Ohio), 1990. Pp. 569-572.
2. Pat. US2895332. Int G01L 500 . *Magneto-elastic transducer.* Orvar D., Folke V., Jan N. ASEA Aktiebolag, 1990.
3. Majorov M. M. *Contactless sensors of a torque.* M.: State power publishing house, 1962. (rus)
4. Gulyaev V. G. *Magnetoelastic the sensor with the core from nickel.* Donetsk: DPI, 1961. 52 p. (rus)
5. Marinescu A., Tircomnicu R., Ecaterina Marinescu. TRADEC - A New Reduced Power Consuming Magnetoelastic Force Transducer. *Proceedings of the 17th International Conference on Force, Mass, Torque and Pressure Measurements.* Istanbul: IMEKO TC3, 17-21 Sept. 2001
6. Pat. 2295118 RU. Int G01L1/12 . *Magneto-elastic transducer.* A. A. Zemlyanskiy, K. A. Zemlyanskiy. 2007, Bull 7.
7. Popova N. A. *Phoenix from a white stone. Orthodoxy and present.* 2009. No. 10. Pp. 113-118. (rus)
8. Biryukova N. V. *Architecture history.* Uch. grant. M.: INFRO-M, 2006. 367 p. (rus)
9. Zemlyanskiy A. A. Operational reliability of constructions. *Magazine «Installation and special works in construction».* M., 2004. No. 9. (rus)
10. DCN 58-88. Provision on the organization, carrying out reconstruction, repair and technical inspection of residential buildings of objects of municipal services and welfare appointment.
11. Zemlyanskiy A. A. *Investigation and Testing of Buildings.* M.: ASV, 2001. 240 p. (rus)
12. Guchkin I. S. *Diagnostics of damages and restoration of operational qualities of designs 2001.* M.: ACI, 2001. 173 p. (rus)
13. Palagushkin V. I. *Active management of construction designs at statically and vibrostatistics influences.* Krasnoyarsk, 2002. 198 p. (rus)
14. Maclochlainn Coilin. A plastics guide. *Technol Irel.* 1991. 23. III 4. Pp. 26-27.
15. Bidaux R., Conte R., Nasser J. A. Magneto-elastic coupling by dipolar interactions: spin operation in mno. *Journal of Applied Physics.* 1979.

Zemlyanskiy A.A., Aridov V.A., Vertynskiy O.S. Active monitoring of bearing structure of St. Trinity Church in Balakovo

16. Zemlyanskiy A. A., Rachevkin S. V., Rachevkina S. A. *Research of construction designs by modern electronic devices*. Saratov, 2002 Dep. №320-B2002.
17. Zemlyanskiy A. A. Monitoring and Management by Building Safety of Different Purposes. A.A. Zemlyanskiy. *Industrial and Civil Construction*. 2004. No. 9. Pp. 39. (rus)
18. Ovchinnikov I. G. Strength monitoring of engineering designs. *Architecture and construction of Belarus*. 1994. No. 5-6. Pp. 21-25. (rus)
19. Zemlyanskiy A. A., Mordovin G. M. *Planning of experiment and statistical processing of results*. Saratov: SSTU, 2004. (rus)

**Full text of this article in Russian: pp. 63-69**