

СТАТЬИ

УДК 624.131.37

МЕТОДИКА СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ КОНСОЛИДАЦИИ**¹Агейкина О.В., ²Воронцов В.В., ^{1,3}Суфьянов Р.Р.**¹ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, e-mail: berlinao@yandex.ru;²Департамент образования Администрации города Тюмени, Тюмень, e-mail: education@tyumen-city.ru;³НИПИ «Нефтегазпроект» ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, e-mail: sufyanovrr@nipingp.ru

Характерной особенностью строительства и эксплуатации зданий и сооружений на водонасыщенных грунтах в основании является нестабильное напряженно-деформированное состояние грунтового массива, в том числе вследствие фильтрационной консолидации, образования и рассеивания избыточного порового давления. Знание закономерностей развития порового давления в глинистых водонасыщенных массивах позволяет рассчитать параметры фундаментов объектов строительства, организовывать мониторинг их устойчивости, производить наблюдения за ходом фильтрационной консолидации и повысить эффективность геомеханических расчетов. При этом многообразие грунтов обусловило появление широкого спектра математических моделей. Наблюдая и измеряя характеристики объекта в рамках того или иного математического описания, важно грамотно обработать и интерпретировать экспериментальные данные, что позволит оценить и сопоставить результаты для проверки гипотез, для выявления существенных свойств и закономерностей процесса фильтрационной консолидации. Полученные в результате экспериментальных исследований численные значения параметров могут быть далее использованы лишь в том случае, если они достоверны, т.е. соответствуют определенным уровням и критериям математической статистики. В статье описан итерационный подход к определению параметров математической модели фильтрационной консолидации водонасыщенных глинистых грунтов при сопоставлении избыточного порового давления в грунтовом основании под нагрузкой жестким штампом с функцией, описывающей его развитие во времени. На основании обработки экспериментальных данных получены численные значения параметров модели. Экспериментально подтвержден вывод о потере несущей способности в нижележащих слоях водонасыщенных оснований вследствие скачка избыточного порового давления при максимальных значениях длины пути фильтрации. Показана необходимость разработки критерия оценки качества и завершенности итерационного процесса при обработке результатов эксперимента, что позволит перевести весь процесс обработки данных в автоматический режим.

Ключевые слова: водонасыщенные глинистые грунты, фильтрационная консолидация, параметры модели, статистическая обработка, экспериментальные данные

STATISTICAL PROCESSING TECHNIQUE AND INTERPRETATION OF THE RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCHES OF FILTRATION CONSOLIDATION**¹Ageykina O.V., ²Vorontsov V.V., ^{1,3}Sufyanov R.R.**¹Tyumen Industrial University, Tyumen, e-mail: berlinao@yandex.ru;²Department of Education, Administration of the City of Tyumen, Tyumen, e-mail: education@tyumen-city.ru;³Research and Design Institute «Neftegazproekt» Tyumen Industrial University, Tyumen, e-mail: sufyanovrr@nipingp.ru

A characteristic feature of the construction and operation of buildings and structures on water-saturated soils at the base is the unstable stress-strain state of the soil massif, including as a result of filtration consolidation, the formation and dispersion of excess pore pressure. Knowledge of the patterns of pore pressure development in water-saturated clay arrays allows you to calculate the parameters of the foundations of construction sites, organize monitoring of their stability, monitor the course of filtration consolidation, and improve the efficiency of geomechanical calculations. At the same time, the diversity of soils led to the emergence of a wide range of mathematical models. Observing and measuring the characteristics of an object as part of a mathematical description, it is important to correctly process and interpret the experimental data, which will allow evaluating and comparing the results for testing hypotheses to identify the essential properties and patterns of the filtration consolidation process. The numerical values of the parameters obtained as a result of experimental studies can be further used only if they are reliable, that is, they correspond to certain levels and criteria of mathematical statistics. The article describes an iterative approach to determining the parameters of a mathematical model of filtration consolidation of water-saturated clay soils when comparing the excess pore pressure in the soil base under load with a hard stamp with a function describing its development over time. Based on the processing of experimental data, the numerical values of the model parameters were obtained. Experimentally confirmed the conclusion about the loss of bearing capacity in the underlying layers of water-saturated bases due to a jump in excess pore pressure at maximum values of the filtration path length. The necessity of developing a criterion for assessing the quality and completeness of the iterative process in processing the results of the experiment, which will allow to transfer the entire data processing process to automatic mode, is shown.

Keywords: water saturated clay soils, filtration consolidation, model parameters, statistical processing, experimental data

Характерной особенностью строительства и эксплуатации зданий и сооружений на водонасыщенных грунтах в основании является нестабильное напряженно-деформированное состояние грунтового массива, в том числе вследствие фильтрационной консолидации, образования и рассеивания избыточного порового давления. Знание закономерностей развития порового давления в глинистых водонасыщенных массивах позволяет рассчитать параметры фундаментов объектов строительства, организовывать мониторинг их устойчивости, производить наблюдения за ходом фильтрационной консолидации и повысить эффективность геомеханических расчетов. При этом многообразие грунтов обусловило появление широкого спектра математических моделей [1, 2].

Наблюдая и измеряя характеристики объекта в рамках того или иного математического описания, важно грамотно обработать и интерпретировать экспериментальные данные, что позволит оценить и сопоставить результаты для проверки гипотез, для выявления существенных свойств и закономерностей процесса фильтрационной консолидации. Полученные в результате экспериментальных исследований численные значения параметров могут быть далее использованы лишь в том случае, если они достоверны, т.е. соответствуют определенным уровням и критериям математической статистики [3–5].

В контексте этих подходов и сформирована цель исследования – отработать методику статистической обработки экспериментальных данных в рамках предложенной математической модели, фильтрационной консолидации водонасыщенного грунта и определить параметры этой модели.

Материалы и методы исследования

Ранее предложена математическая модель, описывающая фильтрационную консолидацию водонасыщенного грунта, а именно [2, 6]:

$$\begin{cases} C'(t) = -\bar{k}_1(a - N(t)) * C(t) \\ N'(t) = \bar{k}_1(a - N(t)) * C(t) - k_2 N(t) \end{cases} \quad (1)$$

$$k_1 = -\frac{0,5kk_w}{\bar{n}}, \quad k_2 = \frac{k_0k_f}{\gamma_w L(y, z)},$$

где $N(t)$ – избыточное поровое давление, a – напряжения, необходимые для преодоления начального градиента фильтрации, $C(t)$ – пористость грунта, k – коэффициент пропорциональности; k_w – модуль объем-

ного сжатия поровой воды, k_f – коэффициент фильтрации, γ_w – удельный вес воды, $L(y, z)$ – длина пути фильтрации воды

В представленном описании величины и характер избыточного порового давления зависит от знака дискриминанта характеристического уравнения:

$$D = \left(\frac{k_f}{\bar{n}} \cdot \frac{k_w}{\gamma_w L(y, z)} \right)^2 - k_w \cdot k^2 \cdot (\sigma_{i0}(y, z) - \bar{u}_w). \quad (2)$$

Конкретный случай расчета можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} \Delta > 0; C(t) = A + Be^{\lambda_1 t} + Ce^{\lambda_2 t} \\ \Delta = 0; C(t) = A + (B + Ct)e^{\lambda_1 t} \\ \Delta < 0; C(t) = A + e^{mt} (B \cos(nt) + C \sin(nt)). \end{cases} \quad (3)$$

Для параметра A принято обозначение

$$A = -\frac{k_2 \alpha}{\beta \gamma}.$$

Таким образом, при изучении фильтрационной консолидации реальный процесс представлен системой кинетических уравнений, характеризующей избыточное поровое давление. Несмотря на чисто формальное описание консолидационного механизма, математическая модель с определенными из опыта коэффициентами дает возможность правильно рассчитывать изменение избыточного порового давления в грунтовом водонасыщенном основании, а при переходе к осадке – определять ее развитие во времени и конечное значение.

Следовательно, вся сложность изучения процесса фильтрационной консолидации переносится на простейшие уравнения математической модели и, прежде всего, на экспериментальные значения параметров этой модели.

При подготовке статьи были использованы результаты исследований, проведенные на кафедре строительной механики ФГБОУ ВПО ТюмГАСУ в 2004–2006 гг. и в отделе криогенных ресурсов ООО «НИПИ Нефтегазпроект» при выполнении инженерных изысканий грунтовых карьеров на Западно-Чатылькинском лицензионном участке в 2018–2019 гг.

В ходе экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния водонасыщенного суглинка в условиях плоской деформации на грунтовых моделях варьировались следующие факторы: ширина загружающей пластины 50 и 20 см; величина полосовой распределенной нагрузки 4,6 кПа, 7,25 кПа и 19,2 кПа; глубина заложения дат-

чиков относительно полосы нагружения от 0,30 до 0,8 м. Грунтовое основание было представлено водонасыщенным суглинком нарушенной структуры, который послойно укладывался в лоток. Одновременно с укладкой грунта были установлены датчики для определения полных (общих) и избыточных поровых давлений в грунтовом массиве. Для этого использовали тензорезисторные мембранные месдозы и пьезометры. Сигналы датчиков регистрировали, независимо друг от друга, с использованием автоматического измерителя деформаций и измерительного регистрирующего комплекса [6].

Результаты исследования и их обсуждение

Вся процедура обработки экспериментальных данных была разделена на два этапа. На первом произведена первичная обработка данных, полученных при проведении эксперимента, для определения параметров модели. К этому же этапу относится и статистическая обработка данных по выборке ошибочных сведений.

На втором этапе полученные значения параметров модели корректировались с учетом общего представления о характере процесса развития избыточного порового давления по всему грунтовому массиву образца. Для корректировки использовали уравнение множественной регрессии, отражающее зависимость дискриминанта характеристического уравнения от величины равномерно-распределенной нагрузки, приложенной к жесткому штампу и относительной длины пути фильтрации. Для полученного уравнения определяли значимость коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента и значимость уравнения в целом по критерию Фишера. Кроме того, выполняли проверку на наличие гетероскедастичности (гомоскедастичности), на наличие автокорреляции и нормальность остатков.

В случае неудовлетворительных значений по любому из указанных критериев повторяли корректировки параметров модели и уравнения множественной регрессии, а также статистический анализ результатов. Итерационный процесс завершали при выполнении всех условий достоверности и значимости уравнения регрессии. Ниже приведено уравнение регрессии для дискриминанта характеристического уравнения на завершающем этапе итерационного процесса:

$$D = 1,2734 - 0,00862 \cdot P - 0,6106 \cdot L/B, \quad (4)$$

где P – равномерно-распределенная нагрузка, приложенная к жесткому штампу, Па;

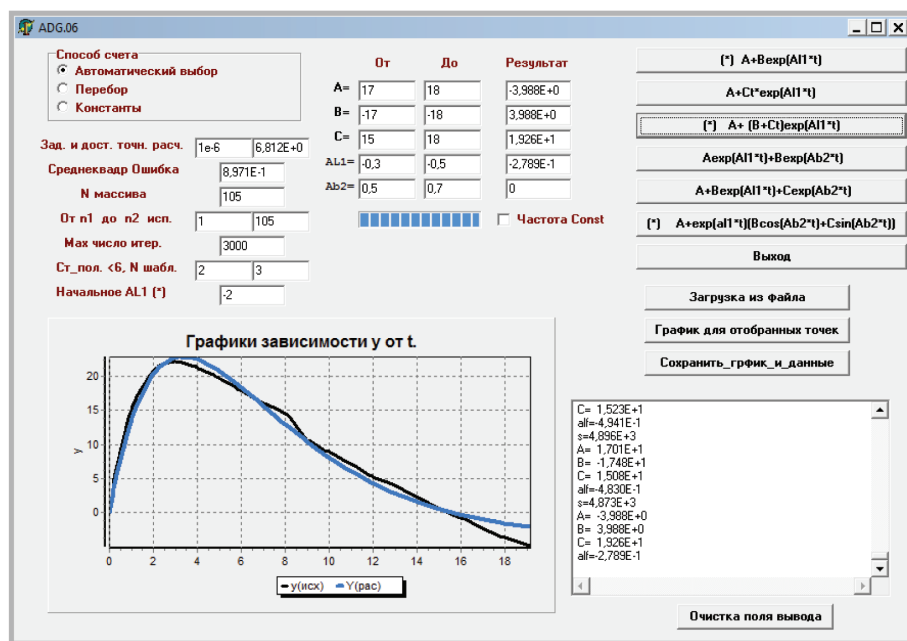
L – длина пути фильтрации, B – ширина жесткого штампа.

Достоинством рассматриваемой модели фильтрационной консолидации водонасыщенных грунтов является четкое отражение физической сущности реального процесса при относительной простоте математической формулировки. Кроме того, структура математического описания удобна для расчетов в конкретной пространственной точке модели при использовании подхода, реализованного в Delphi 6. При этом обеспечена возможность определения неизвестных параметров в автоматическом режиме, в интерактивном, а также прямым перебором в заданном интервале. Необходимо заметить, что определение показателей параметров модели базируется на подходах восстановления показателей экспонент и реализовано на основе известных идей [7].

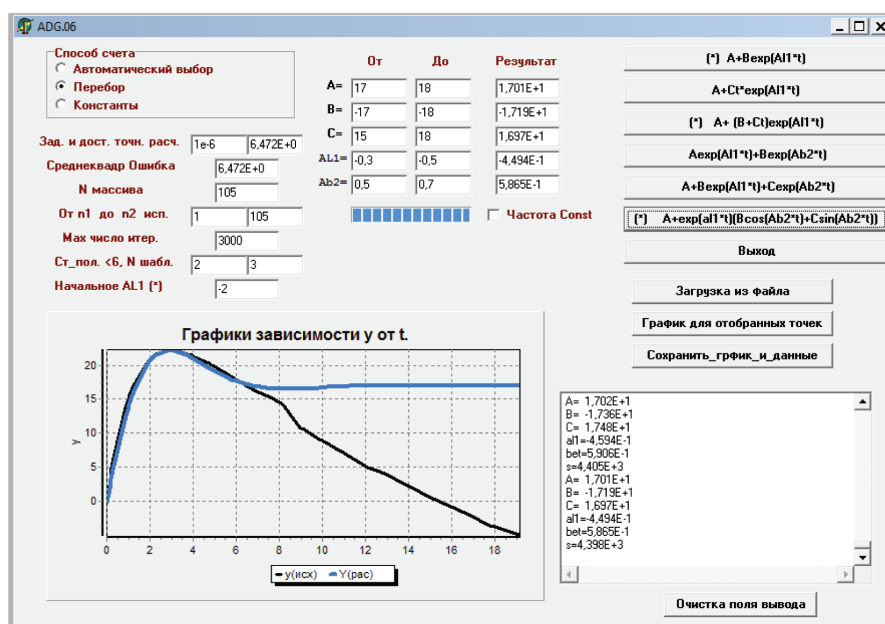
Статистическая значимость уравнения проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера, $F_{кр} = 3,37 < F = 30,81$. Установлено также, что параметры модели статистически значимы. Кроме того расчет коэффициента ранговой корреляции Спирмена наряду с тестом Голдфелда – Квандта позволили подтвердить гипотезу об отсутствии гетероскедастичности, расчет критерия Дарбина – Уотсона подтвердил отсутствие автокорреляции, а расчетное значение RS-критерия, $2,7 < RS = 3,656 < 3,7$, показало адекватность модели по нормальности распределения остаточной компоненты.

Однако метод экспериментального определения параметров модели в целом для объекта потребовал более внимательного рассмотрения и детальной статистической обработки результатов. Дело в том, что в модели, как отмечалось ранее, заложены три расчетных случая в зависимости от знака дискриминанта характеристического уравнения (1–3). Поэтому при аппроксимации экспериментальных данных достаточно велик риск ошибки. В этом отношении показателен пример обработки показаний датчика № 4 при распределенной нагрузке 4,6 кПа.

В рассматриваемом случае, при первичной обработке результатов эксперимента с использованием программы в автоматическом режиме, определен случай $D = 0$, рис. 1, а. Однако интерпретация расчетов по всей совокупности показаний датчиков свидетельствует о том, что речь идет о случае – случай $D < 0$, рис. 1, б.



a)



б)

Рис. 1. Аппроксимация экспериментальных данных для датчика № 4, при значении дискриминанта $D = 0$ (a) и $D < 0$ (б)

Кроме того, показанный пример убедительно иллюстрирует опасность потери несущей способности в нижележащих слоях водонасыщенных оснований, несмотря на снижение напряжений от нагрузки по глу-

бине. Механизм этого процесса выглядит следующим образом. Начальный этап повышения избыточного порового давления приводит к дополнительному разуплотнению грунтового скелета. При этом увеличение

порового давления снижает эффективные напряжения в скелете грунта в этот период наблюдений и, как следствие, снижает сопротивление сдвигу. А далее этап снижения порового давления при фильтрации обуславливает возрастание напряжений в скелете грунта с развитием деформаций сдвига, которые сопровождаются разуплотнением и уже лавинообразным рассеиванием порового давления.

Вывод о потере несущей способности в нижележащих слоях водонасыщенных оснований вследствие скачка избыточного порового давления в расчетном случае при $D < 0$ подтверждается результатами эксперимента. Нетрудно заметить, что эти результаты наблюдаются, как правило, для максимальных значений длины пути фильтрации.

Уравнение регрессии для дискриминанта характеристического уравнения далее было использовано для расчетов избыточного порового давления и параметров модели. На рис. 2 представлена графическая

интерпретация результатов расчета, которая свидетельствует о вполне удовлетворительной статистической надежности уравнений регрессии для параметров модели.

Другой аспект обсуждения заключается в том, что наряду с оценкой несущей способности водонасыщенных грунтов в условиях скачка избыточного давления и разработкой инженерных решений повышения несущей способности водонасыщенных грунтов в этих условиях необходим критерий оценки качества и завершенности итерационного процесса. Исследования в этом направлении позволят перевести весь процесс обработки данных в автоматический режим.

Заключение

Предложена итерационная методика статистической обработки и определения экспериментальных значений параметров модели фильтрационной консолидации водонасыщенных грунтов.

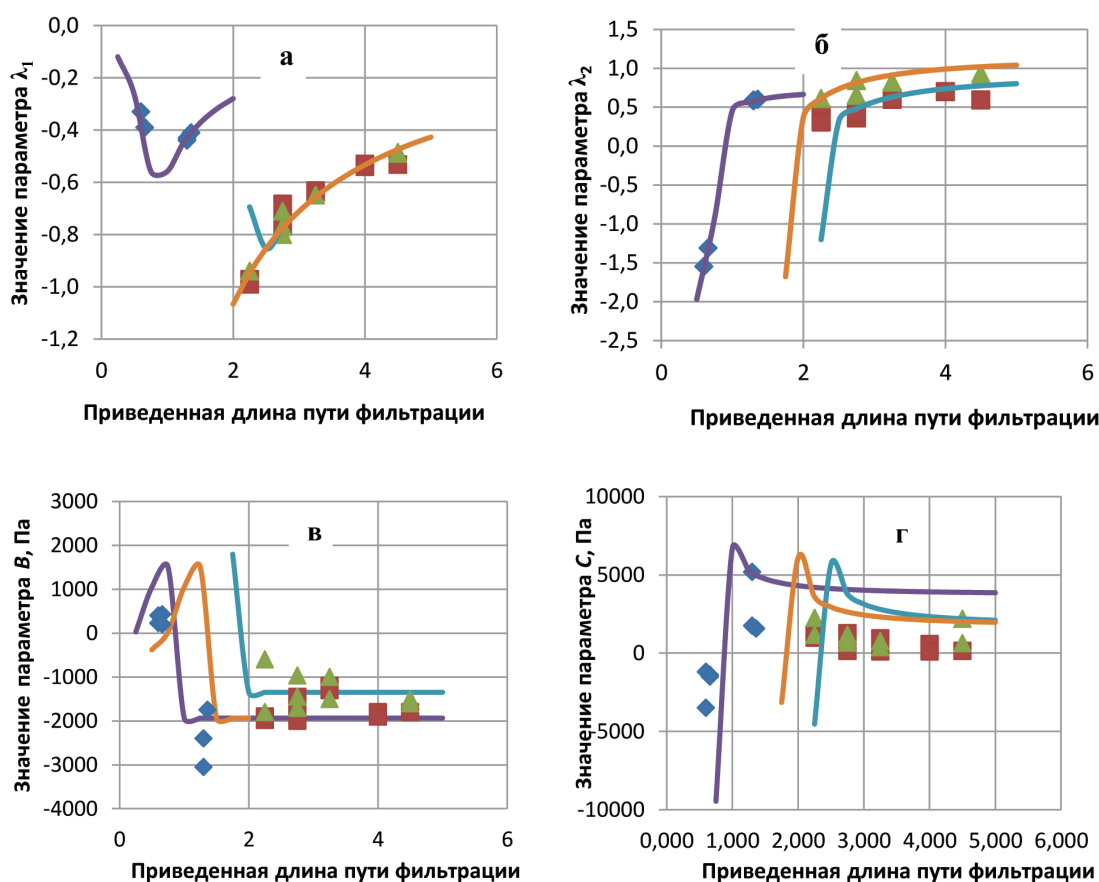


Рис. 2. Теоретические и экспериментальные значения параметров в модели фильтрационной консолидации: а) параметр λ_1 ; б) параметр λ_2 ; в) параметр B ; г) параметр C

Теоретические предпосылки обработки данных представлены в виде приложения, реализованного в Delphi 6, с применением которого определены параметры модели фильтрационной консолидации водонасыщенных грунтов и показана адекватность модели результатам эксперимента.

При определении параметров модели в процессе обработки экспериментальных данных раскрыто влияние скачка избыточного порового давления на несущую способность и устойчивость к сдвиговым деформациям водонасыщенных глинистых грунтов.

Показана необходимость исследований в части разработки и обоснования критерия оценки качества и завершенности итерационного процесса при обработке экспериментальных данных.

Список литературы / References

1. Костерин А.В., Скворцов Э.В. Фильтрационная консолидация при плоской деформации упругого полупространства // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2017. № 2. С. 99–104. DOI: 10.7868/S0568528118020093.
2. Подгорнова Н.Н. Фильтрационная консолидация глинистого грунта в основании дорожной конструкции // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2010. № 1. С. 96–100.
3. Александров А.С., Калинин А.Л., Цыгулева М.В. Распределяющая способность песчаных грунтов, армированных геосинтетикой // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 6 (66). С. 35–48. DOI: 10.5862/MCE.66.4.
4. Ageikina O.V., Ageikin V.N. Определение параметров транспортных потоков на промышленных дорогах Западной Сибири для экологических расчетов // Материалы докладов на XIX международной научно-практической конференции (г. Тюмень, 17 марта 2017 г.). Тюмень: Изд-во ТИУ, 2017. С. 13–17.
5. Базыкин И.В., Литвиненко Г.И. Применение многомерного статистического анализа при обработке результатов измерения прочности бетона гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2011. № 6. С. 34–35.
6. Ageikin V.N., Vorontsov V.V., Podgornova N.N. Forecast of excess pore pressures in waterlogged soils // Geotekhnika: aktual'nyye teoreticheskiye i prakticheskiye problemy: Mezhdunarodnyy sbornik trudov. SPb., 2006. P. 79–83 (in Russian).
7. Булычев А.А., Верхотуров В.Н., Гуляев Б.А. Современные методы биофизических исследований. Практикум по биофизике. Учебное пособие для биол. спец. вузов / Под ред. А.Б. Рубина. М.: Высшая школа, 1988. 359 с.
8. Bulychev A.A., Verkhoturov V.N., Gulyaev B.A. Modern methods of biophysical research. Praktikum po biofizike. Uchebnoye posobiye dlya biol. spets. Vuzov / Pod red. A.B. Rubina. M.: Vysshaya shkola, 1988. 359 p. (in Russian).