

05.11.13

# КОНТРОЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕСТРУКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Е.С. Панькина, Н.В. Дорофеев, А.В. Греченева

ФГБОУ ВО «Владимирской государственной университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых», г. Владимир

В данной статье предлагается алгоритм контроля образования деструктивных процессов в геотехнических системах. Предлагаемый алгоритм на практике корректирует диапазон допустимых параметров геотехнической системы на основе комплексной обработки данных о внешних факторах и комбинаций реакций системы, построенного на основе теории бифуркаций. По результатам работы алгоритма происходит формирование оценки изменения состояния геотехнической системы. В статье так же описаны результаты практического применения разработанного алгоритма на основе данных геотехнического мониторинга (наблюдения осуществлялись с 2016 по 2021 год) параметров грунтового основания, а также физико-механических параметров элементов конструкций фундамента и сооружения. В качестве сооружения выступало трехэтажное здание, возведенное на кирпичном ленточном фундаменте. Объект исследования находится в г. Муроме Владимирской области. В ходе применения разработанного алгоритма были выделены наиболее уязвимые ключевые точки геотехнической системы в которых развиваются скрытые деструктивные процессы. Полученные результаты также подтверждаются результатами моделирования в ЛИРА-САПР напряжений в конструкции фундамента здания при изменении долей природной влажности верхних слоев грунта. Таким образом, хотя в решении задач геотехнического мониторинга и оценки устойчивости геотехнических систем существует множество подходов, тем не менее постоянно возникающие за проектные ситуации, приводящие к возникновению аварий и катастроф техногенного и природного характера, показывают их не высокую эффективность. Поэтому, применение разработанного алгоритма актуально при прогнозировании устойчивости геотехнической системы за счет коррекции в динамическом режиме допустимых пределов варьирования физико-механических параметров устойчивости геотехнической системы, полученных в проектных расчетах.

*Ключевые слова:* алгоритм, контроль, процесс, геотехническая система, деструктивный.

## ВВЕДЕНИЕ

Процесс длительной эксплуатации геотехнических систем городского типа сопряжен с постоянным изменением качественных и количественных показателей их физико-механических параметров, обусловленным развитием соседних геотехнических систем, изменением общих нагрузок на грунтовое основание, усталостными явлениями в свойствах материалов, а также наличием внешних периодических техногенных и климатических воздействий. В практике строительства и надзора за эксплуатацией инженерных сооружений промышленного и жилого типа предусмотрено выполнение расчетов предельных нагрузок, до достижения которых конструкция сооружения и геотехническая система в целом сохраняет свою устойчивость. Однако известны случаи развития предаварийных и аварийных ситуаций, являющихся следствием незначительного выхода одного или нескольких физико-механических параметров конструкций сооружения за пределы расчетных значений [1, 2], либо синергетического воздействия факторов, не учтенных в строительных расчетах [3, 4]. Это обусловлено неполнотой математической модели, принимаемой в теории сопротивления материалов, лежащей в основе большинства традиционных методик расчетов устойчивости конструкций сооружений. Модели такого типа, как

правило, не учитывают возможные комбинации воздействий внешних факторов на геотехническую систему, а также возможные комбинации её реакций, оказывающих дополнительное взаимовлияние на элементы геотехнической системы. Именно такие условия приводят к развитию скрытых деструктивных процессов в геотехнических системах, так как неучтенные суммарные воздействия определенных факторов, либо их комбинаций, приводят к изменением допустимых предельных нагрузок и пределов устойчивости, заложенных в расчетной строительной документации объекта.

Одной из приоритетных задач мониторинга геотехнической устойчивости является выявление и прогнозирование начальных фаз развития скрытых деструктивных процессов в геотехнических системах. В решении задач подобного класса достигнуты научно-практические результаты, описанные в работах российских и зарубежных авторов [5-8]. Приоритетным направлением в данном случае выступает комплексирование методов геодинамического и деформационного мониторинга элементов геотехнической системы (грунтового основания, фундаментов и конструкций сооружений) [9,10]. Эффективность такого подхода заключается в проработанности алгоритмов комплексной обработки данных геодинамического и деформационного мониторинга, а также достижении адекватности моделей, используемых при прогнозировании

геотехнической устойчивости. Однако, постоянно возникающие за проектные ситуации, приводящие к возникновению аварий и катастроф техногенного и природного характера, определяют актуальность дальнейшего развития средств мониторинга и контроля в геотехнических системах.

Целью работы является разработка алгоритма контроля образования деструктивных процессов в геотехнических системах, позволяющего прогнозировать состояние геотехнической системы с учетом воздействия комбинаций внешних факторов и комбинаций реакций системы, построенного на основе теории бифуркаций.

### АЛГОРИТМ КОНТРОЛЯ

Скрытые деструктивные процессы, протекающие в геотехнических системах, характеризуются постепенной деградацией физико-механического состояния материалов конструкций сооружения и грунтового основания, и не проявляются до начала развития необратимых процессов разрушения. Одной из причин их возникновения являются воздействия на геотехническую систему одного или нескольких внешних факторов (вибрационная, температурная, климатическая, ветровая нагрузка и др.), а также реакции элементов геотехнической системы на оказанные воздействия (изменение полей напряжений, деформаций, перераспределение нагрузок). При построении алгоритма выделения скрытых деструктивных процессов (рис. 1) предлагается использовать бифуркационный подход [4, 11], позволяющий выделять критические сочетания уровней воздействующих факторов и реакций геотехнической системы, приводящих к ее резкому переходу в неустойчивое состояние.

Согласно предлагаемому алгоритму, первоначально осуществляется построение математической модели геотехнической системы на основе базовой модели [11] с учетом особенностей и ограничений, свойственных конкретной геотехнической системе, среди которых, в основном, следует выделить: план сооружения, тип фундамента, удельный вес элементов сооружения, проценты износа, геологический разрез, уровень вибрационного фона, уровень допустимых предельных нагрузок.

Размещение систем мониторинга предлагается осуществлять в ключевых точках контроля, являющихся наиболее информативными и определяемых согласно подходу, описанному в работе [12]. В таком случае, анализу подвергаются передаточные функции компонентов геотехнической системы (грунтовое основание – фундамент – сооружение), в результате которого происходит локализация деструктивных процессов. Регистрацию физико-механических параметров сооружения предлагается осуществлять с использованием системы деформационного мониторинга,

позволяющей регистрировать углы отклонения осей от вертикали, собственные и вынужденные частоты колебаний, акселерограммы, уровень механических напряжений и усилий в элементах конструкции.

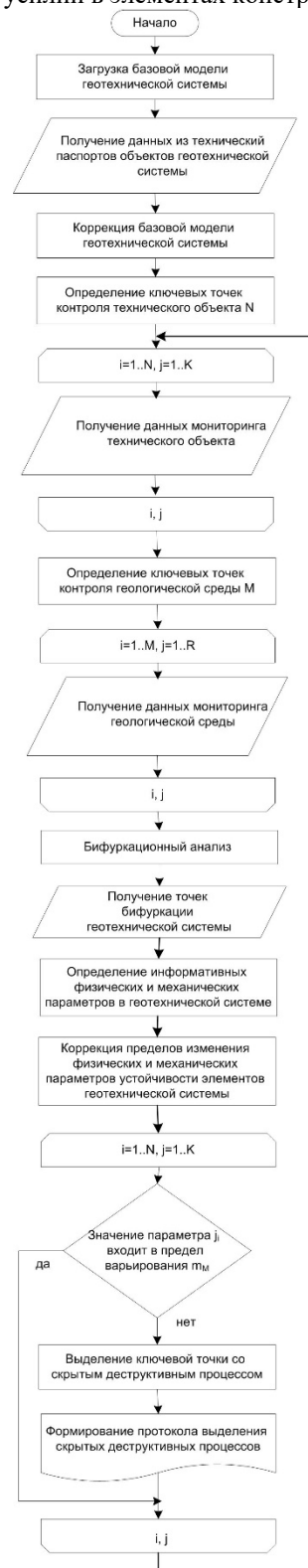


Рис. 1. Разработанный алгоритм

В систему подобного класса входит сеть акселерометрических и тензометрических датчиков, размещенных в контрольных точках конструкции сооружения. Регистрацию уровня воздействия внешних факторов предлагается осуществлять с использованием системы геоэлектрического мониторинга, позволяющей регистрировать параметры влагонасыщенности и вибрационного фона в грунтовом основании.

Адаптивная обработка разнородных данных геотехнического мониторинга осуществляется согласно подходу, описанному в работе [13]. После этого, полученные данные заносятся в скорректированную модель геотехнической системы, нахождение решений которой позволяет произвести бифуркационный анализ. Особенностью бифуркационного анализа является определение комбинаций критических значений параметров воздействующих факторов и значений физико-механических параметров материалов геотехнической системы, малая вариация которых приводит к переходу геотехнической системы в неустойчивое состояние. В результате, моделирование множественных взаимодействий и реакций геотехнической системы позволяет среди набора физико-механических параметров элементов геотехнической системы, а также среди совокупности воздействующих факторов выделить наиболее информативные, подлежащие дальнейшему мониторингу. На основании полученных бифуркационных диаграмм осуществляется корректировка пределов варьирования исследуемых параметров геотехнической системы, а также пределов ее устойчивости.

Выделение скрытых деструктивных процессов, протекающих в геотехнической системе, осуществляется на основе анализа попадания регистрируемых параметров в скорректированные пределы варьирования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Апробация разработанного алгоритма выделения скрытых деструктивных процессов осуществлялась на основе данных геотехнического мониторинга параметров грунтового основания, а также физико-механических параметров элементов конструкций фундамента и сооружения здания. Объектом исследований являлось трехэтажное здание, возведенное на кирпичном ленточном фундаменте (Владимирская область, г. Муром, ул. Радиозаводское шоссе 23). Наблюдения осуществлялись с сентября 2016 года по февраль 2021 года. Причиной выбора объекта мониторинга являлась периодическая обводненность в подвальных помещениях здания, вызванная сезонными паводками и изменением уровня грунтовых вод. Для регистрации частот колебаний и углов отклонения от вертикали

сооружения в контрольных точках были размещены акселерометрические датчики (количество датчиков составило  $n=28$ ), для регистрации напряжений и усилий в контрольных точках конструкции фундамента были размещены тензодатчики (количество датчиков  $n=18$ ). Регистрация трендов параметров водонасыщенности грунтового основания и уровня вибрационного шума осуществлялась посредством геоэлектрического мониторинга, с периодичностью 4 раза в сутки.

В результате обработки массива данных в период с 2016 по 2017 г. с использованием разработанного алгоритма выделения скрытых деструктивных процессов было установлено, что наибольшее влияние на устойчивость исследуемой геотехнической системы оказывает динамика параметров обводненности грунтового основания. В свою очередь, в ходе анализа данных согласно бифуркационному подходу было подтверждено значительное снижение допустимых значений предела упругости в ключевых точках конструкции фундамента сооружения при малых вариациях коэффициента обводненности грунтового основания. Полученные зависимости изменения предела упругости материалов фундамента сооружения от возникающих механических напряжений с учетом уровня обводненности грунтового основания коррелируют с результатами аналогичных исследований [14] и приведены на рис. 2.

Согласно рис. 2, расчетный предел упругости элементов фундамента (32,2-35,1МПа) значительно снижается при изменении коэффициента обводненности грунтового основания, что приводит к изменению допустимых пределов упругости: при  $W=0.05$   $E_b=32,2-35,1$ МПа (расчетные условия); при  $W=0.15$   $E_b=30,7-32,0$ МПа; при  $W=0.35$   $E_b=26,8-28,2$ МПа; при  $W=0.55$   $E_b=24,9-25,3$ МПа.

Полученные в ходе применения разработанного алгоритма результаты также подтверждаются результатами моделирования в ЛИРА-САПР напряжений в конструкции фундамента здания при изменении долей природной влажности верхних слоев грунта. Грунтовое основание состояло из 5 слоев, характеристики каждого из которых приведены в табл. 1.

В ходе моделирования доли влажности изменялись с шагом в 10 единиц, при этом пропорционально увеличивался удельный вес грунта. Расчет был проведен с учетом собственного веса всех элементов конструкции исследуемого здания по закону Кулона-Мора, учитывающего деформацию грунтового основания (рис. 3).

Моделирование показало, что при повышении влагонасыщенности грунтового основания происходят деформации, приводящие к возникновению концентраций изополей напряжений в наиболее уязвимых элементах конструкции, что

полностью согласуется с результатами, полученными с использованием разработанного алгоритма выделения скрытых деструктивных процессов.

Табл. 1. Характеристики грунта

Параметр	Суглинок	Суглинок без $W$	Суглинок с $W$	Песок	Глина полутвердая
Модуль деформации	9000	8000	8000	18000	10000
Коэффициент Пуассона	0,35	0,35	0,35	0,3	0,42
Удельный вес грунта	17	18	10	10,2	9,55
Природная влажность, доли	0,25	0,25	0,36	0,17	0,02
Показатель текучести	0,2	0,3	0,3		0,5
Вода			$W$	$W$	$W$
Коэффициент пористости	0,7	0,72	0,72	0,68	0,8
Удельное сопротивление	5	6	6	0,1	20
Угол внутреннего трения	16	22	22	30	16
Предельное напряжение растяжения	0,981	0,196	1,569	3,923	9,81
Коэффициент пропорциональности	700	1200	700	1592	1680

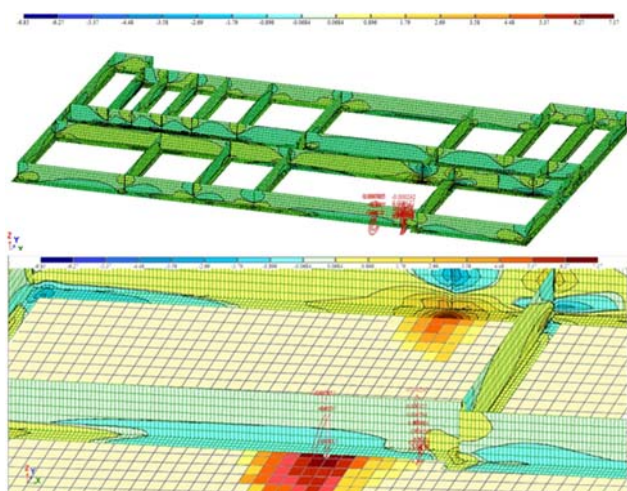


Рис. 3. Результаты моделирования ЛИРА-САПР для грунтового основания с долей влажности  $W=0.25$

В ходе дальнейших наблюдений за динамикой физико-механических параметров исследуемой геотехнической системы был отмечен факт образования и дальнейшего развития трещины в конструкции внешней несущей стены подвального помещения и первого этажа здания. В дальнейшем, развитие данной трещины привело к образованию трещины в конструкции внутренней стены первого этажа здания (рис. 4).

Причиной развития данной трещины являлась неравномерная концентрация напряжений в элементах конструкции фундамента, вызванная упруго-пластическими деформациями обводненного грунтового основания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований был разработан и описан алгоритм, позволяющий повысить эффективность систем геотехнического мониторинга при регистрации скрытых деструктивных процессов. Особенностью алгоритма является учет и анализ малых вариаций динамики воздействующих факторов и реакций геотехнической системы с использованием бифуркационного подхода. Использование описанного алгоритма при анализе данных ключевых точек геотехнического мониторинга позволило выявить развитие скрытого деструктивного процесса на примере реального объекта, что также было согласовано с результатами моделирования. Коррекция допустимых значений контролируемых параметров из-за возможности развития деструктивных процессов с вероятностью 0,81 была осуществлена за 1,4 месяца до начала фиксации момента развития деструктивных процессов системой мониторинга без разработанного алгоритма. В дальнейшем это позволило не только локализовать участки геотехнической системы с наименьшей устойчивостью, но и выделить факторы, оказывающие наибольшее влияние на устойчивость геотехнической системы в целом. Следует отметить, что разработанный алгоритм дополняет существующие алгоритмы, применяемые в системах геотехнического мониторинга [15-21], и отличается возможностью коррекции допустимых пределов изменения параметров мониторинга. Таким образом, предлагаемый алгоритм направлен на решение проблемы оценки состояния конструкции сооружения в условиях априорной неопределенности [22].



Рис. 3. Развитие деструктивного процесса

Применение разработанного алгоритма позволит в динамическом режиме корректировать допустимые, полученные в проектных расчетах, пределы варьирования физико-механических параметров устойчивости геотехнической системы, с учетом актуального уровня нагрузок и воздействий внешних факторов.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МД-1800.2020.8

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Колесников, А.О. Расчет вертикальной жесткости фундамента с учетом взаимного влияния свай [Текст] / А.О. Колесников, Т.Н. Костюк, В.Н. Попов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2019. – № 3. – С. 229–236.
2. Иноземцев, В.К. Бифуркационные задачи устойчивости высотного объекта [Текст] / В.К. Иноземцев, С.А. Жесткова // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2016. – № 4. – С. 53–57.
3. Назаров, Д.И. Разрушение конструкций горнотехнического здания, энергетический и бифуркационный анализ [Текст] / Д.И. Назаров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 7. – С. 95–100.
4. Monteiro, L.H.A., “A discrete-time dynamical system with four types of codimension-one bifurcations,” *Applied Mathematics and Computation*, vol. 354, pp. 189–191, 2019
5. Перспективы развития систем геотехнического мониторинга [Текст] / В.В. Смирнов [и др.] // ГИАБ. – 2014. – №S4. – С. 191-198.
6. Ayberk, K., “Geotechnical assessment of a slope stability problem in the Citlakale residential area,” *Bulletin of Eng. Geology and the Environment*, vol. 3, pp. 875–889, 2017.
7. Fan, Y.B., Yang, S.W., Xu, L.K., Feng, C. and Liang, B.F., “Real time monitoring instrument designed for the deformation and sliding period of colluvial landslides,” *Bulletin of Eng. Geology and the Environment*, vol. 3, pp. 829–838, 2017.
8. Лебедев, М.О. Обеспечение безопасности при строительстве двухпутного тоннеля метрополитена в четвертичных отложениях [Текст] / М.О. Лебедев // ГИАБ. – 2019. – №3. – С. 88-96.
9. Конюшков, В. В. Комплексный анализ результатов инженерных изысканий для проектирования, строительства и эксплуатации сооружений на территориях со склоновыми процессами [Текст] / В.В. Конюшков, А.А. Веселов, Л.Н. Кондратьева // Известия ТПУ. – 2017. – №11. – С. 111-125.
10. Кулешов, А. П. К вопросу обработки результатов геотехнического мониторинга за осадками сооружений [Текст] / А.П. Кулешов, В.В. Пендин // Известия ТПУ. – 2019. – №8. – С. 190-204.
11. Dorofeev, N. V., Romanov, R. V., Grecheneva, A. V. and Pankina, E. S., “Improving the reliability of the results of automated forecasting of emissions in geotechnical systems based on the bifurcation approach,” *IOP Conf. Ser.: Materials Sci. and Eng.*, vol. 862, pp. 1-6, 2020.
12. Dorofeev, N. V., Romanov, R. V., Grecheneva, A. V. and Pankina, E. S., “Algorithm for predicting of the transition of a key point of geodynamic control to the risk zone,” *IOP Conf. Ser.: Earth And Environmental Sci.*, vol. 548, pp. 1-5, 2020.
13. Адаптивная Обработка Разнородных Данных Геотехнического Мониторинга [Текст] / Е.С. Панькина [и др.] //

Известия Тульского государственного университета. технические науки. – 2020. – № 7. – С. 226-236.

14. Экспериментальное и теоретическое исследование механических деформаций в промерзающем влагонасыщенном грунте [Текст] / М.С. Желнин [и др.] // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2019. – №4. – С. 19-28.
15. Usanov, S. V., Ruchkin, V. I., and Zhelytsheva, O. D., “Monitoring linear deformation of buildings and structures,” *J. of Mining Science*, vol. 51(4), pp. 724–729, 2015.
- Guizzardi, M., Derome, D., Mannes, D., Vonbank, R., and Carmeliet, J., “Electrical conductivity sensors for water penetration monitoring in building masonry materials,” *Materials and Structures*, vol. 49(7), pp. 2535–2547, 2015.
16. Mustafin, M.G., Valkov, V.A., and Kazantsev, A.I., “Monitoring of deformation processes in building and structures in metropolies,” *Proceeding of the Int. Sci. Conf. transportation geotechnics and geoecology*, vol. 189, pp. 729-736, 2017.
17. Giannoccaro, N. I., Spedicato, L., and Foti, D., “A digital analysis of the experimental accelerometers data used for buildings dynamical identification,” *IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems*, vol 1, pp. 1-6, 2016.
18. Antonyova, A., and Antony, P., “Measurement system for testing reliability of building insulation,” *3rd Int. Conf. on Instrumentation Control and Automation*, vol. 3, pp. 1-6, 2013.
19. Kim, D., Chang, S., “Active vibration control of building structures using lattice pattern control based on learning algorithm,” *Advanced in structural engineering*, vol. 2. pp. 77-84, 2010.
20. Thenozhi, S., and Yu, W., “Active vibration control of building structures using fuzzy proportional-derivative/proportional-integral-derivative control,” *J. of Vibration and Control*, vol. 21(12), pp. 2340–2359, 2013.
21. Li, L. J., “The Study on Building Structure for Vibration Control,” *Advanced Materials Research*, pp. 490-495, 2012.
22. Gaidaichuk, V.V., and Kotenko, K.E., “Efficiency and problems for monitoring large-building structures,” *Opir materialiv i teoria sporud-strength of materials and theory of structures*, vol. 97, pp. 175-185, 2016.

Панькина Екатерина Сергеевна – научный сотрудник кафедры «Управление и контроль в технических системах», Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО ВлГУ, тел. (49234)77236, e-mail: pankina@bsu.edu.ru

Дорофеев Николай Викторович – д.т.н, доцент, заведующий кафедрой «Управление и контроль в технических системах», Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО ВлГУ, тел. (49234)77236, e-mail: dorofeevny@yandex.ru

Греченева Анастасия Владимировна – к.т.н, доцент кафедры «Управление и контроль в технических системах», Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО ВлГУ, тел. (49234)77236, e-mail: grechenevaav@yandex.ru

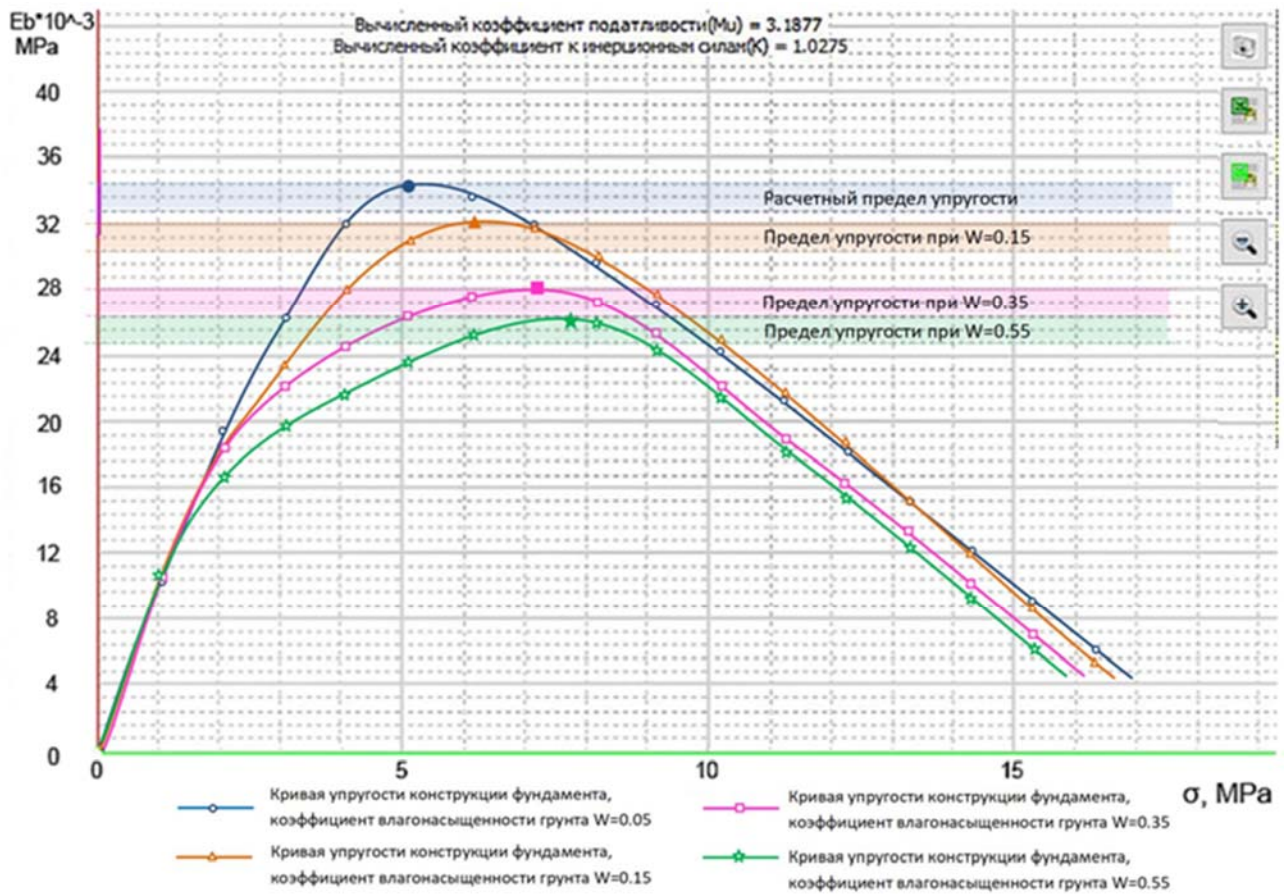


Рис. 2. Зависимость изменения предела упругости материалов фундамента сооружения от возникающих механических напряжений с учетом уровня обводненности грунтового основания



# CONTROL OF THE FORMATION OF DESTRUCTIVE PRECESSES IN THE GEOTECHNICAL MONITORING SYSTEM

E.S. Pankina, N.V. Dorofeev, A.V. Grecheneva

*Vladimir State Uniresity, Vladimir*

**Abstract** — This article proposes an algorithm for controlling the formation of destructive processes in geotechnical systems. In practice the proposed algorithm corrects the range of acceptable parameters of the geotechnical system based on complex data processing on external factors and combinations of reactions of the system. It built on the basis of the theory of bifurcations. Based on the results of the algorithm, an assessment of changes is formed in the state of the geotechnical system. The article also describes the results of the practical application of the developed algorithm based on geotechnical monitoring data (observations were carried out from 2016 to 2021) of the parameters of the soil base, as well as the physical and mechanical parameters of the structural elements of the foundation and structure. The structure was a three-story building erected on a brick ribbon foundation. The object of the research is located in the city of Murom, Vladimir region. During the application of the developed algorithm, the most vulnerable key points of the geotechnical system were identified in which hidden destructive processes develop. The obtained results are also confirmed by the results of modeling in LIRA-CAD of stresses in the structure of the foundation of a building with a change in the proportion of natural humidity of the upper layers of the soil. Thus, although there are many approaches to solving the problems of geotechnical monitoring and assessing the stability of geotechnical systems, nevertheless, constantly emerging project situations that lead to accidents and catastrophes of a man-made and natural nature show their low efficiency. Therefore, the application of the developed algorithm is relevant when predicting the stability of the geotechnical system due to the correction in the dynamic mode of the permissible limits of variation of the physical and mechanical parameters of the stability of the geotechnical system obtained in the design calculations.

**Index terms:** algorithm, control, process, geotechnical system, destructive.

## REFERENCE

1. Kolesnikov, A. O. calculation of the vertical stiffness of the Foundation, taking into account the mutual influence of piles [Text] / A. O. Kolesnikov, T. N. Kostyuk, V. N. Popov // structural mechanics of engineering constructions and buildings. – 2019. – No. 3. – P. 229-236.
2. Inozemtsev, V. K. Bifurcation problem of stability of tall objects [Text] / K. V. Inozemtsev, S. A. Zhestkov // Construction mechanics of engineering structures and structures. - 2016. - No. 4. - pp. 53-57.
3. Nazarov, D. I. Destruction of structures of a mining building, energy and bifurcation analysis [Text] / D. I. Nazarov // Mining information and analytical bulletin. - 2015. - No. 7. - pp. 95-100.
4. Monteiro, L. H. A., "A discrete-time dynamic system with four types of codimension-one bifurcations, " Applied Mathematics and Computation, vol. 354, pp. 189-191, 2019
5. Prospects for the development of geotechnical monitoring systems [Text] / V. V. Smirnov [et al.] // GIAB. - 2014. - No. S4. - pp. 191-198.
6. Ayberk, K., "Geotechnical assessment of a slope stability problem in the Citlakkale residential area." Bulletin of Eng. Geology and the Environment, vol. 3, pp. 875–889, 2017.
7. Fan, Y.B., Yang, S.W., Xu, L.K., Feng, C. and Liang, B.F., "Real time monitoring instrument designed for the deformation and sliding period of colluvial landslides," Bulletin of Eng. Geology and the Environment, vol. 3, pp. 829–838, 2017.
8. Lebedev, M. O. security during the construction of double-track subway tunnel in Quaternary sediments [Text] / M. O. Lebedev, GORN. – 2019. – No. 3. – P. 88-96.
9. Koniushkiv, V. V. Complex analysis of the results of engineering surveys for the design, construction and operation of buildings in areas with slope processes [Text] / V. V. Koniushkiv, A. Veselov, L. N. Kondratyeva // Izvestiya TPU. - 2017. - No. 11. - pp. 111-125.
10. Kuleshov, A. P. processing of the results of geotechnical monitoring of rainfall structures [Text] / A. P. Kuleshov, InPendine V. // Izvestiya TPU. – 2019. – No. 8. – P. 190-204.
11. Dorofeev, N. V., Romanov, R. V., Grecheneva, and A. V. Pankina, E. S., "Improving the reliability of the results of automated forecasting of emissions in geotechnical systems based on the bifurcation approach," IOP Conf. Ser.: Materials Sci. and Eng., vol. 862, pp. 1-6, 2020.
12. Dorofeev, N. V., Romanov, R. V., Grecheneva, A. V. and Pankina, E. S., "Algorithm for predicting of the transition of a key point of geodynamic control to the risk zone," IOP Conf. Ser.: Earth And Environmental Sci., vol. 548, pp. 1-5, 2020.
13. Adaptive Processing Of Heterogeneous Geotechnical Monitoring Data [Text] / E. S. Pankina [et al.] // Izvestiya Tula State University. technical sciences. - 2020. - No. 7. - pp. 226-236.
14. Experimental and theoretical study of mechanical deformations in freezing moisture-saturated soil [Text] / M. S. Zhelnin [et al.] // Bulletin of PNRPU. Mechanics. - 2019. - No. 4. - pp. 19-28.
15. Usanov, S. V., Ruchkin, V. I., and Zheltysheva, O. D., "Monitoring linear deformation of buildings and structures," *J. of Mining Science*, vol. 51(4), pp. 724–729, 2015.
- Guizzardi, M., Derome, D., Mannes, D., Vonbank, R., and Carmeliet, J., "Electrical conductivity sensors for water penetration monitoring in building masonry materials," *Materials and Structures*, vol. 49(7), pp. 2535–2547, 2015.
16. Mustafin, M.G., Valkov, V.A., and Kazantsev, A.I., "Monitoring of deformation processes in building and structures in metropolies," *Proceeding of the Int. Sci. Conf. transportation geotechnics and geoecology*, vol. 189, pp. 729-736, 2017.
17. Giannoccaro, N. I., Spedicato, L., and Foti, D., "A digital analysis of the experimental accelerometers data used for buildings dynamical identification," *IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems*, vol 1, pp. 1-6, 2016.
18. Antonyova, A., and Antony, P., "Measurement system for testing reliability of building insulation," *3rd Int. Conf. on Instrumentation Control and Automation*, vol. 3, pp. 1-6, 2013.
19. Kim, D., Chang, S., "Active vibration control of building structures using lattice pattern control based on learning algorithm," *Advanced in structural engineering*, vol. 2. pp. 77-84, 2010.

20. Thenozhi, S., and Yu, W., "Active vibration control of building structures using fuzzy proportional-derivative/proportional-integral-derivative control," *J. of Vibration and Control*, vol. 21(12), pp. 2340–2359, 2013.

21. Li, L. J., "The Study on Building Structure for Vibration Control," *Advanced Materials Research*, pp. 490-495, 2012.

22. Gaidaichuk, V.V., and Kotenko, K.E., "Efficiency and problems for monitoring large-building structures," *Opir materialiv i teoria sporud-strength of materials and theory of structures*, vol. 97, pp. 175-185, 2016.

*Pankina Ekaterina Sergeevna – Research associate of the Department "Management and Control in Technical Systems", Murom Institute (branch) of the FSUE IN VISU, tel. (49234)77236, e-mail: pankina@bsu.edu.ru*

*Dorofeev Nikolay Viktorovich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department "Management and Control in Technical Systems", Moscow State University Institute (branch), tel. (49234)77236, e-mail: dorofeevny@yandex.ru*

*Grecheneva Anastasia Vladimirovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Management and Control in Technical Systems", Murom Institute (branch) of the FSUE IN VISU, tel. (49234)77236, e-mail: grechenevaav@yandex.ru*