



УДК 528.482.5:519.218.82:004.94

DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-3-96-105

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ИНЖЕНЕРНОГО ОБЪЕКТА МЕТОДОМ СПЛАЙН-ИНТЕРПОЛЯЦИИ

Татьяна Юрьевна Бугакова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и информационных систем, тел. (383)343-18-53, e-mail: kaf.pi@ssga.ru

Приведен пример применения метода сплайн-интерполяции для определения и трехмерной визуализации деформации инженерного сооружения. Определение деформации инженерного сооружения выполнено по результатам имитационного моделирования, приведенного на два момента времени $t = 0$ и $t = 1$, и представлено этапами: аппроксимация множества контрольных марок с координатами X_i, Y_i, H_i сплайн-поверхностью; совмещение сплайн-поверхностей, построенных на разные моменты времени; определение допустимых границ изменения положения поверхности; определение и визуализация областей пересечения сплайн-поверхностью объекта допустимых границ.

Получены результаты трехмерной визуализации деформации инженерного объекта, а также цифровые модели сплайн-поверхностей, что дает возможность вычислить приращение высотных координат при любой степени дискретизации сетки поверхности и определить области деформации в цифровом виде.

Ключевые слова: деформация, трехмерное моделирование, сплайн-интерполяция, аппроксимация, визуализация деформации поверхности.

Введение

Одним из важных направлений современной науки является исследование пространственно-временных состояний (ПВС) инженерных объектов. Под ПВС инженерных объектов подразумевается положение всего объекта в целом относительно неподвижной системы координат в пространстве и времени. Влияние внешних факторов, как правило, приводит к изменению положения инженерных объектов или их структурных частей в пространстве [1–5]. Изменение положения объектов может происходить в горизонтальной или в вертикальной плоскостях. Воздействие внешних факторов на объект приводит к деформации объекта. Деформация является наиболее опасным явлением, поэтому для ее оп-

ределения требуется не только геодезический контроль, но и применение математических методов для адекватной оценки ситуации и прогнозирования развития деформационных процессов [6–15].

Метод моделирования

В статье рассмотрен пример трехмерного моделирования деформации инженерного сооружения методом сплайн-интерполяции. В качестве объекта моделирования принята условная модель инженерного сооружения (рис. 1).

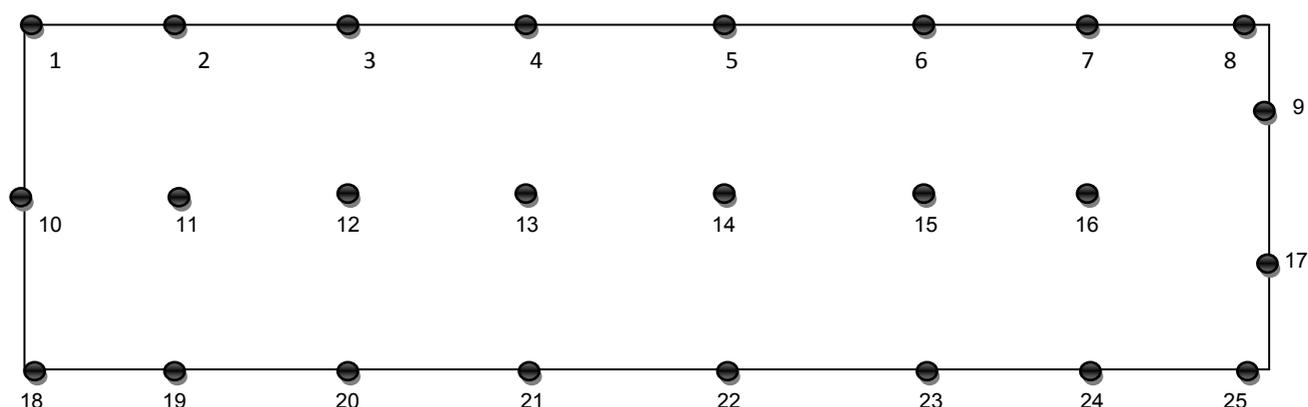


Рис. 1. Схема расположения контрольных марок в стене инженерного объекта

Имитационная модель деформации инженерного сооружения представлена высотными координатами марок H_i (м), $i=1...25$ двух циклов наблюдений $t = 0, t = 1$ (табл. 1) и плановыми координатами X_i, Y_i (м), $i=1...25$ для $t = 0$, которые определены в условной системе координат. Марки расположены не на одном уровне относительно друг друга.

Таблица 1

Имитационная модель деформации инженерного объекта

t	Номера марок / высотные координаты марок H_i (м)				
	N1	N2	N3	N4	N5
0	134.5706	134.6571	134.8893	134.9706	134.9323
1	134.5652	134.6544	134.8862	134.9663	134.9320
	N6	N7	N8	N9	N10
0	135.1501	135.1730	135.1630	134.5652	134.5917
1	135.1478	135.1702	135.1569	134.5411	134.5862
	N11	N12	N13	N14	N15
0	134.4931	134.0622	134.2807	133.7674	133.2632
1	134.4920	134.0602	134.2787	133.7649	133.2591

Окончание табл. 1

t	Номера марок / высотные координаты марок H_i (м)				
	N16	N17	N18	N19	N20
0	133.3223	133.3939	133.4311	133.4882	133.6089
1	133.3211	133.3929	133.4321	133.4885	133.6077
	N21	N22	N23	N24	N25
0	134.9323	134.5917	133.2632	133.6089	134.9323
1	134.9320	134.5862	133.2591	133.6077	134.9323

Этапы моделирования деформации инженерного объекта

Моделирование деформации инженерного объекта по данным табл. 1 выполнено в несколько этапов.

1. По координатам X_i, Y_i, H_i множества контрольных марок на момент времени $t = 0$ в программе MathCad с использованием функции сплайн-интерполяции (степень дискретизации $k = 30$) построена аппроксимирующая сплайн-поверхность A (рис. 2).

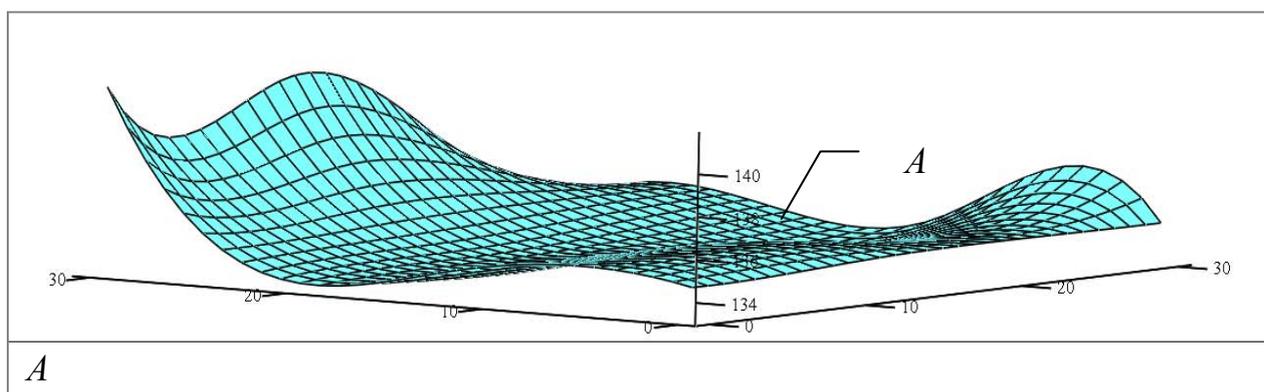


Рис. 2. Аппроксимирующая сплайн-поверхность, момент времени $t = 0$

2. На момент времени $t = 1$ по координатам X_i, Y_i, H_i множества контрольных марок также построена аппроксимирующая сплайн-поверхность $A1$. Для выявления и визуализации деформации объекта выполнено наложение поверхностей A и $A1$ (рис. 3).

По результатам наложения сплайн-поверхностей A ($t = 0$) и $A1$ ($t = 1$) (см. рис. 3) видно, что поверхность A , построенная на момент времени $t = 0$, не совпадает с поверхностью $A1$ на момент времени $t = 1$, что свидетельствует об изменении пространственно-временного состояния объекта. Цветовая заливка поверхностей позволяет видеть области отклонения поверхностей друг от друга, а цифровые модели сплайн-поверхностей $A1$ и $A2$ – определить приращения координат H_i по дискретной сетке поверхности (табл. 2, 3).

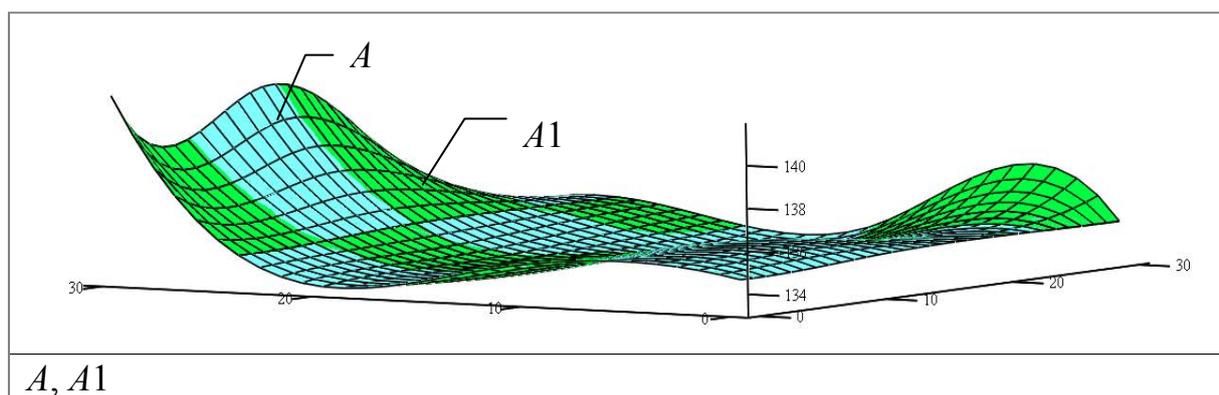


Рис. 3. Сплайн-поверхность A ($t = 0$), сплайн-поверхность $A1$ ($t = 1$)

Таблица 2

Цифровые модели сплайн поверхности A (дискретизация сетки $k = 30$)

	0	1	2	3	4	5	6
0	134.571	134.76	134.912	135.026	135.103	135.144	135.15
1	134.559	134.788	134.956	135.069	135.129	135.143	135.114
2	134.56	134.818	135	135.112	135.161	135.155	135.1
3	134.572	134.851	135.042	135.154	135.195	135.175	135.103
4	134.593	134.885	135.081	135.193	135.23	135.202	135.12
5	134.622	134.918	135.116	135.228	135.263	135.231	135.145
6	134.657	134.95	135.146	135.257	135.291	135.26	135.173
7	134.696	134.98	135.171	135.279	135.313	135.284	135.201
8	134.737	135.006	135.188	135.292	135.326	135.3	135.223
9	134.779	135.028	135.197	135.295	135.329	135.306	135.234
10	134.819	135.044	135.197	135.286	135.317	135.297	135.232
11	134.857	135.053	135.187	135.264	135.29	135.27	135.209
12	134.889	135.054	135.166	135.228	135.246	135.222	135.163
13	134.916	135.047	135.133	135.177	135.182	135.152	135.09
14	134.937	135.034	135.092	135.115	135.104	135.064	134.996
15	134.952	135.016	135.047	135.047	135.019	134.966	...

3. Для расчета предельного значения отклонения поверхности от начального положения $t = 0$ условно выбрано предельно допустимое отклонение значений высотных координат H_i марок $\xi = \pm 0,005$ м. Таким образом, определение предельных положений поверхности объекта производится по формулам

$$H_i(t=0)_{\min} = H_i(t=0) - \xi; \quad H_i(t=0)_{\max} = H_i(t=0) + \xi. \quad (1)$$

Таблица 3

Цифровые модели сплайн-поверхности A_1 (дискретизация сетки $k = 30$)

	0	1	2	3	4	5	6
0	134.565	134.756	134.908	135.022	135.1	135.141	135.148
1	134.554	134.783	134.952	135.064	135.125	135.139	135.111
2	134.556	134.814	134.995	135.107	135.156	135.15	135.096
3	134.568	134.847	135.038	135.149	135.191	135.171	135.099
4	134.59	134.881	135.077	135.189	135.226	135.198	135.116
5	134.619	134.915	135.113	135.224	135.259	135.228	135.141
6	134.654	134.947	135.144	135.254	135.288	135.257	135.17
$A_1 =$ 7	134.693	134.977	135.168	135.276	135.311	135.281	135.198
8	134.734	135.004	135.186	135.29	135.324	135.298	135.22
9	134.776	135.025	135.195	135.293	135.326	135.304	135.232
10	134.816	135.041	135.194	135.283	135.314	135.294	135.229
11	134.854	135.049	135.183	135.26	135.286	135.266	135.205
12	134.886	135.05	135.16	135.222	135.239	135.216	135.157
13	134.913	135.041	135.125	135.168	135.172	135.143	135.081
14	134.933	135.026	135.082	135.102	135.091	135.051	134.984
15	134.948	135.007	135.034	135.032	135.003	134.949	...

По полученным результатам, согласно формулам (1), построены сплайн-поверхности предельных A_{\min} , A_{\max} (нижнего min и верхнего max) положений поверхности объекта (рис. 4–6).

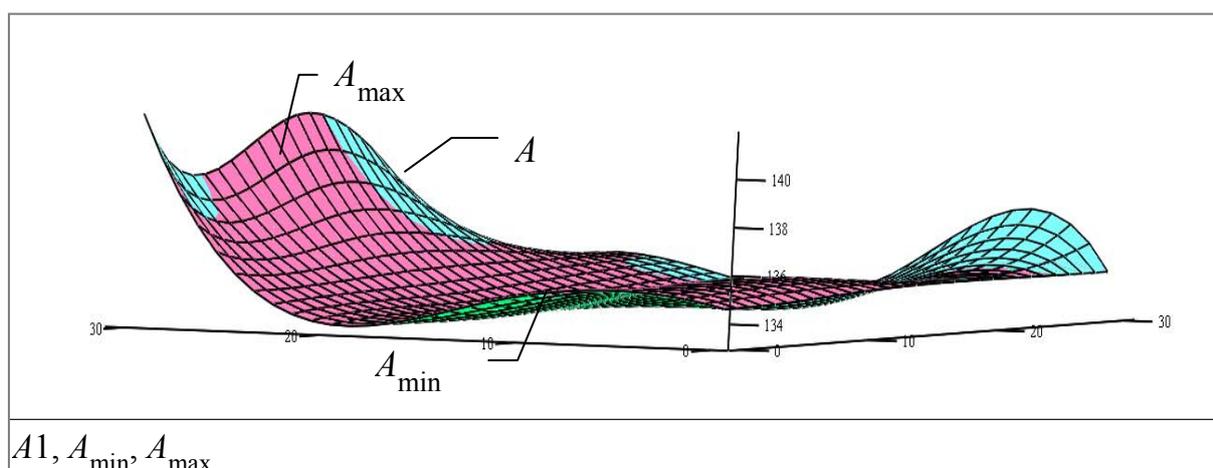


Рис. 4. Совмещенная модель сплайн-поверхностей объекта A ($t = 1$), A_{\min} , A_{\max}

На рис. 5 отображены области пресечения поверхностью $A1$ ($t = 0$) максимально допустимых значений поверхности A_{\max} .

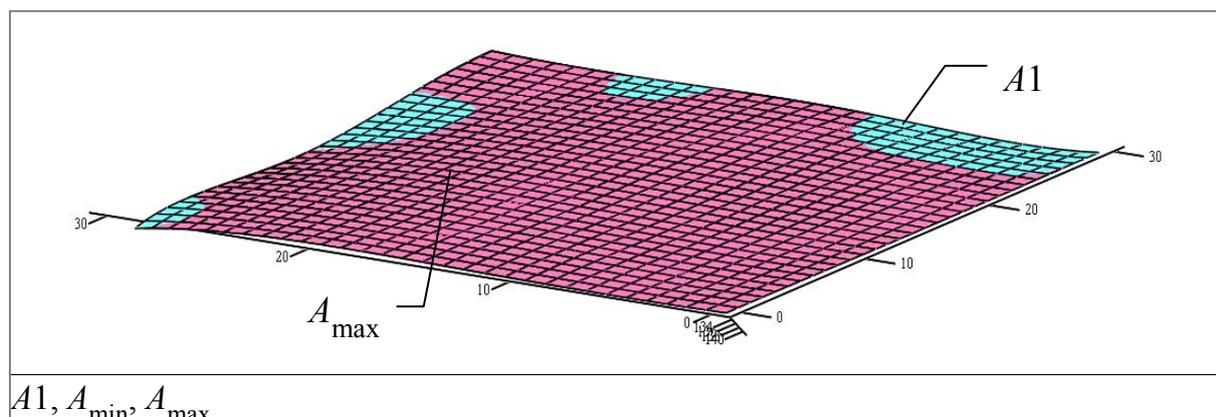


Рис. 5. Визуализация областей поверхности $A1$, превосходящих максимальное значение координат поверхности A_{\max}

На рис. 6 отображены области пресечения поверхностью $A1$ ($t=0$) минимально допустимых значений поверхности A_{\min} .

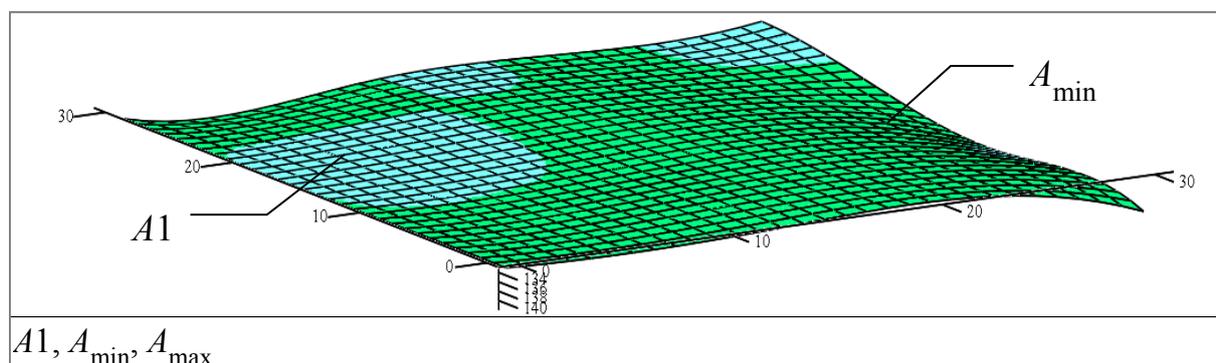


Рис. 6. Визуализация областей поверхности $A1$, превосходящих минимальное значение координат поверхности A_{\min}

Пересечение поверхностью $A1$ предельных ее положений A_{\min} , A_{\max} свидетельствует о деформации объекта.

Заключение

Приведен пример использования метода сплайн-интерполяции для определения деформации инженерного объекта. Представлены результаты трехмерной визуализации деформации инженерного объекта, получены цифровые модели

сплайн-поверхностей, что дает возможность вычислить приращения высотных координат при любой степени дискретизации сетки поверхности и, таким образом, локализовать области деформации объекта [15–20]. Трехмерное моделирование деформации инженерного объекта методом сплайн-интерполяции позволит определить общую картину деформации и предпринять меры для укрепления конструкции сооружения.

Результаты исследований найдут применение при оценке и анализе деформаций в процессе строительства и эксплуатации инженерно-технических систем (зданий и сооружений, дорог, нефте- и газопроводов, при решении задач физической геодинимики), в картографии, экологии и геоинформатике, а также могут быть использованы для определения пространственно-временного состояния технических объектов любой сложности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 22.1.12-2005. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования. – М. : ИПК, Изд-во стандартов, 2005.
2. Бугакова Т. Ю., Вовк И. Г. Определение вращательного движения объекта по результатам многократных геодезических измерений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Раннее предупреждение и управление в кризисных и чрезвычайных ситуациях: предпринимаемые шаги и их реализация с помощью картографии, геоинформации, GPS и дистанционного зондирования» : сб. материалов (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. – С. 88–92.
3. Карпик А. П. Проблемы геодезического обеспечения мониторинга территорий // Анализ и инновации в начале XXI столетия : сб. материалов межрегиональной междисциплинарной научной конференции. – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 13–20.
4. Карпик А. П. Анализ состояния и проблемы геоинформационного обеспечения территорий // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 4/С. – С. 3–7.
5. Хиллер Б., Ямбаев Х. К. Разработка и натурные испытания автоматизированной системы деформационного мониторинга // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 48–61.
6. Мазуров Б. Т. Геодинимические системы (кинематические и деформационные модели блоковых движений) // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 3 (35). – С. 5–15.
7. Neuner H., Schmitt C., Neumann I. Modelling of terrestrial laser-scanning profile measurements with, Proceedings of the 2nd Joint international Symposium on Deformation Monitoring, Nottingham, England, 2013.
8. Geologic-engineering and geomechanical models of the rock mass in the bed of the dam at the Sayano-Shushenskaya HPP / A. I. Savich, M. M. Il'in, V. P. Elkin, V. I. Rechitskii, A. B. Vasova // Power Technology and Engineering. – 2013. – Vol. 47, № 2. – Pp. 89–101.
9. Бугакова Т. Ю. Моделирование изменения пространственно-временного состояния инженерных сооружений и природных объектов по геодезическим данным // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 34–42.
10. Малков А. Г., Кобелева Н. Н. Разработка программы наблюдения за осадками сооружений на основе системного подхода // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 2. – С. 26–30.

11. Novikov Y. A., Shchukina V. N. Preparatory stage for instrumental monitoring and structural inspection of buildings and structures // Proceedings of the International Conference «Actual Issues of Mechanical Engineering» 2017 (AIME 2017). – Pp. 773–778.
12. Мазуров Б. Т. Геодинамические системы (теоретические основы качественного исследования горизонтальных движений) // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 26–35.
13. Асташенков Г. Г., Горохова Е. И. Определение и анализ деформационных характеристик тоннелей в программном комплексе MATLAB // Изв. вузов. Геодезия и аэрофото-съемка. – 2014. – № 4/С. – С. 12–14.
14. Новиков В. Ю. Применение деформационного мониторинга для предотвращения аварий промышленных объектов // Экология и промышленность России. – 2014. – № 2. – С. 46–48.
15. Малков А. Г., Кобелева Н. Н. Системное исследование деформаций сооружений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 221–227.
16. Гордон Л. А., Скворцова А. Е. Актуализация критериев безопасности для основных диагностических показателей плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. – 2013. – № 11. – С. 22–31.
17. Костылев В. С. Применение математической модели «сооружение – основание» к анализу изменений в кинематических показателях бетонной арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС за 2004–2012 гг. // Гидротехническое строительство. – 2013. – № 4. – С. 37–46.
18. Мирсаидов М. М., Султанов Т. З. Оценка напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин с учетом нелинейного деформирования материала и конечных деформаций // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 5. – С. 73–82.
19. Орехов В. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния системы «Здание ГЭС – Грунтовое основание» с учетом поэтапности строительства здания // Вестник МГСУ. – 2014. – № 12. – С. 113–120.
20. Хорошилов В. С., Кобелева Н. Н., Губонин П. Н. Математическое моделирование деформационного процесса для изучения перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС на основе динамической модели (2004–2007 гг.) // Изв. вузов. Строительство. – 2015. – № 2 (686). – С. 49–58.

Получено 21.05.2019

© Т. Ю. Бугакова, 2019

THREE-DIMENSIONAL MODELING OF DEFORMATIONS OF AN ENGINEERING OBJECT WITH SPLINE INTERPOLATION METHOD

Tatiana Yu. Bugakova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Applied Informatics and Information Systems, phone: (383)343-18-53, e-mail: kaf.pi@ssga.ru

An example of using the spline interpolation method for determining and three-dimensional visualization of the deformation of an engineering structure is given. Simulation of deformation of an engineering object is carried out according to the simulation data given of two times $t = 0$ and $t = 1$, and is represented by stages: approximation of the set of control marks with coordinates X_p , Y_p , H_p , installed in the wall of the engineering structure by spline surface; combination of spline surfac-

es built at different times; determination of the permissible limits of change in the position of the surface; determination and visualization of the intersection areas of the spline surface of an object with valid boundaries.

There obtained the results of three-dimensional visualization of the engineering object deformation, as well as digital models of spline surfaces, which makes it possible to calculate the increments of the height coordinates at any degree of discretization of the surface grid and determine the deformation area in digital form.

Key words: deformation, three-dimensional modeling, spline interpolation, approximation, visualization of surface deformation.

REFERENCES

1. GOST R 22.1.12-2005 (2005). Structured system of monitoring and management of engineering systems of buildings and structures. General requirements. Moscow: IPK, Standards Publ. [in Russian].
2. Bugakova, T. Yu., & Vovk, I. G. (2013). Determination of the rotational motion of the object by the results of multiple geodetic measurements. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2013: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: Rannee preduprezhdenie i upravlenie v krizisnykh i chrezvychaynykh situatsiyakh: predprinimaemye shagi i ikh realizatsiya s pomoshch'yu kartografii, geoinformatsii, GPS i distantsionnogo zondirovaniya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: International Scientific Conference: Early Warning and Management in Crisis and Emergency Situations: Action Steps and their Implementation with the Help of Cartography, GIS, GPS and Remote Sensing]* (pp. 88–92). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
3. Karpik, A. P. (2012). Problems of geodetic support of monitoring of territories analysis and innovation at the beginning of the XXI century. In *Sbornik materialov mezhregional'noy mezhdistsiplinarnoy nauchnoy konferentsii [Proceedings of the Interregional Interdisciplinary Scientific Conference]* (pp. 13–20). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
4. Karpik, A. P. (2014). Analysis of the status and challenges of geoinformation support of the territory. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 4, 3–7 [in Russian].
5. Hillier, B., & Yambaev, H. C. (2016). Development and field testing of an automated deformation monitoring system. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(33), 48–61 [in Russian].
6. Mazurov, B. T. (2016). Geodynamic system (kinematic and deformation model of block movements). *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(35), 5–15 [in Russian].
7. Neuner, H., Schmitt, C., & Neumann, I. (2013). Modeling of terrestrial laser-scanning profile measurements with. In *Proceedings of the 2nd Joint international Symposium on Deformation Monitoring*. Nottingham, England.
8. Savich, A. I., Il'in, M., Elkin, V. P., Rechitskii, V. I., & Basova, A. B. (2013). Geological-engineering and geomechanical models of the rock mass in the bed of the dam at the Sayano-Shushenskaya HPP. *Power Technology and Engineering*, 47(2), 89–101.
9. Bugakova, T. Yu. (2015). Modelling of spatial and temporal changes in condition of engineering structures and natural objects on geodetic data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(29), 34–42 [in Russian].
10. Malkov, A. G., & Kobeleva, N. N. (2016). Development of a program for monitoring sediments of co - weapons on the basis of a systematic approach. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2016: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: Vol. 2. International Scientific Conference: Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Survey]* (pp. 26–30). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

11. Novikov, Y. A., & Shchukina, V. N. (2017). Preparatory stage for instrumental monitoring and structural inspection of buildings and structures. In *Proceedings of the International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering 2017 (AIME 2017)* (pp. 773–778).
12. Mazurov, B. T. (2016). Geodynamic system (theoretical foundations of qualitative research horizontal movements). *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(33), 26–35 [in Russian].
13. Astashenkov, G. G., & Gorokhova, E. I. (2014). Definition and analysis of deformation characteristics of tunnels in the software complex MATLAB. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 4/S, 12–14 [in Russian].
14. Novikov, V. Yu. (2014). Application of deformation monitoring to prevent accidents of industrial facilities. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and Industry of Russia]*, 2, 46–48 [in Russian].
15. Malkov, O. G., & Kobeleva, N. N. (2015). A systematic study of deformation of structures. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2015: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2015: Vol. 1. International Scientific Conference: Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Survey]* (pp. 221–227). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
16. Gordon, L. A., & Skvortsova, A. E. (2013). Actualization of safety criteria for the main diagnostic indicators of the Sayano-Shushenskaya dam. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical Construction]*, 11, 22–31 [in Russian].
17. Kostylev, V. S. (2013). Application of the mathematical model "construction – foundation" to the analysis of changes in the kinematic parameters of the concrete arch-gravity dam of Sayano-Shushenskaya HPP for 2004–2012. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical Construction]*, 4, 37–46 [in Russian].
18. Mirsaidov, M. M., & Sultanov, T. Z. (2014). Evaluation of the stress-strain state of ground dams taking into account the nonlinear deformation of the material and finite deformations. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal [Magazine of Civil Engineering]*, 5, 73–82 [in Russian].
19. Orekhov, V. V. (2014). Mathematical modeling of stress-strain state of the system "HPP building – ground base" taking into account the stages of construction of the building. *Vestnik MGSU [Scientific and Engineering Journal for Construction and Architecture]*, 12, 113–120 [in Russian].
20. Khoroshilov, V. S., Kobeleva, N. N., & Gubonin, P. N. (2015). Mathematical modeling of deformation process to study the displacements of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric dam on the basis of a dynamic model (2004–2007). *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [Izvestiya vuzov. Construction]*, 2(686), 49–58 [in Russian].

Received 21.05.2019

© T. Yu. Bugakova, 2019