DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-4-03

ЭВОЛЮЦИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СООРУЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Г. Н. Гусев[а], Р. В. Цветков[б]

Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация

[а] ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9072-0030, ✍ gusev.g@icmm.ru

[б] ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9617-407X, flower@icmm.ru

Аннотация: в данной работе рассмотрена история эволюции напряженно-деформированного состояния группы зданий, которые расположены над строящимся Главным разгрузочным коллектором г. Перми. История наблюдений включает в себя математическое моделирование деформационного поведения всей группы зданий и близлежащего грунтового массива, а также данные мониторинга за период более четырнадцати лет. Созданы и верифицированы конечно-элементные модели группы зданий, на основе которых осуществляется прогнозирование деформационных параметров сооружений. В работе также освещен опыт проектирования, внедрения и использования систем интеллектуального мониторинга на этом объекте. Численное моделирование осуществлено с помощью CAE ANSYS и PLAXIS.

Ключевые слова: интеллектуальный мониторинг деформированного состояния, математическое моделирование, техногенное воздействие, депрессия, неравномерные осадки сооружения.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124020700047-3.

Для цитирования: Гусев Г. Н., Цветков Р. В. Эволюция деформационных параметров сооружения в условиях техногенного воздействия. *Успехи кибернетики*. 2024;5(4):25–30. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-4-03.

Поступила в редакцию: 07.10.2024. *В окончательном варианте: 04.11.2024.*

EVOLUTION OF STRAIN IN STRUCTURES EXPOSED TO ARTIFICIAL LOADS

G. N. Gusev[a], R. V. Tsvetkov[b]

Institute of Continuous Media Mechanics Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

[a] ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9072-0030, ✍ gusev.g@icmm.ru

[b] ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9617-407X, flower@icmm.ru

Abstract: we analyzed the evolution of the stress-strain state of a group of buildings located above the main sewage collector in Perm. Our study combines the simulation of the structure's strain behavior and the surrounding soil with monitoring data collected over more than fourteen years. We developed and verified FEM models for a group of buildings to predict their strain parameters. We also presented the design, implementation, and application of intelligent monitoring systems at this site. We used such CAE tools as ANSYS and PLAXIS, providing insights into the long-term structural and geotechnical behavior of the area. Our findings contribute to advancing techniques for monitoring and managing the impact of underground infrastructure on urban buildings.

Keywords: intelligent strain monitoring, simulation, artificial loads, depression, uneven structure settlement.

Acknowledgements: this study is a part of government order 124040500016-9.

Cite this article: Gusev G. N., Tsvetkov R. V. Evolution of Strain in Structures Exposed to Artificial Loads. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(4):25–30. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-4-03.

Original article submitted: 07.10.2024. *Revision submitted: 04.11.2024.*

Достоверная оценка надежности и эксплуатационной безопасности сооружений на всех этапах жизнедеятельности возможна только при использовании совокупности сложных структурных математических моделей систем «здание — фундамент — грунтовое основание», различающихся набором

лежащих в их основе гипотез, уровнем абстрагирования, адекватностью и областью применимости. Перераспределение напряжений в грунтовом массиве, которое вызвано строительством подземных сооружений, может длиться долгие годы и усугубляться нештатными ситуациями, такими как понижение уровней грунтовых вод в сопряженных со строительством горизонтах. Это приводит к существенным оседаниям земной поверхности и, как следствие, к развитию непроектных деформаций в существующих сооружениях, которые находятся в непосредственной близости. Наиболее информативным способом прогнозировать деформационное поведение строительных конструкций в таких условиях является использование методов конечно-элементного моделирования в совокупности с интеллектуальным мониторингом деформационных параметров сооружений [1, 3]. Такой подход благодаря комплексной инструментальной базе позволяет контролировать большое число различных параметров системы «здание — фундамент — грунтовое основание».

Система интеллектуального мониторинга — это комплекс мероприятий, который призван обеспечить безаварийную и бесперебойную работу ответственных инженерных сооружений на всем периоде их жизнедеятельности [4, 5]. Данный комплекс мероприятий строго иерархичен, подчиняется жесткой логике проектирования, внедрения и развития систем и включает в себя различные этапы. К ним относятся: техническое обследование строительных конструкций, математическое моделирование объекта мониторинга с оценкой критических состояний как всего сооружения, так и отдельных элементов в условиях предполагаемой эксплуатации, оценка вариантов развития аварийных ситуаций по вероятным сценариям нарушения работоспособности, разработка, проектирование и реализация систем мониторинга деформационного состояния в условиях эксплуатации [6]. Все этапы являются важными и необходимыми в смысле составляющей любой действующей системы интеллектуального мониторинга деформационного состояния строительных объектов. Все они в полной мере были реализованы на описываемом объекте.

История формирования проблемы

Основной задачей исследования изначально являлось определение причин возникновения неравномерных осадок фундаментных конструкций ТРК (торгово-развлекательного комплекса) в г. Пермь, впоследствии повлекших за собой повреждение основных несущих конструкций сооружения и признание части его аварийным и непригодным к эксплуатации.

Торгово-развлекательный комплекс площадью более 82 000 м^2 состоит из шести блоков: «A», «B», «C» (блоки первой очереди) и «D», «D1», «D2» (блоки второй очереди), разделенных деформационными швами. Комплекс был введен в эксплуатацию в 2004 г. — первая очередь, в 2008 г. — вторая очередь. В 2009–2010 гг. вдоль длинной его стороны на глубине 25–30 м велось строительство Главного разгрузочного коллектора г. Перми. Диаметр ствола коллектора составил 6 м. Проходка и строительство как самого коллектора, так и разгрузочных шахт велись по технологии, которая предусматривала водопонижение по всем водоносным горизонтам в зоне строительства (два в аллювиальной толще и один по кровле коренных пород). Понижение уровней грунтовых вод, по данным измерений, произошло на 6–8 м по двум верхним горизонтам. На 2007 г. отметка уровня первого горизонта составляла 143 м. На рисунке 1 показана зона депрессии, приуроченная к одной из разгрузочных шахт, рядом с которой производилась откачка воды из двух водопонижающих скважин. Осушение активной толщи аллювиальных грунтов привело к развитию неравномерных осадок по всей площади ТРК и сопряженной с ней территории автопарковки, которая попала в зону развития депрессии. Величины осадок свободной земной поверхности составили порядка 30 см (рис. 2).

В 2010 г. основные несущие конструкции блоков первой очереди стали накапливать деформации, которые привели к образованию дефектов в несущих конструкциях сооружений. В связи с конструктивными особенностями сооружений, виды дефектов и их величины существенно разнились. Наиболее пострадавшими от развития незапланированных неравномерных осадок стали блоки первой очереди — «A», «C» и «B», которые были расположены максимально близко к зоне развития депрессии. Блок «B» в 2010 г. был признан аварийным, выведен из эксплуатации и демонтирован. В 2012 г. был спроектирован, построен и в 2015 г. введен в эксплуатацию новый блок «B» на месте старого сооружения. Блоки «A» и «C» были отремонтированы и частично усилены.

С 2010 г. сотрудниками лаборатории интеллектуального мониторинга ИМСС УрО РАН, г. Пермь ведутся работы по научно-техническому сопровождению данного объекта. Был реализован беспрецедентный проект по исследованию причин развития аварийной ситуации, который включил в себя

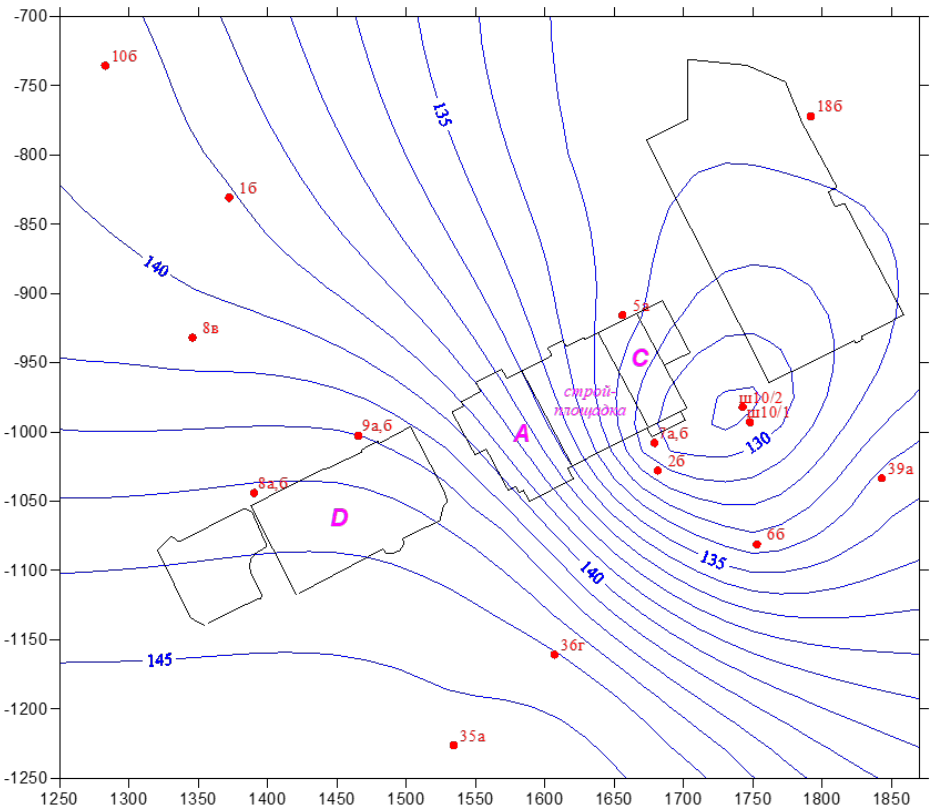

Рис. 1. *Карта пьезоизогипс (м. абс.) в районе ТРК на 11.01.2012 г. Буквами A, C, D обозначены блоки первой и второй очередей комплекса*

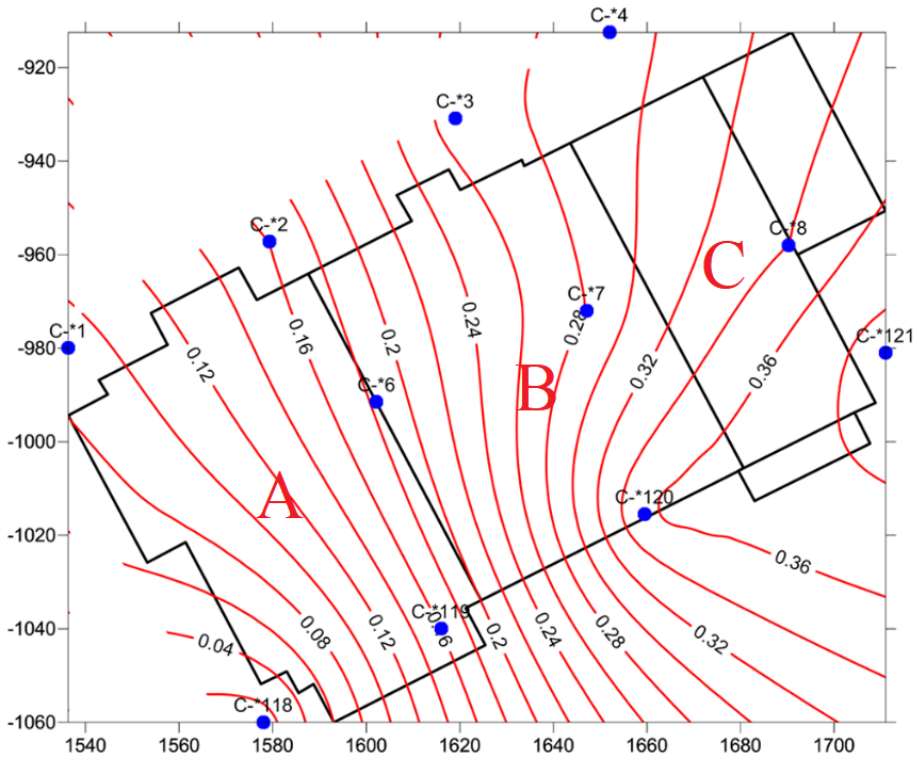

Рис. 2. *Схема распределения осадок земной поверхности при снижении уровней подземных вод на территории корпусов A, B и C ТРК (прямое использование данных лаборатории по модулям деформаций), м*

комплекс инженерно-геологических, гидрогеологических и физико-технических изысканий. На основе исследований получена и верифицирована группа математических моделей на базе программных комплексов ANSYS и PLAXIS, которые позволили установить причину развития неравномерных осадок в сооружениях и в совокупности с методами интеллектуального мониторинга осуществлять прогнозирование технического состояния данной группы зданий.

Интеллектуальный мониторинг

Работы по научно-техническому сопровождению комплекса зданий ТРК начались с изучения проектно-технической документации и проведения ряда специальных исследований. В 2010 г. по результатам изучения материалов было принято решение о создании комплексной системы деформационного мониторинга на несущих конструкциях зданий для регистрации процесса развития неравномерных осадок. Были разработаны и смонтированы на несущие колонны блоков датчики-гидронивелиры с возможностью автоматической регистрации положения мениска гидронивелировочной жидкости в измерительном контуре для каждой контрольной точки [2]. Всего на конструкции зданий было размещено больше 100 различных датчиков, которые в постоянном режиме с 2011 г. производят измерения вертикальных перемещений (рис. 3). С 2012 г. на территории комплекса организовано 12 стационарных наблюдательных скважин, настроенных на измерение уровня грунтовых вод в 2-х горизонтах, приуроченных к аллювиальной толще грунтового массива (рис. 3).

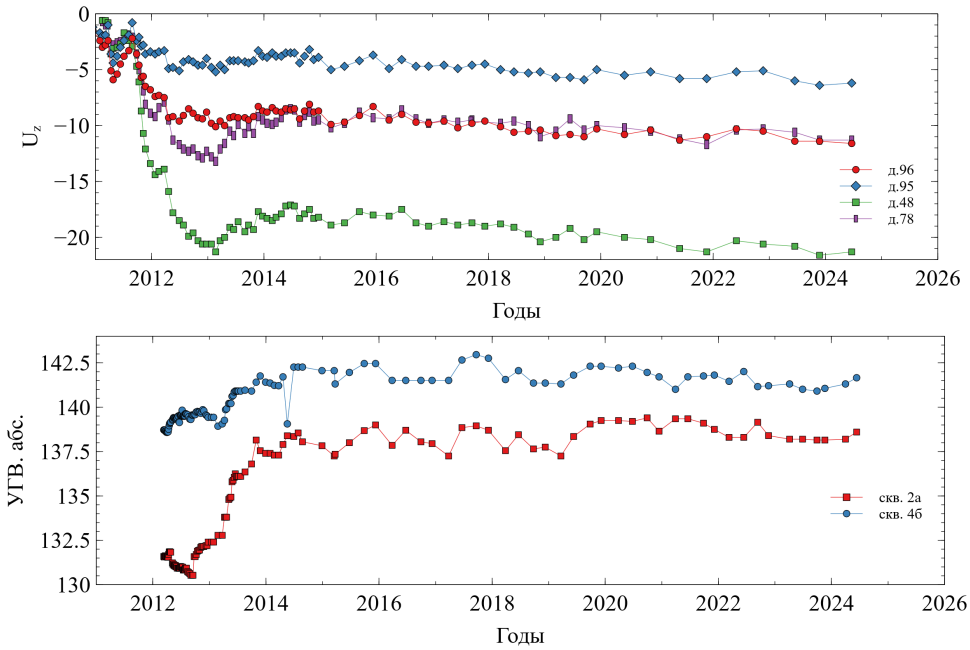

Рис. 3. *Показания части датчиков контроля вертикальных перемещений (д.48 и д.78 — Блок «С», д.95 и д.96 — Блок «А») — U_z, мм и абсолютных значений уровня грунтовых вод (УГВ. абс., м) для двух скважин в 2-х горизонтах*

Используя методы численного моделирования с помощью двух комплексов программ (CAE ANSYS и PLAXIS), были созданы конечно-элементные (КЭ) модели всего комплекса зданий в совокупности с окружающим грунтовым массивом, который формировал активную толщу грунта. Алгоритм исследований выглядит следующим образом. В первую очередь, на основе данных изысканий, к которым относятся и результаты технического обследования строительного объема всех сооружений, строятся КЭ модели комплекса сооружений в CAE ANSYS и PLAXIS. Если в комплексе ANSYS упор в построении модели сделан на подробном описании несущих систем конструктивных элементов зданий, то в комплексе PLAXIS максимально правдоподобно реализуется модель грунтового массива в совокупности с водоносными горизонтами. Далее, основываясь на данных изысканий, которые проведены после аварии и организации депрессионной воронки, в первой модели на CAE PLAXIS моделируется процесс водопонижения в активной толще грунтового массива. Далее модель верифицируется данными

натурных измерений, которые выполнены на территории комплекса методом цифрового геодезического нивелирования. Геодезическое нивелирование осуществлено не только по земной поверхности, но и по всем несущим перекрытиям комплекса зданий.

На следующем шаге данные из первой модели в виде поля перемещений (рис. 4) передают во вторую КЭ модель, созданную на базе CAE ANSYS и формируют граничные условия.

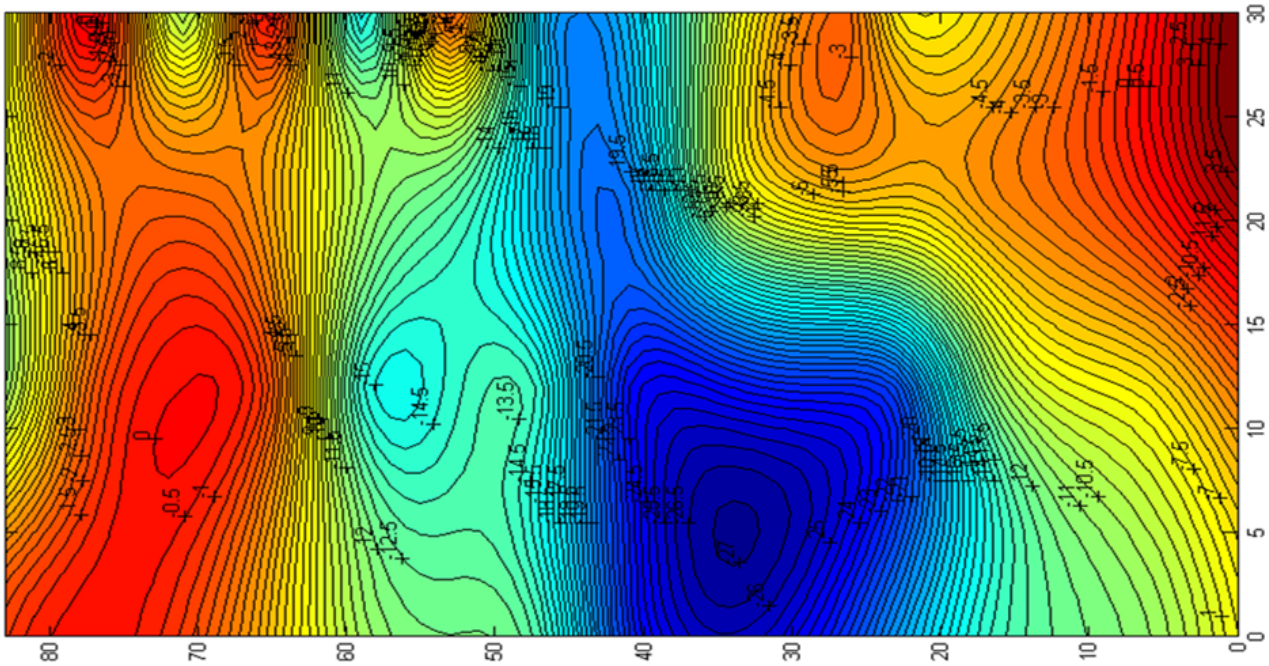

Рис. 4. *Поле вертикальных перемещений для блока «С». Длина и ширина блока в м. Значения перемещений на изолиниях в мм*

Выполняются расчеты напряженно-деформированного состояния всего массива сооружений. По результатам расчетов производится оценка потенциально аварийных мест комплекса и реализуются отдельно разработанные мероприятия по усилению части конструкций. Действующая система мониторинга контролирует развитие величин осадок и изменения уровня грунтовых вод и в связке с математическими моделями позволяет прогнозировать изменение деформационного состояния несущих конструкций комплекса. На рисунке 5 приведен пример результатов расчета вертикальных перемещений всего здания блока «С» по результатам изысканий.

Заключение

С 2010 г. специалистами лаборатории интеллектуального мониторинга ИМСС УрО РАН произведен большой объем работ по анализу деформационного поведения группы сооружений, которые подверглись техногенному воздействию. Посредством методов интеллектуального мониторинга выявлены и верифицированы закономерности взаимодействия элементов в системе «здание — фундамент — грунтовое основание», которые включают в себя следующие параметры: уровни грунтовых вод в горизонтах активной толщи грунта; различные вариации нагрузок, как временных, так и постоянных на несущих конструкциях комплекса; температурные воздействия при смене времен года и поддержании заданной температуры в помещениях ТРК посредством систем обогрева и кондиционирования; вибрационное воздействие от рельсового транспорта, линии которого проходят через блок «D» ТРК по несущим конструкциям и т. д. С помощью методов мониторинга деформационного состояния и методов математического моделирования созданы прогнозы эволюции деформированного состояния всего массива зданий и близлежащего грунтового массива. Часть прогнозов позволила не допустить развития аварийных ситуаций и произвести своевременное усиление несущих конструкций и их ремонт. Результаты мониторинга легли в основу регламента эксплуатации сооружения. В связи с тем, что процессы накопления осадок продолжаются, мониторинг ведется непрерывно по сей день.

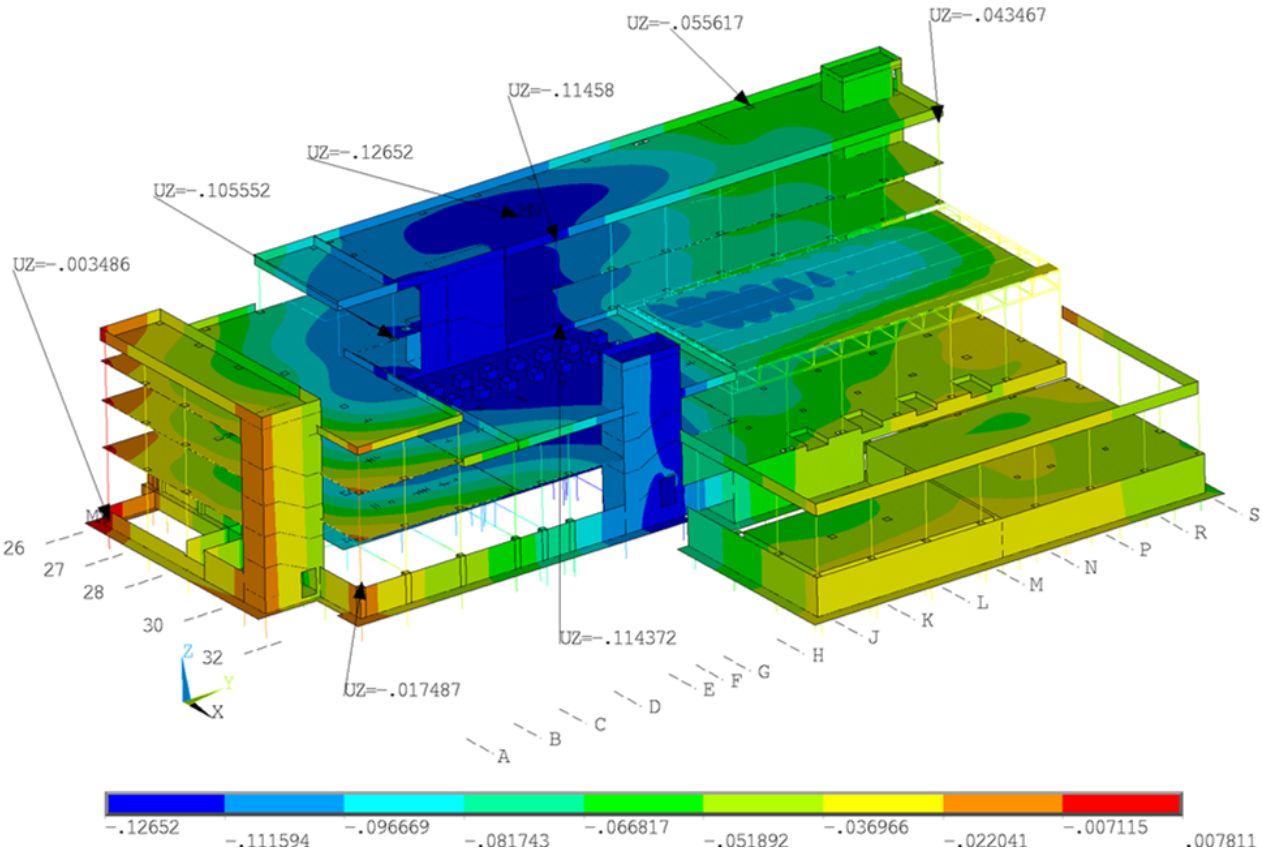

Рис. 5. *Изополя вертикальных перемещений конструкции блока «С», м*

ЛИТЕРАТУРА

1. Tsvetkov R., Shardakov I., Shestakov A., Gusev G., Epin V. Deformation Monitoring of Load-Bearing Reinforced Concrete Beams. *Procedia Structural Integrity.* 2017;5:620–626. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.07.028.
2. Epin V. V., Tsvetkov R. V., Shestakov A. P. Application of Feature Recognition to Hydrostatic Leveling Systems. *Measurement Technique*. 2016;59:405. DOI: 10.1007/s11018-016-0980-7.
3. Бартоломей М. Л. Численный анализ процесса развития трещин при неравномерных осадках сооружения. *Вычислительная механика сплошных сред*. 2012;5(2):217–224.
4. Farrar C. R., Worden K. An Introduction to Structural Health Monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2007;365:303–315. DOI: 10.1098/rsta.2006.1928.
5. Radulescu V., Radulescu G., Naș S., Radulescu A., Radulescu C. Structural Health Monitoring of Bridges under the Influence of Natural Environmental Factors and Geomatic Technologies: A Literature Review and Bibliometric Analysis. *Buildings*. 2024;14:2811. DOI: 10.3390/buildings14092811.
6. Faraz C., Segbedji J., Muhammad T., Shaista A. Structural Health Monitoring (shm): Advances, Methods and Applications. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*. 2024;06:2412–2417. DOI: 10.56726/IRJMETS61792.