ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВОГО МАССИВА КАМЕРЫ ШЛЮЗА ДОКОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

Т.С. Федорова, С.Н. Левачев*

ФГБУ «Канал имени Москвы», 125362, г. Москва, ул. Водников, д. 1;

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

АННОТАЦИЯ. Данная статья посвящена оценке напряженно-деформированного состояния грунтового массива камеры шлюза. Выполнено численное моделирование грунтового массива камеры шлюза доковой конструкции с неразрезным днищем. Подобрана модель грунта, и в рамках выбранной модели выполнен расчет напряженно-деформированного состояния грунтового массива камеры шлюза с применением программного комплекса Plaxis.

В ходе анализа напряженно-деформированного состояния сооружения выполнена оценка его состояния в условиях наполнения-опорожнения камеры шлюза. Для оценки возможности снижения нагрузки от грунта обратной засыпки и порового давления на стенку камеры шлюза выполнено моделирование выемки грунта верхней части обратной засыпки камеры шлюза и рассмотрена возможность замены глинистого грунта засыпки на песчаный грунт.

По итогам выполненных расчетов горизонтальных и вертикальных перемещений сооружения выполнена верификация результатов численного моделирования с материалами натурных наблюдений полученных в ходе эксплуатации сооружения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: численное моделирование, Plaxis, модель упрочняющегося грунта, параметры грунта, шлюз

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Федорова Т.С., Левачев С.Н. Оценка напряженно-деформированного состояния грунтового массива камеры шлюза доковой конструкции // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 5 (104). С. 519–528. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.519-528

ASSESSMENT OF STRESS-STRAIN STATE OF SOIL MASS OF DOCK-TYPE LOCK CHAMBER

T.S. Fedorova, S.N. Levachev*

FGBI "Moscow Canal", 1 Vodnikov str., Moscow, 125362, Russian Federation;

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

ABSTRACT. The article focuses on the assessment of stress-strain state of soil mass of dock-type lock chamber. Numerical modeling of the soil mass of dock-type lock chamber with a continuous bottom is performed. The soil model was selected, and calculation of stress-strain state of the lock chamber soil mass was performed applying the PLAXIS 2D programming and computing suite. In the process of the structure stress-strain state analysis the assessment of its state in conditions of filling-emptying of the lock chamber was performed. To assess the possibility of reducing the load of the backfill soil and pore pressure on the lock chamber wall, the article discusses the simulation of excavation of upper part of the lock chamber backfill; also, the possibility of replacing of clay soil filling by sandy soil filling is considered. A numerical modeling results verification with field observations materials obtained during operation of the facility was performed according to the results of calculations of horizontal and vertical shifts of the facility. The study demonstrated a satisfactory convergence of the results of calculations performed in the Plaxis programming and computing suite with the field observations materials. Presented calculation results show that the replacement of upper part of backfill soil without combining with other structural measures can not duly change the load from the soil on the chamber wall, nor its stress state.

KEY WORDS: numerical modeling, PLAXIS programming and computing suite, hardening soil model, soil parameters, lock chamber

FOR CITATION: Fedorova T.S., Levachev S.N. Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gruntovogo massiva kamery shlyuza dokovoy konstruksii [Assessment of Stress-Strain State of Soil Mass of Dock-Type Lock Chamber]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 5 (104), pp. 519–528. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.519-528

Одним из важных факторов, влияющих на работу доковой камеры шлюза, является давление грунта обратной засыпки и грунтового массива в целом.

Для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового массива камеры шлюза было выполнено моделирование грунтового массива обратной засыпки и основания доковой ка-

меры шлюза в среде программно-вычислительного комплекса Plaxis.

При определении НДС системы для описания механического поведения грунта использовалась реализованная в программно-вычислительном комплексе Plaxis усовершенствованная упругопластическая модель упрочняющегося грунта *Hardening Soil*.

Математическая формулировка модели грунта *Hardening Soil* [1–3], примененная в программном комплексе Plaxis, включает в качестве поверхности разрушения критерий Мора–Кулона; для описания упругой области НДС — гиперболический критерий Дункана–Чана с изменяемыми модулями упругости для траектории разгрузки/повторного нагружения; для описания пластических сдвиговых и объемных деформаций — две функции текучести для девиаторного f^s и изотропного f^c нагружения [4].

Предельное напряженное состояние описывается аналогично модели Мора–Кулона: углом внутреннего трения φ , сцепления c и угла дилатансии ψ . В данной модели отдельно рассматривается модуль деформации грунта при девиаторном нагружении E_{50}^{ref} , модуль деформации при сжатии E_{oed}^{ref} , модуль разгрузки и повторного нагружения грунта E_{ur}^{ref} [5].

На основании рекомендаций разработчиков программного комплекса Plaxis в качестве рекомендованных средних значений для различных грунтов принимаем $E_{ur}^{ref} \approx 3 E_{50}^{ref}$ и $E_{50}^{ref} \approx E_{oed}^{ref}$ [6].

Фильтрационные свойства грунтов моделировались с помощью коэффициентов фильтрации K_f в горизонтальном и вертикальном направлении. При этом значения всех указанных величин для каждого типа грунта принимались осредненными для всего слоя (без учета изменения свойств грунта по глубине и локальных зон разуплотнения).

Расчетные физико-механические характеристики и рельеф местности приняты в соответствии с данными инженерно-геологических изысканий, основные расчетные схемы приняты в соответствии с исполнительной документацией.

При определении НДС системы «камера шлюза — грунтовый массив» учитывалась последовательность возведения сооружения и приложение нагрузок.

Расчет выполнен для камеры шлюза докового типа, полезная длина камеры — 290,0 м, полезная ширина камеры — 30,0 м, минимальная глубина — на пороге 5,52 м. Камера разделена на 15 секций. Толщина днища — 4,0 м, толщина стен по низу — 6,0 м, по верху — 1,0 м, высота стен камеры — 16,0 м (см. рис. 1).

Рис. 1. Гиперболическое отношение между напряжениями и деформациями (а) и поверхности текучести модели *Hardening Soil* (б)

Рис. 2. Схема камеры шлюза

В связи с симметричностью конструкции исследуемого сооружения в качестве расчетной модели использована половина поперечного сечения камеры шлюза.

В качестве граничных условий для расчетной области принята скользящая заделка по боковым границам и жесткая по нижней границе.

Бетонные элементы конструкции моделировались массивами с линейно-упругими свойствами, описываемыми модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона ν .

Контакт элементов сооружения и участков глинистых грунтов описывался с помощью специальных контактных элементов нулевой толщины, учитывающих возможность отрыва и проскальзывания тела сооружения по контакту с основанием.

Поверхность контакта моделировалась путем задания коэффициента понижения прочности в элементе, равного 0,67, связывающего прочность контактного элемента с прочностью грунта.

По материалам выполненных изысканий в основании камеры преимущественно залегает суглинок легкий пылеватый, красновато-коричневый, текучий с тонкими прослоями и гнездами песка, включением гальки и гравия. Обратная засыпка представлена суглинком легким, красновато-коричневым, мягкопластичным, с прослоями и гнездами песка, включениями до 5...10 % гальки и гравия.

При выполнении расчета были рассмотрены два расчетных случая: наполненная и опорожненная камеры.

Исходные данные для моделирования грунтового массива представлены в таблице.

Уровень грунтовых вод принят на 5,0 м ниже уровня поверхности земли. Коэффициент фильтрации грунта составляет 0,01 м/сут для глинистых грунтов и 1 м/сут — для песка. Удельный вес воды $\gamma = 10 \text{ кН/м}^3$.

Коэффициент бокового давления K_0 определяется как соотношение горизонтального напряжения

к действующему вертикальному напряжению, при отсутствии деформаций.

Расчетное значение характеристик грунтов, согласно требованиям¹, принималось с коэффициентом надежности по грунту при односторонней доверительной вероятности $\gamma_g = 0,95$ при расчете на устойчивость и $\gamma_g = 1,0$ — при расчете по второму предельному состоянию.

В связи с деформациями стен, обусловленными силовыми нагрузками, было выполнено закрепление стены при помощи металлических стержней-нагелей, состоящих из двух стальных стержней 4,0 и 4,55 м диаметром 70 мм и двух стержней 3,5 и 4,0 м диаметром 100 мм, установленных с наклоном 5...8° в сторону засыпки.

При моделировании бетонных стен камеры шлюза применялись следующие исходные данные об элементах:

- камера шлюза — $\gamma = 24 \text{ кН/м}^3$, $E = 19\,000 \text{ МПа}$, $\nu = 0,15$;

- нагель — $E_A = 396\,190 \text{ кН/м}$, $E_I = 121,33 \text{ кНм}^2/\text{м}$, $w = 0,151 \text{ кНм/м}$, $d = 70 \text{ мм}$, шаг 2 м, $\nu = 0,2$.

Расчеты проводились с учетом поэтапного нагружения. На первом этапе расчета определялось естественное НДС грунтового массива с учетом заданного уровня грунтовых вод.

На последующих этапах моделировалось поэтапное возведение камеры шлюза до фактического состояния сооружения с учетом выполненных мероприятий по его закреплению и долгого срока эксплуатации.

Построение геометрической модели производилось с учетом рельефа местности, геологического строения основания и расположения сооружения.

¹ СП 23.13330.2011. Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85.

Основные характеристики грунтов и дополнительные параметры для модели *Hardening soil (HS)*

Наименование грунта	Основные характеристики грунтов	Дополнительные параметры для модели HS
Грунт обратной засыпки (суглинок мягкопластичный)	$\gamma = 21,8 \text{ кН/м}^3$, $c = 18 \text{ кПа}$, $\phi = 20^\circ$, $\nu = 0,35$, $E = 5277 \text{ кН/м}^2$ $K_\phi = 0,01 \text{ м/сут}$	$E_{50}^{ref} = 5277 \text{ кН/м}^2$ $E_{oed}^{ref} = 5277 \text{ кН/м}^2$ $E_{ur}^{ref} = 15\,831 \text{ кН/м}^2$ $K_0 = 0,724$
Грунт в основании камеры (суглинок текучий)	$\gamma = 21,4 \text{ кН/м}^3$, $c = 16 \text{ кПа}$, $\phi = 16^\circ$, $\nu = 0,35$, $E = 15\,385 \text{ кН/м}^2$ $K_\phi = 0,01 \text{ м/сут}$	$E_{50}^{ref} = 15\,385 \text{ кН/м}^2$ $E_{oed}^{ref} = 15\,385 \text{ кН/м}^2$ $E_{ur}^{ref} = 46\,155 \text{ кН/м}^2$ $K_0 = 0,658$
Песок (грунт для замены обратной засыпки)	$\gamma = 17 \text{ кН/м}^3$, $c = 1 \text{ кПа}$, $\phi = 30^\circ$, $\nu = 0,3$, $E = 30\,000 \text{ кН/м}^2$ $K_\phi = 1 \text{ м/сут}$	$E_{50}^{ref} = 30\,000 \text{ кН/м}^2$ $E_{oed}^{ref} = 30\,000 \text{ кН/м}^2$ $E_{ur}^{ref} = 90\,000 \text{ кН/м}^2$ $K_0 = 0,5$

Нагрузка на сооружение в случае нагружения водонасыщенного грунта состоит из давления скелетного материала и порового давления, которое может превышать уровень эффективных напряжений в грунте. В связи с этим при определении нагрузки использованы значения полученных тотальных (полных) напряжений.

В таком случае полная нагрузка на стенку и днище камеры складывается из нагрузки от грунта и гидростатического давления воды, характеризующегося уровнем воды в обратной засыпке, а также порового давления.

Полученные в расчетах горизонтальные и вертикальные перемещения грунтового массива представлены на рис. 4 и 5.

Согласно выполненным расчетам, максимальные перемещения верхней части стенки составили 12 мм и были направлены в камеру шлюза.

По данным материалов натурных наблюдений, выполненных на шлюзе рассматриваемой конструкции, максимальные значения перемещений отдельных секций за период наблюдений достигают 13,8 мм.

По выполненным расчетам максимальные вертикальные перемещения камеры шлюза достигают

Рис. 3. Геометрическая модель

Рис. 4. Поле горизонтальных перемещений — опорожненная камера (положительные перемещения соответствуют направлению перемещений слева направо)

Рис. 5. Поле вертикальных перемещений — опорожненная камера (положительные значения соответствуют направлению перемещения вверх)

20 мм. По данным материалов натурных наблюдений подъем секции составляет 34 мм.

Полученные в расчетах поля напряжений представлены на рис. 6–8.

При анализе полученных при расчете поля вертикальных напряжений выявлена область понижения вертикальных напряжений в грунте на контакте со стенкой. Однако данная область компенсируется развитием на этом контакте касательных напряжений, которые вызывают развитие в грунте на контакте со стенкой горизонтальных напряжений.

Формирование напряжений в грунтовом массиве на контакте с днищем камеры шлюза представлено на рис. 9–10.

По мере возведения стенки и обратной засыпки происходит увеличение нагрузки на стенку, которая вызывает снижение вертикальных напряжений в днище и соответствующее снижение напряжений в грунте под стенкой камеры.

Равномерный характер напряжений в грунте под днищем связан с практическим отсутствием в грунтовом массиве под камерой шлюза горизонтальных перемещений.

Недренированное поведение глинистых грунтов, на которых расположено сооружение, вызывает развитие избыточного порового давления в грунте обратной засыпки и основании камеры (рис. 11).

Рис. 6. Поле вертикальных напряжений

Рис. 7. Поле касательных напряжений

Рис. 8. Поле горизонтальных напряжений

Рис. 9. Поля вертикальных напряжений на этапах расчета строительного периода

Рис. 10. Поля горизонтальных напряжений на этапах расчета строительного периода

Рис. 11. Изополя распределения избыточного порового давления в грунтовом массиве

Рис. 12. Поля касательных напряжений при опорожненной камере (а) и при наполненной (б)

При анализе НДС системы оценивалось ее состояние в условии наполнения и опорожнения камеры шлюза. При расчете системы в условиях наполненной камеры наблюдается снижение касательных напряжений на контакте камеры с грунтовым массивом рис. 12.

При наполненной камере нагрузка на стенку в верхней части снижается, в то время как в нижней наоборот увеличивается.

Наполнение камеры водой вызывает прогиб стенки в сторону обратной засыпки, а прогиб днища вызывает поворот опорного сечения стенки в противоположном направлении.

При этом горизонтальные перемещения стенки, вызванные удлинением днища, поворотом опорного сечения стенки и прогибом стенки от действующей на нее нагрузки в нижней части направлены на грунт и тем самым вызывают увеличение бокового давления грунта.

В то же время происходит перемещение верхней части стенки на грунт при наполнении, тем самым вызывая снижение нормальной нагрузки на стенку камеры.

С целью снижения нагрузки от грунта обратной засыпки и порового давления на стенку в расчетах выполнялось моделирование выемки грунта верхней части обратной засыпки (на глубину 7 м) и замена глинистого грунта песчаным.

Представленные расчетные исследования выполнены для опорожненной камеры шлюза.

В левой части рис. 13–19 представлены поля для расчетной схемы при условии замены глинистого грунта на песчаный, в правой — на глинистый грунт.

Выполненные исследования с заменой грунта обратной засыпки показали снижение нагрузки от бокового давления грунта до 10 %. Также частичная замена грунта верхней части засыпки позволила снизить горизонтальные перемещения стенки до 8 мм.

Рис. 13. Схема направлений горизонтальных перемещений верха стенки при опорожнении (а) и наполнении (б)

Рис. 14. Поле горизонтальных напряжений при опорожненной камере (а) и при наполненной камере (б)

Рис. 15. Поле вертикальных напряжений при опорожненной камере (а) и при наполненной камере (б)

Рис. 16. Поле горизонтальных перемещений верхней части стенки камеры шлюза

Рис. 17. Поле горизонтальных перемещений системы «камера шлюза — грунтовый массив» (положительные горизонтальные перемещения соответствуют направлению перемещений слева направо)

Рис. 18. Поле вертикальных напряжений в грунте обратной засыпки

Рис. 19. Поле горизонтальных напряжений в грунте обратной засыпки

На основании выполненных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Исследование показало удовлетворительную сходимость результатов расчетов, выполненных в программно-вычислительном комплексе Plaxis с материалами натурных наблюдений.

2. Представленные результаты расчетов говорят о том, что замена верхней части грунта обратной засыпки без сочетания с другими конструктивными мероприятиями не может в должной мере изменить нагрузку от грунта на стенку камеры и ее напряженное состояние.

3. В целях снижения нагрузки от грунта обратной засыпки и порового давления необходимо выполнить замену глинистого грунта обратной засыпки камеры шлюза на песчаный грунт с организацией отвода фильтрационных вод. Работы необходимо выполнить в зоне непосредственного примыкания грунтового массива к стенке камеры.

4. Совместно с выполнением работ по замене грунта обратной засыпки необходимо организовать программу натурных наблюдений за напряженно-деформированным состоянием, в обязательном порядке включающую измерения порового давления в связных грунтах обратных засыпок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schanz T. Zur Modellierung des mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialien. Stuttgart, Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart, 1998.
2. Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. The Hardening Soil Model: Formulation and verification // *Beyond 2000 in Computation Geotechnics*. Rotterdam, Balkema, 1999. Pp. 281–290.
3. Duncan J.M., Chang C.Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils // *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 1970. Vol. 96. No. 5. Pp. 1629–1653.
4. Строчкова Л.А. Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов // *Известия Томского политехнического университета*. 2008. Т. 313. № 1. С. 69–74.
5. Соколова О.В. Подбор параметров грунтовых моделей в программном комплексе Plaxis 2D // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 4. С. 10–16.
6. Plaxis. Руководство пользователя. 2D Версия 8.
7. Голубев А.И., Селецкий А.В. Выбор модели грунта и ее параметров в расчетах геотехнических объектов // *Труды международной конференции по геотехнике «Геотехнические проблемы мегаполисов (GEOMOS 2010)»*. 2010. Т. 4. С. 1727–1732.
8. Тер-Мартirosян А.З., Мирный А.Ю., Сидоров В.В. и др. Определение параметров модели Hardening Soil по результатам лабораторных испытаний // *Геотехника. Теория и практика : межвуз. тематич. сб. тр. общеросс. конф. мол. уч., науч. сотр. и спец. СПб.* : Изд-во СПбГАСУ, 2013. С. 141–146.
9. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. М. : Высш. шк, 1985. 352 с.
10. Голубев А.И., Селецкий А.В. Комплексные расчеты гидротехнических сооружений в Plaxis // *Гидротехника XXI век*. 2011. № 3 (6). С. 16–18.
11. Егорова Е.С., Иоскевич А.В., Иоскевич В.В. и др. Модели грунтов, реализованных в программных комплексах SCAD Office и Plaxis 3D // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2016. № 3 (42). С. 31–60.
12. Варданян Г.С., Андреев В.И., Атаров Н.М. и др. Сопrotивление материалов с основами теории упругости и пластичности / под ред. Г.С. Варданяна. М. : Изд-во АСВ, 1995. 568 с.
13. Wiltschko C., Scharinger F., Schweiger H.F. Results from a geotechnical benchmark exercise of an embankment on soft clay // *International Workshop on Geotechnics of Soft Soils-Theory and Practice*. 2003. Pp. 67–73.
14. Brinkgreve R.B.J. Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application // *Soil Constitutive Models: Evaluation, selection and Calibration* Pp. 69–98.
15. Calvello M., Finno R.J. Selecting parameters to optimize in model calibration by inverse analysis // *Computers and Geotechnics*. 2004. Vol. 31. Issue 5. Pp. 420–424.
16. Barla M., Barla G. Torino subsoil characterization by combining site investigations and numerical modelling // *Geomechanics and Tunneling*. 2012. Vol. 3. Pp. 214–232.
17. Rokouzzaman M., Sakai T. Calibration of the parameters for a hardening-softening constitutive model using genetic algorithms // *Computers and Geotechnics*. 2010. Vol. 37. Issue 4. Pp. 573–579.

Поступила в редакцию в декабре 2016 г.

Принята в доработанном виде в феврале 2017 г.

Одобрена для публикации в марте 2017 г.

Об авторах: Федорова Татьяна Сергеевна — начальник отдела мониторинга безопасности гидротехнических сооружений, ФГБУ «Канал имени Москвы», 125362, г. Москва, ул. Водников, д. 1, fedorova_tanya@rocketmail.com;

Левачев Станислав Николаевич — кандидат технических наук, профессор гидравлики и гидротехнического строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, levachev@inbox.ru.

REFERENCES

1. Schanz T. Zur Modellierung des mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialien [On the Modeling Of The Mechanical Behavior Of Friction Materials]. Stuttgart, Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart, 1998. (In German)
2. Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. The Hardening Soil Model: Formulation and verification. *Beyond 2000 in Computation Geotechnics*. Rotterdam, Balkema. 1999, pp. 281–290.
3. Duncan J.M., Chang C.Y. Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils. *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 1970, vol. 96, no. 5, pp. 1629–1653.
4. Strokova L.A. Opredelenie parametrov dlya chislenogo modelirovaniya povedeniya gruntov [Definition of Parameters for Numerical Simulation of the Soils Behavior]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin

of the Tomsk Polytechnic University]. 2008, vol. 313, no. 1, pp. 69–74. (In Russian)

5. Sokolova O.V. Podbor parametrov gruntovykh modelей v programmnom komplekse Plaxis 2D [Selection of Parameters of Groundwater Models in the Software Package Plaxis 2D]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Engineering and Construction Magazine]. 2014, no. 4 (48), pp. 10–16. (In Russian)

6. *Plaxis. Rukovodstvo pol'zovatelya. 2D Versiya 8*. [Plaxis. The User's Guide. 2D Version 8].

7. Golubev A.I., Seleckiy A.V. Vybory modeli grunta i ee parametrov v raschetakh geotekhnicheskikh objektov [Choice of Soil Model and Its Parameters in the Calculation of Geotechnical Objects]. *Trudy mezhdunarodnoy konferentsii po geotekhnike «Geotekhnicheskie problemy megapolisov (GEOMOS 2010)»* [Proceedings of the International Conference on Geotechnics “Geotechnical Problems of Megapolises (GEOMOS 2010)”]. 2010, vol. 4, pp. 1727–1732. (In Russian)

8. Ter-Martirosyan A.Z., Mirnyy A.Yu., Sidorov V.V. et al. Opredelenie parametrov modeli Hardening Soil po rezul'tatam laboratornykh ispytaniy [Determination of Parameters of the Hardening Soil Model by the Results of Laboratory Tests]. *Geotekhnika. Teoriya i praktika : mezhvuzovskiy tematicheskii sbornik trudov obshcherossiyskoy konferentsii molodykh uchenykh, nauchnykh sotrudnikov i spetsialistov* [Geotechnics. Theory and Practice: Interuniversity Thematic. Collected Works of the All-Russian Conference of Young Scientists, Scientific Employees and Specialists]. St. Petersburg, SPb-GASU Publ., 2013, pp. 141–146. (In Russian)

9. Ivanov P.L. *Grunty i osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Soils and Foundations of Hydraulic Structures]. Moscow, Vysshaya shkola Publ, 1985, 352 p. (In Russian)

10. Golubev A.I., Seleckiy A.V. Kompleksnye raschety gidrotekhnicheskikh sooruzheniy v Plaxis [Complex Calcula-

tions of Hydraulic Structures in Plaxis]. *Gidrotehnika XXI vek* [Hydrotechnics XXI century]. 2011, no. 3 (6), pp. 16–18. (In Russian)

11. Egorova E.S., Ioskevich A.V., Ioskevich V.V. et al. Modeli gruntov, realizovannykh v programmykh kompleksakh SCAD Office i Plaxis 3D [The Soil Model, Implemented in Software Complexes SCAD Office and Plaxis 3D]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy* [Construction of Unique Buildings and Structures]. 2016, no. 3 (42), pp. 31–60. (In Russian)

12. Vardanyan G.S., Andreyev V.I., Atarov N.M., Gorshkov A.A. *Soprotivlenie materialov s osnovami teorii uprugosti i plastichnosti* [Strength of Materials with the Fundamentals of the Elasticity and Plasticity Theory]. Moscow, ASV Publ., 1995, 568 p. (In Russian)

13. Wiltsky C., Scharinger F., Schweiger H.F. Results from a Geotechnical Benchmark Exercise of an Embankment on Soft Clay. *International Workshop on Geotechnics of Soft Soils-Theory and Practice*. 2003, pp. 67–73. (In Russian)

14. Brinkgreve R.B.J. Selection of Soil Models and Parameters for Geotechnical Engineering Application. *Soil Constitutive Models: Evaluation, selection and Calibration*. Pp. 69–98.

15. Calvello M., Finno R.J. Selecting Parameters to Optimize in Model Calibration by Inverse Analysis. *Computers and Geotechnics*. 2004, vol. 31, issue 5, pp. 420–424.

16. Barla M., Barla G., Torino Subsoil Characterization by Combining Site Investigations and Numerical Modelling. *Geomechanics and Tunneling*. 2012, vol. 3, pp. 214–232.

17. Rokouzzaman M., Sakai T. Calibration of the Parameters for a Hardening-Softening Constitutive Model Using Genetic Algorithms. *Computers and Geotechnics*. 2010, vol. 37, issue 4, pp. 573–579.

Received in December 2016.

Adopted in revised form in February 2017.

Approved for publication in March 2017.

About the authors: **Fedorova Tatiana Sergeevna** — Head of Monitoring Safety Departement, **FGBI “Moscow Canal”**, 1 Vodnikov str., Moscow, 125362, Russian Federation, fedorova_tanya@rocketmail.com;

Levachev Stanislav Nikolaevich — Candidate of Technical Sciences, Professor, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, levachev@inbox.ru.