

УДК 624.13

## Изучение параметров деформации оттаивающих грунтов на основе дисперсионного анализа и метода анализа иерархий

Синь Вэньшао, А. Ф. Колос, А. В. Петряев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** *Вэньшао Синь, Колос А. Ф., Петряев А. В.* Изучение параметров деформации оттаивающих грунтов на основе дисперсионного анализа и метода анализа иерархий // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 868–877. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-868-877

### Аннотация

**Цель:** Изучить статистическую значимость исследуемых факторов — начальной температуры образца грунтов  $T_0$ , влажности  $\omega$ , всестороннего давления  $\sigma_3$  и частоты нагружения  $f$  на параметры деформации оттаивающих грунтов методом ортогональных испытаний. На основе метода весового анализа изучить влияние веса различных факторов на результаты динамических трехосных испытаний. Установить уравнение регрессии для параметров деформации. **Метод:** Дисперсионный анализ (ANOVA) используется для проверки статистической значимости факторов по результатам ортогональных испытаний. С помощью метода анализа иерархий (МАИ) вес влияния факторов на результаты испытаний определяется посредством матричного расчета. **Результаты:** Факторы испытания:  $T_0$ ,  $\omega$ ,  $\sigma_3$  и  $f$  имеют сильную значимость для результатов испытаний. Влияние влажности на результаты испытаний составляет более 50 %. Множественное уравнение линейной регрессии хорошо соответствует результатам испытаний. **Практическая значимость:** метод ортогональных испытаний, основанный на ANOVA и МАИ, имеет преимущества, выраженные в небольшом количестве испытаний, широком охвате факторов и анализе весов влияния. Результаты ANOVA и весового анализа показывают, что наибольшее влияние на деформацию земляного полотна оттаивающих грунтов оказывает влажность. Следует обращать внимание на изменение влажности грунтов для предотвращения инженерно-технических аварий при эксплуатации земляного полотна.

**Ключевые слова:** Деформационные характеристики, оттаивающий грунт, дисперсионный анализ, метод анализа иерархий, экспериментальное исследование.

### Введение

Оттаивающий грунт — это грунт, в котором при переходе из мерзлого состояния в талое разрушаются криогенные структурные связи [1]. Непредсказуемое оттаивание грунта может произойти в любой момент во время строительства и эксплуатации инженерного сооружения по разным причинам [2]. Когда слой сезонного оттаивания многолетней мерзлоты подвергается воздействию положительной температуры,

микроструктура мерзлоты поверхностного слоя изменяется под действием гравитационной нагрузки. В этом случае наблюдается тенденция к переходу в состояние оттаивания, что приводит к изменению механических свойств многолетнемерзлых грунтов [3]. Осадка оттаивающего грунта основания земляного полотна, особенно неравномерная, может привести к деформации и повреждению конструкции земляного полотна [4].

Большинство китайских ученых изучает прямое влияние влажности, температуры образца, амплитуды динамических напряжений на деформацию грунта [5, 6]. Некоторые российские ученые считают, что деформационные характеристики оттаивающего грунта представлены коэффициентом оттаивания  $A_{th}$  и коэффициентом сжимаемости  $m$  [1, 7]. Коэффициент оттаивания определяет осадку мерзлых грунтов при оттаивании под действием собственной массы грунта. Коэффициент сжимаемости определяет осадку оттаявшего грунта под действием приложенной внешней нагрузки [8–12].

Оттаивание грунта под нагрузкой всегда сопровождается сложными процессами: взаимным перемещением между твердыми частицами, сжатием воды и воздуха в порах грунтов, изменением толщины водяной пленки, выдавливанием свободной воды из пор грунта [13]. Пористость оттаивающих грунтов уменьшается, и осадка происходит под двойным воздействием оттаивания и нагружения [14]. Деформация земляного полотна вызвана сочетанием теплофизических, механических и физико-химических изменений оттаивающих грунтов [15].

В качестве объекта исследования в этой работе взяты параметры характеристик деформации оттаивающих грунтов (модули  $E_d^c$  и  $E_d^y$ ). Проведено динамическое трехосное испытание при циклическом нагружении методом ортогонального испытания. Проведен анализ статистической значимости влияющих факторов:  $T_0$ ,  $\omega$ ,  $\sigma_3$  и  $f$  на основе дисперсионного анализа (ANOVA). Изучено влияние начальной температуры образца грунта  $T_0$ , влажности  $\omega$ , всестороннего давления  $\sigma_3$  и частота нагрузки  $f$  на динамический модуль деформации ( $E_d^c$ ) и динамический модуль упругости ( $E_d^y$ ) на основе метода анализа иерархий (МАИ). Полученные уравнения линейной регрессии модулей  $E_d^c$  и  $E_d^y$  могут использоваться при проектировании земляного полотна в районах распространения вечной мерзлоты.

## Метод испытаний

Испытания проведены с использованием динамического трехосного стабилометра производства компании «Геотек». Прибор разработан в соответствии с ГОСТ Р 56353—2015 и может выполнять динамическое трехосное испытание [16]. Трехосевой прибор в основном состоит из следующих основных частей: камеры трехосного сжатия, устройства нагрузочного, дегазатора жидкости и т. д., как показано на рис. 1. Результаты измерения обрабатываются с помощью системы АСИС и программного обеспечения GeotekStudio.

Испытательный грунт взят с буровой площадки № 340в российской высокоскоростной железнодорожной магистрали (ВСЖМ).

Определение гранулометрического состава проводилось в соответствии с ГОСТ 12536—2014 [17]. Полученная кривая показана на рис. 2. Данные результатов испытания приведены в табл. 1.

Лабораторное определение максимальной плотности и оптимальной влажности проводилось в соответствии с ГОСТ 22733—2016 [18], результаты испытаний приведены на рис. 3. Оптимальная влажность — 9,2 %, максимальная плотность в сухом состоянии — 2,105 г/см<sup>3</sup>.

Определение критической влажности и классификация грунта получены по ГОСТ 25100—2020 [8] и представлены в табл. 2.

С целью анализа влияния различных факторов на деформационные характеристики оттаивающего грунта проведены исследования для четырех факторов и трех уровней на основе метода ортогональных испытаний. Уровни представляют собой разные значения для каждого фактора. Например, три уровня для фактора  $T_0$ : –5, –2 и 0 °С.

Испытательные факторы включают: начальную температуру образца грунтов  $T_0$ , влажность  $\omega$ , всестороннее давление  $\sigma_3$  и частоту нагрузки  $f$ .

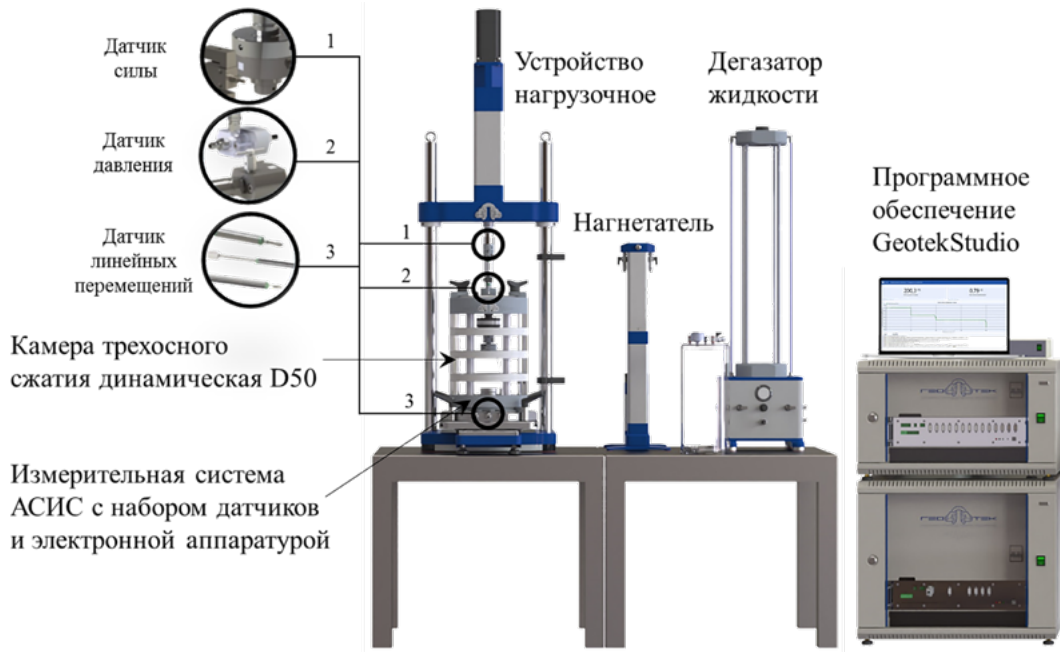


Рис. 1. Прибор для динамического трехосного испытания

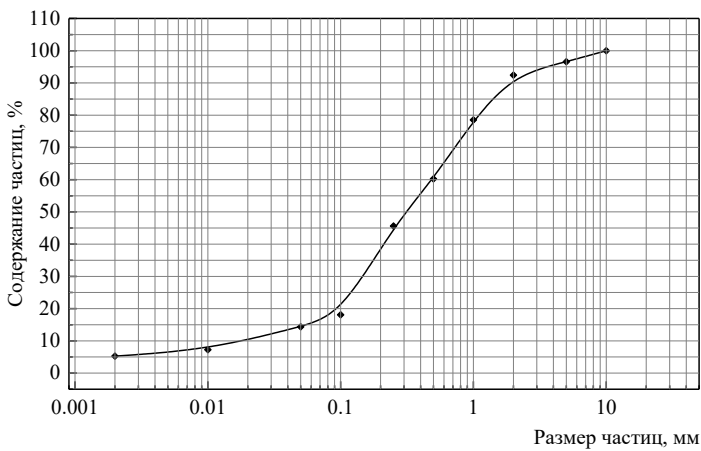


Рис. 2. Кривая гранулометрического состава грунтов

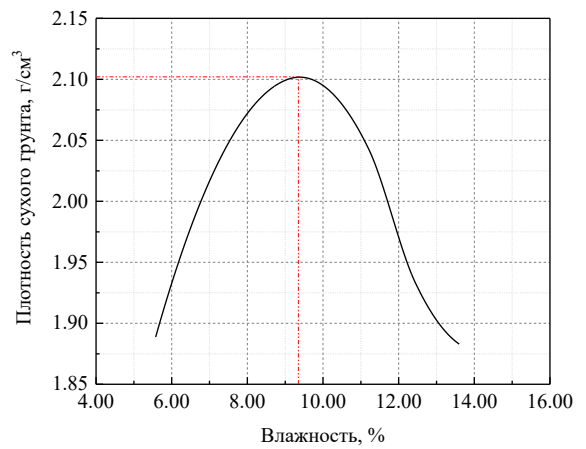


Рис. 3. Зависимость плотности грунта от влажности

Таблица 1. Результаты гранулометрического анализа

Размер фракции, мм	10–5	5–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,002	< 0,002
Содержание, %	3,44	4,13	13,88	18,30	14,63	27,55	3,71	7,21	1,97	5,18

Таблица 2. Физические характеристики испытательноно грунта

Параметры	Влажность на границах текучести, $\omega_L$ , %	Влажность на границах раскатывания, $\omega_p$ , %	Число пластичности, $I_p$ , %	Естественная влажность, $\omega_e$ , %	Показатель текучести, $I_L$ , д. ед.
Значение	20,78	14,37	6,41	3,24	< 0
По ГОСТ 25100—2020 — супесь песчаная					

Таблица 3. Величины уровней каждого фактора

Уровень	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\omega, \%$	$\sigma_3, \text{кПа}$	$f, \text{Гц}$
	A	B	C	D
1	A1 (-5)	B1 (9,2)	C1 (10)	D1 (1)
2	A2 (-2)	B2 (12,0)	C2 (20)	D2 (2)
3	A3 (0)	B3 (14,3)	C3 (30)	D3 (4)

Таблица 4. Результат испытаний

№		$T_0, ^\circ\text{C}$	$\omega, \%$	$\sigma_3, \text{кПа}$	$f, \text{Гц}$	$E_{d^p}^c, \text{МПа}$	$E_{d^p}^y, \text{МПа}$
		Д-1	1	-5	9,2	30	2
	2	69,50	80,33				
Д-2	1	-2	9,2	10	1	69,49	79,42
	2					69,35	77,87
Д-3	1	0	9,2	20	4	52,92	65,74
	2					42,23	56,41
Д-4	1	-5	12,0	20	1	62,90	70,26
	2					59,94	67,48
Д-5	1	-2	12,0	30	4	34,43	50,95
	2					34,08	43,41
Д-6	1	0	12,0	10	2	27,67	38,05
	2					27,07	37,56
Д-7	1	-5	14,3	10	4	11,57	17,26
	2					7,56	11,53
Д-8	1	-2	14,3	20	2	20,52	24,23
	2					17,23	23,09
Д-9	1	0	14,3	30	1	25,37	33,49
	2					24,19	31,16

В соответствии с методом ортогональных испытаний принят четырехфакторный и трехуровневый план испытаний ( $L_9 3^4$ ), всего проведено 9 испытаний. Величины уровней каждого фактора приведены в табл. 3. Для уменьшения погрешности проводятся два испытания в одинаковых условиях. Поскольку вибрационная нагрузка на основание земляного полотна невелика, амплитуда вибродинамического воздействия на образец грунта принята равной 10 кПа, а количество циклов — 1000 раз.

Процесс испытания основан на соответствующих стандартах (ГОСТ 59597—2021, ГОСТ 56353—2015). Некоторые фотографии испыта-

тельного процесса показаны на рис. 4. Основные этапы теста следующие:

1. Приготовление воды и льда при  $0^\circ\text{C}$ : во время теста необходимо следить за тем, чтобы температура жидкости, заполненной в трехосной камере, поддерживалась постоянной на уровне  $0^\circ\text{C}$ .

2. Подготовка образцов грунта: нарушенный грунт необходимо уплотнять послойно. Сделать образец грунта диаметром 50 мм и высотой 100 мм. Подготовленные образцы грунта помещать в холодильник и замораживать на 12–24 часа для обеспечения полного замораживания. На следующий день доставать замороженный образец. Начинать следующий этап испытания, когда температура образца достигнет температуры испытания.

3. Установка образца грунтов: поместить фильтровальную бумагу на оба торца образца, установить образец в резиновую мембрану, а затем установить его на плунжер. В это время подготовленный лед следует поместить в камеру и затянуть винты для фиксации колбы.

4. Заполнение жидкостью: заполнить воду в дегазаторе жидкости в трехосную камеру через нагнетатель. При этом температура рабочей жидкости в трехосной камере поддерживается постоянной на уровне  $0^\circ\text{C}$ .

5. Размещение датчиков: установить в держатель камеры датчик линейных перемещений, предназначенный для измерения вертикальной деформации образца. Наконечник датчика должен упираться в крышку камеры. Зафиксировать датчик в держателе винтом. Установить датчик линейных перемещений. Подсоединить фитинг для подачи давления воздуха в камеру к штуцеру в верхней поверхности камеры.

6. Запуск теста: в приложении GeotekStudio запустить испытания после настройки параметров.

7. Завершение испытания: когда достигается установленное количество циклов нагрузки, испытание завершается. После испытания нагрузочное устройство автоматически разгружается, давле-



Рис. 4. Процессы испытания

Таблица 5. Результаты дисперсионного анализа факторов, влияющих на динамический модуль  $E_d^c$  и  $E_d^y$ 

Источник отклонений		$E_d^c$		$E_d^y$	
		$F$	$p$	$F$	$p$
Начальная температура	$T_0, ^\circ\text{C}$	56,969	0,000**	46,120	0,000**
Влажность	$\omega, \%$	177,074	0,000**	218,551	0,000**
Всестороннее давление	$\sigma_3, \text{кПа}$	35,695	0,000**	57,677	0,000**
Частота	$f, \text{Гц}$	56,789	0,000**	54,635	0,000**
$R^2$		0,986		0,988	
** $p < 0,01$ (существенно)		**		**	

ние в трехосной камере сбрасывается и рабочая жидкость опорожняется. Достать образцы грунтов и очистить испытательный стенд.

8. Сбор данных: экспортировать данные испытаний в измерительную систему АСИС.

### Результаты испытаний и анализ статистической значимости

Результаты испытаний представлены в табл. 4. По результатам испытаний обнаружено, что в разных условиях испытаний они весьма различаются. Статистическая значимость влияния каждого фактора на результаты испытаний определена методом дисперсионного анализа.

Целью ANOVA является проверка значимости различия между средними значениями исследуемых факторов в разных группах с помощью сравнения дисперсий этих групп [19]. Определенные с помощью программного обеспечения SPSSAU результаты дисперсионного анализа факторов, влияющие на динамический модуль деформации и динамический модуль упругости, приведены в табл. 5.

Значения  $F$ ,  $p$  и  $R^2$  определяются в соответствии с [20].

По результатам ANOVA можно сделать вывод, что четыре влияющих фактора имеют существенное значение для динамического модуля деформации  $E_d^c$  и динамического модуля упругости  $E_d^y$ .

Графики зависимости двух модулей  $E_d^c$  и  $E_d^y$  от различных факторов представлены на рис. 5 и 6.

Из рис. 5 и 6 видно, что влияние одного и того же фактора на модуль  $E_d^c$  и  $E_d^y$  одинаково. Модуль  $E_d^c$  — это отношение увеличения напряжения к деформации сжатия на этапе нагрузки в течение одного цикла,  $E_d^y$  — это отношение снижения напряжения к обратной упругой деформации на этапе разгрузки в течение одного цикла. Траектории напряжения у них сходны. Следовательно, закономерности изменения двух модулей одинаковы.

Влияние температуры на характеристики деформации: когда температура постепенно увеличивается, оба модуля  $E_d^c$  и  $E_d^y$  уменьшаются. Причина в том, что при повышении температуры лед внутри образца грунта превращается в воду, сильная цементация льда ослабевает, а также снижается способность оттаивающего грунта сопротивляться деформации.

Влияние влажности на характеристики деформации: начальное состояние образца — грунт заморожен, в ходе испытания температура постепенно повышается, в результате чего количество жидкой воды внутри образца грунта с высокой влажностью (льдиностью) увеличивается. Эффективное напряжение уменьшается под смазывающим действием молекул воды, а модули  $E_d^c$  и  $E_d^y$  уменьшаются.

Влияние всестороннего давления на характеристики деформации: наличие всестороннего давления уменьшает пористость грунтов и усиливает

взаимодействие между частицами грунтов. Следовательно, с увеличением всестороннего давления оба модуля увеличиваются.

Влияние частоты нагружения на характеристики деформации: при низкочастотном нагружении частицы грунта имеют достаточно времени, чтобы перестроиться и приспособиться, более полно реагируя на нагрузку, и, следовательно, модули увеличиваются. При высокочастотном нагружении время перестройки и приспособления частиц грунта меньше, модули ниже.

### Весовой анализ

На основе МАИ можно количественно оценить степень влияния значения каждого фактора на результаты испытаний. Вес влияния различных факторов или уровней факторов на результаты испытаний определяется посредством матричного расчета [21].

Согласно МАИ, вес влияния каждого уровня фактора на показатель теста равен  $\beta = ASC^T$  [21], а вектор  $\beta$  представляет влияние каждого уровня фактора на тест по очереди.

Для простоты понимания даны следующие определения.

Матрица  $A$ : матрица эффекта влияния уровней факторов на тест.

Матрица  $AS$ : стандартная матрица воздействия влияния слоя факторного уровня на тест.

Матрица  $C$ : матрица весов влияния факторов на тест.

Весовой вектор  $\beta_c$  влияния уровня фактора для динамического модуля деформации:

$$\beta_c^T = [0,0654 \quad 0,0552 \quad 0,0449 \quad 0,2615 \quad 0,1683 \quad 0,0728 \\ 0,0283 \quad 0,0341 \quad 0,0355 \quad 0,0991 \quad 0,0767 \quad 0,0582]. \quad (1)$$

Весовой вектор  $\beta_y$  влияния уровня фактора для динамического модуля упругости:

$$\beta_y^T = [0,0476 \quad 0,0427 \quad 0,0375 \quad 0,2746 \quad 0,1893 \quad 0,0866 \\ 0,0338 \quad 0,0397 \quad 0,0421 \quad 0,0829 \quad 0,0667 \quad 0,0565]. \quad (2)$$

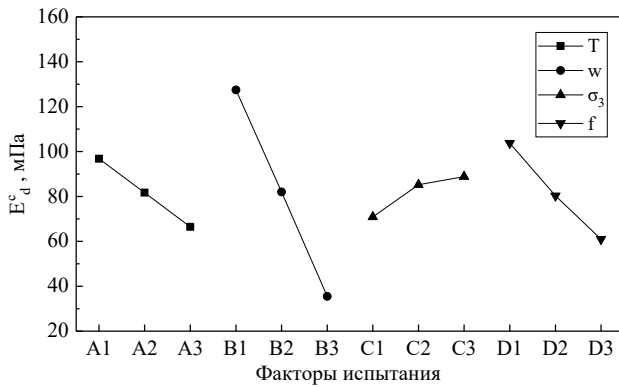


Рис. 5. Графики зависимости  $E_d^c$  от различных факторах

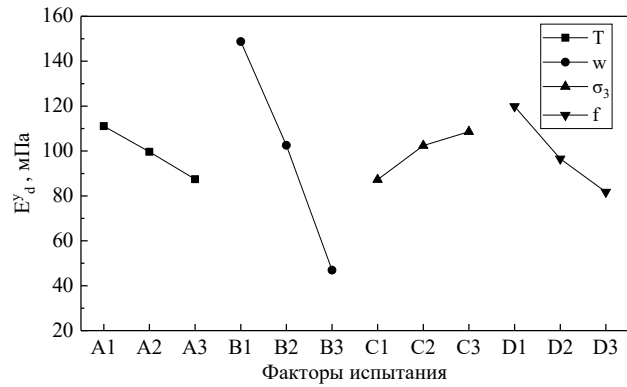


Рис. 6. Графики зависимости  $E_d^y$  от различных факторах

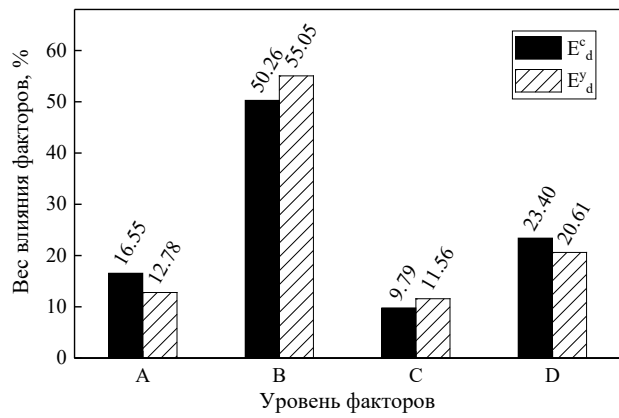
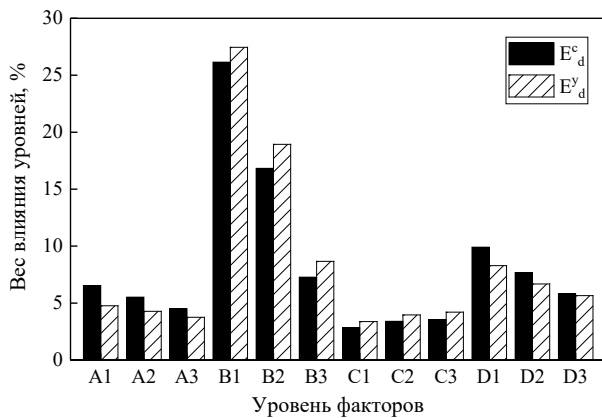


Рис. 7. Гистограмма веса: *a* — вес влияния уровней факторов; *б* — вес влияния факторов

После расчета всех результатов ортогонального теста  $L_9(3^3)$  с использованием МАИ получены веса влияния каждого уровня фактора на модули  $E_d^c$  и  $E_d^y$  (рис. 7).

Веса влияния температуры, влажности, всестороннего давления и частоты нагружения на модуль  $E_d^c$  составляют 16,55, 50,26, 9,79 и 23,40 % соответственно, на модуль  $E_d^y$  — 12,78, 55,05, 11,56 и 20,61 %. Влажность оказывает наибольшее влияние на модули  $E_d^c$  и  $E_d^y$ .

**Уравнение регрессии**

Согласно результатам ANOVA, четыре фактора имеют существенное значение для результатов испытаний. Следует учитывать

совместное действие четырех факторов при построении уравнения модулей  $E_d^c$  и  $E_d^y$ . На основе методологии поверхности отклика (RSM) построены множественные уравнения линейной регрессии:

$$E_d^c = -2,988T_0 - 8,984w + 0,448\sigma_3 - 6,808f + 147,096. \tag{3}$$

$$E_d^y = -2,327T_0 - 9,920w + 0,534\sigma_3 - 5,975f + 164,923. \tag{4}$$

Степень соответствия уравнения (3)  $R^2 = 0,970$ , уравнения (4)  $R^2 = 0,965$  — обе превышают 0,95. Это указывает на то, что модули  $E_d^c$  и  $E_d^y$  имеют хорошую линейную связь с четырьмя факторами.

## Заключение

Получены с помощью ортогональных испытаний значения динамического модуля деформации и динамического модуля упругости под влиянием многих факторов. Результаты ANOVA доказывают, что влажность, частота нагружения, начальная температура образца грунта и всестороннее давление имеют влияние на модули  $E_d^c$  и  $E_d^y$ . Вес воздействия влажности составляет наибольшую долю среди четырех факторов, превышающую 50 %. Следовательно, влажность грунта земляного полотна в районах распространения вечной мерзлоты во многом определяет степень деформации земляного полотна в процессе эксплуатации. Множественные уравнения линейной регрессии имеют высокую степень соответствия для параметров деформации.

## Библиографический список

1. ГОСТ 12248—2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. — М.: Стандартинформ, 2011. — 82 с.
2. Мельников П. И. Оттаивающие грунты как основания сооружений / П. И. Мельников, С. С. Вялов. — М.: Наука, 1981. — 95 с.
3. Liu G. Deformation properties of thawing silty clay under cyclic loading / G. Liu, P. Yang, T. Zhang et al. // *Forest engineering*. — 2014. — Iss. 30(05). — Pp. 118–121.
4. Стрелецкий Д. А. Изменение несущей способности мерзлых грунтов в связи с потеплением климата на севере Западной Сибири / Д. А. Стрелецкий, Н. И. Шикломанов, В. И. Гребенец // *Криосфера Земли*. — 2012. — № 1. — С. 22–32.
5. Peng L. Deformation properties of thawing silty clay under cyclic loading / L. Peng, J. Liu // *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. — 2010. — Iss. 32(04). — Pp. 567–572.
6. Xing Ch. Study on static and dynamics of thawing silty clay in seasonal freezing area: Master's Thesis / Ch. Xing. — Hebei: Hebei University of Architecture, 2020. — 74 p.
7. Вахрин И. С. Деформационные характеристики оттаивающих грунтов естественного сложения / И. С. Вахрин, Г. П. Кузьмин, В. В. Спектр // *Успехи современного естествознания*. — 2020. — № 8. — С. 37–42.
8. ГОСТ 25100—2011. Грунты. Классификация. — М.: Стандартинформ, 2018. — 45 с.
9. ГОСТ 5180—2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. — М.: Стандартинформ, 2016. — 23 с.
10. Трофимов В. Т. Инженерная геология России. Т. 1. Грунты России / В. Т. Трофимов, Е. А. Вознесенский, В. А. Королев. — М.: КДУ, 2011. — 672 с.
11. Ложкин В. В. Диагностика минералов россыпей. Практическое руководство / В. В. Ложкин. — М.: Государственное научнотехническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1962. — 243 с.
12. Вахрин И. С. Деформационные характеристики оттаивающих грунтов о. Котельный (новосибирские острова) / И. С. Вахрин // *Theory and Methods of Polar Science: Proceedings of International youth scientific conference on the polar geodesy, glaciology, hydrology and geophysics*. — Санкт-Петербург, 2018. — С. 69–75.
13. Царапов М. Н. Современные проблемы исследований механических свойств оттаивающих грунтов / М. Н. Царапов, П. И. Котов // *Ломоносовские чтения* — 2012: сб. статей. — М., 2012.
14. Хрусталева Л. Н. Основы геотехники в криолитозоне: учебник / Л. Н. Хрусталева. — М.: ИНФРА-М, 2019. — 543 с.
15. Роман Л. Т. Пособие по определению физико-механических свойств промерзающих, мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов / Л. Т. Роман, М. Н. Царапов и др. — М.: Университетская книга, 2018. — 188 с.
16. ГОСТ Р 56353—2015. Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов. — М.: Стандартинформ, 2015. — 39 с.
17. ГОСТ 12536—2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. — М.: Стандартинформ, 2019. — 22 с.
18. ГОСТ 22733—2016. Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов. — М.: Стандартинформ, 2019. — 15 с.



19. Wang Y. *Mathematical Statistics and MATLAB Engineering Data Analysis* / Y. Wang., S. Sui, A. Wang. — Beijing: Tsinghua University Press, 2006. — 328 с.

20. Zhuang C. *Basics of applied mathematical statistics* / C. Zhuang, C. He. — Guangzhou: South China University of Technology Press, 2013. — 426 p.

21. Guo S. *The AHP Method of Orthogonal Trial* / S. Guo, R. Huang // *College mathematics*. — 2004. — Iss. 20(01). — Pp. 114–117.

Дата поступления: 12.09.2023

Решение о публикации: 25.10.2023

**Контактная информация:**

СИНЬ Вэньшао — аспирант; wsxin9607@163.com

КОЛОС Алексей Федорович — канд. техн. наук, доц.;

kolos2004@inbox.ru

ПЕТРЯЕВ Андрей Владимирович — д-р. техн. наук,

ст. науч. сотр.; pgups60@mail.ru

## Experimental Studies of Deformation Parameters of Thawing Soils Based on ANOVA and AHP

Xin Wenshao, A. F. Kolos, A. V. Petryaev

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Wenshao Xin, Kolos A. F., Petryaev A. V. Experimental Studies of Deformation Parameters of Thawing Soils Based on ANOVA and AHP // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 868–877. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-868-877

### Summary

**Purpose:** To study the statistical significance of many factors: the initial temperature of the soil sample  $T_0$ , humidity  $\omega$ , confining pressure  $\sigma_3$  and loading frequency  $f$  on the deformation parameters of thawing soils by the method of orthogonal tests. Based on the method of weight analysis, to study the influence of the weight of various factors on the results of dynamic triaxial tests. To set the regression equation for the deformation parameters. **Method:** Analysis of Variance (ANOVA) is used to test the statistical significance of factors based on orthogonal tests. Using the Analytic Hierarchy Process (AHP), the influence weights of factors on test results are determined through matrix calculations. **Results:** Test factors:  $T_0$ ,  $\omega$ ,  $\sigma_3$  and  $f$  have strong statistical significance for test results. The influence of humidity on test results is more than 50%. The multiple linear regression equation fits the test results well. **Practical significance:** The orthogonal testing method, based on ANOVA and AHP, has the advantage expressed in a small number of trials, a wide coverage of factors, and the analysis of influence weights. The results of ANOVA and weight analysis show that moisture has the greatest influence on the deformation of the subgrade of thawing soils. During the operation of the subgrade, changes in soil moisture must be strictly controlled to prevent engineering accidents.

**Keywords:** Deformation characteristics, thawing soil, Analysis of Variance, Analytic Hierarchy Process, experimental study.

### References

1. GOST 12248—2010. *Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya kharakteristik prochnosti i deformiruemo-sti* [GOST 12248—2010. Soils. Methods for laboratory determination of strength and deformability characteristics]. Moscow: Standartinform Publ., 2011, 82 p. (In Russian)

2. Melnikov P. I., Vyalov S. S. *Ottavayushchie grunty kak osnovaniya sooruzheniy* [Thawing soils as foundations for structures]. Moscow: Nauka Publ., 1981. 95 p. (In Russian)

3. Liu G., Yang P., Zhang T. et al. Deformation properties of thawing silty clay under cyclic loading. *Forest engineering*, 2014, Iss. 30(05), pp. 118–121.

4. Streletsky D. A., Shiklomanov N. I., Grebenets V. I. *Izmenenie nesushchey sposobnosti merzlykh gruntov v svyazi s potepeniem klimata na severe Zapadnoy Sibiri* [Changes in the bearing capacity of frozen soils due to climate warming in the north of Western Siberia]. *Kriosfera Zemli* [Earth's cryosphere]. 2012, Iss. 1 pp. 22–32. (In Russian)
5. Peng L., Liu J. Deformation properties of thawing silty clay under cyclic loading. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, Iss. 32(04), pp. 567–572.
6. Xing Ch. Study on static and dynamics of thawing silty clay in seasonal freezing area: Master's Thesis. Hebei: Hebei University of Architecture, 2020, 74 p.
7. Vakhnin I. S., Kuzmin G. P., Spektr V. V. *Deformatsionnye kharakteristiki ottaivayushchikh gruntov este-stvennogo slozheniya* [Deformation characteristics of thawing soils of natural composition]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Successes of modern natural science]. 2020, Iss. 8, pp. 37–42. (In Russian)
8. *GOST 25100—2011. GOST 25100—2011. Grunty. Klassifikatsiya* [GOST 25100—2011. Soils. Classification]. Moscow: Standartinform Publ., 2018, 45 p. (In Russian)
9. *GOST 12248—2010. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik* [GOST 12248—2010. Soils. Methods for laboratory determination of physical characteristics]. Moscow: Standartinform Publ., 2016, 23 p. (In Russian)
10. Trofimov V. T., Voznesensky E. A., Korolev V. A. *Inzhernaya geologiya Rossii. T. 1. Grunty Rossii* [Engineering geology of Russia. T. 1. Soils of Russia]. Moscow: KDU Publ., 2011, 672 p. (In Russian)
11. Lozhkin V. V. *Diagnostika mineralov rossypey. Prakticheskoe rukovodstvo* [Diagnostics of placer minerals. Practical guide]. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo literatury po geologii i okhrane nedr Publ., 1962, 243 p. (In Russian)
12. Vakhnin I. S. *Deformatsionnye kharakteristiki ottaivayushchikh gruntov o. Ko-tel'nyy (novosibirskie ostrova)* [Deformation characteristics of thawing soils on the island. Boiler room (Novosibirsk Islands)]. Theory and Methods of Polar Science: Proceedings of International youth scientific conference on the polar geodesy, glaciology, hydrology and geophysics. St. Petersburg, 2018, pp. 69–75. (In Russian)
13. Tsarapov M. N., Kotov P. I. *Sovremennye problemy issledovaniya mekhanicheskikh svoystv ottaivayushchikh gruntov* [Modern problems of research into the mechanical properties of thawing soils]. *Lomonosovskie chteniya — 2012: sb. statey* [Lomonosov readings — 2012: collection of articles]. Moscow, 2012.
14. Khrustalev L. N. *Osnovy geotekhniki v kriolitozone: uchebnik* [Fundamentals of geotechnics in permafrost: textbook]. Moscow: INFRA-M Publ., 2019, 543 p. (In Russian)
15. Roman L. T., Tsarapov M. N. et al. *Posobie po opredeleniyu fiziko-mekhanicheskikh svoystv promerzayushchikh, merzlykh i ottaivayushchikh dispersnykh gruntov* [Manual for determining the physical and mechanical properties of freezing, frozen and thawing dispersed soils]. Moscow: Universitetskaya kniga, 2018, 188 p. (In Russian)
16. *GOST R 56353—2015. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya dinamicheskikh svoystv dispersnykh gruntov* [GOST R 56353—2015. Soils. Methods for laboratory determination of the dynamic properties of dispersed soils]. Moscow: Standartinform Publ., 2015, 39 p. (In Russian)
17. *GOST 12536—2014. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya granulomet-richeskogo (zernovogo) i mikroagregatnogo sostava* [GOST 12536—2014. Soils. Methods for laboratory determination of granulometric (grain) and microaggregate composition]. Moscow: Standartinform Publ., 2019, 22 p. (In Russian)
18. *GOST 22733—2016. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya dinamicheskikh svoystv dispersnykh gruntov* [GOST 22733—2016. Soils. Methods for laboratory determination of the dynamic properties of dispersed soils]. Moscow: Standartinform Publ., 2019, 15 p. (In Russian)
19. Wang Y., Sui S., Wang A. *Mathematical Statistics and MATLAB Engineering Data Analysis*. Beijing: Tsinghua University Press, 2006, 328 p.
20. Zhuang C., He C. *Basics of applied mathematical statistics*. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2013, 426 p.
21. Guo S., Huang R. *The AHP Method of Orthogonal Trial*. College mathematics, 2004, Iss. 20(01), pp. 114–117.

Received: September 12, 2023

Accepted: October 25, 2023

#### Author's information:

Wenshao XIN — Postgraduate Student;  
wsxin9607@163.com

Alexey F. KOLOS — PhD in Engineering, Associate Professor; kolos2004@inbox.ru

Andrey V. PETRYAEV — Dr. Sci. in Engineering, Senior Researcher; pups60@mail.ru