Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering https://t-s.today
2022, Том 9, № 4 / 2022, Vol. 9, No 4 https://t-s.today/issue-4-2022.html
URL: https://t-s.today/PDF/08SATS422.pdf
DOI: 10.15862/08SATS422 (https://doi.org/10.15862/08SATS422)

Анализ переменных, влияющих на изменение коэффициента влагопроводности глинистых грунтов

Сухоруков А.В., Бадина М.В., Чурилин В.С., Бурлуцкий А.А., Сиволап В.Е.
ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», Томск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Сухоруков Алексей Владимирович, e-mail: av_suhar@mail.ru

Аннотация. В работе выполнен анализ исследований по определению коэффициента влагопроводности грунтов, проводимый различными авторами, при этом установлено, что влажность и плотность глинистого грунта оказывает значительное влияние на его величину. Рассмотрены методы определения влагопроводности грунтов. Сформулирована цель выполнения исследования, заключающаяся в установлении влияния переменных на изменение коэффициента влагопроводности глинистых грунтов, применяемых для строительства земляного полотна автомобильных дорог на территории Западной Сибири.
В статье рассмотрены ключевые вопросы подготовки и проведения экспериментальной части исследования. Для постановки эксперимента была выбрана модель полного факторного эксперимента ротатабельного планирования второго порядка. Для эксперимента был выбран грунт, отбор которого выполнен из рабочего слоя земляного полотна автомобильной дороги «Тобольск — Тара — Томск» на участке «Тара — Седельниково» в Омской области.
Авторами выполнена обработка полученных результатов исследований методами математической статистики. Установлено, что на значения влагопроводности и интенсивности потока влаги переменная «начальная влажность» влияет незначительно, наибольшее влияние оказывают переменные «масса воды, плотность грунта, уровень воды, полная влагоёмкость, время увлажнения». Факторный анализ полученных результатов показал, что методика проведения испытания по определению коэффициента влагопроводности согласно ОДН 218.046-01 в установке ПКФГ-Ф оценивает влагоперенос в грунте капиллярной влаги с эффектом давления столба воды. Проведенные в работе исследования указывают на заметное влияние переменной «масса воды» и не значительное влиянии переменной «начальная влажность», что может свидетельствовать об отсутствии учёта плёночного механизма миграции влаги при испытании исследуемого грунта в установке ПКВГ-Футурум.
Статья написана на основе диссертационного исследования автора на тему «Обоснование региональных расчётных значений характеристик глинистых грунтов для проектирования дорожных одежд в условиях Западной Сибири» (СГУПС, Новосибирск, 2017) в части использования результатов эксперимента по определению коэффициента влагопроводности.
Ключевые слова: автомобильные дороги; проектирование; дорожная конструкция; дорожная одежда; земляное полотно; водно-тепловой режим грунтов земляного полотна; влагопроводность

Analysis of variables affecting the change in the coefficient of clay soils' moisture conductivity

Alexey V. Sukhorukov, Mariya V. Badina,
Vladimir S. Churilin, Andrey A. Burlutsky, Vitaliy E. Sivolap

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Corresponding author: Alexey V. Sukhorukov, e-mail: av_suhar@mail.ru

Abstract. The paper analyzes studies to determine the coefficient of soil moisture conductivity, conducted by various authors, while it is established that the humidity and density of clay soil have a significant impact on its value. Methods for determining soil moisture conductivity are considered. The study's purpose is stated, which consists in establishing the influence of variables on the change in the coefficient of clay soil moisture conductivity used for the construction of the earth roadbed in Western Siberia.

The article considers the key issues of preparing and conducting the experimental part of the study. To set up the experiment, a full factorial experiment model of second-order rotatable planning was chosen. For the experiment, the soil was selected, the selection of which was made from the working layer of the Tobolsk — Tara — Tomsk highway earth roadbed at the Tara — Sedelnikovo section in the Omsk region.

The authors conducted obtained research results processing by mathematical statistics methods. It has been established that the moisture conductivity values and the moisture flow intensity are slightly affected by the variable "initial humidity", the variables "mass of water, soil density, water level, total moisture capacity, moistening time" have the greatest influence.

The factor analysis of the obtained results showed that the test procedure for determining the coefficient of moisture conductivity according to Sectoral Highway Regulations 218.046-01 in the PKFG-F device evaluates the moisture transfer in the soil of capillary moisture with the effect of water column pressure. The studies carried out in the work indicate a noticeable influence of the variable "mass of water" and a slight influence of the variable "initial moisture", which may indicate that the film mechanism of moisture migration is not taken into account when testing the soil under study in the PKVG-Futurum device.

The article was written based on the author's dissertation research on the topic "Justification of the regional calculated values of the clay soils characteristics for the pavement design in Western Siberia" (Siberian Transport University, Novosibirsk, 2017) in terms of using the experiment results to determine the moisture conductivity coefficient.

Keywords: highways; design; road construction; pavement; subgrade; a water-thermal regime of subgrade soils; moisture conductivity

Введение

Introduction

При проектировании и эксплуатации автомобильных дорог влажность грунтов земляного полотна оказывает значительное влияние на прочность и морозоустойчивость дорожных конструкций, а следовательно, и на эксплуатационные затраты. К наиболее неблагоприятным условиям работы дорожных конструкций специалисты [1; 2] относят, например, близкое залегание грунтовых вод, т. е. при промерзании земляного полотна грунтовые воды влияют на процессы морозного пучения грунтов. Поэтому для прогнозирования влажности грунтов в теле земляного полотна необходимо изучение водно-теплового режима. Компоненты водно-теплового режима в дорожной конструкции можно разделить на две взаимные составляющие — изменение температуры и влажности. При этом увлажнение грунтов земляного полотна участков автомобильных дорог, расположенных в неблагоприятных гидрологических условиях, происходит вертикально (пополнение из грунтовых вод) и из бокового притока (кюветы) [3].

Использование коэффициента влагопроводности ($K_{вл}$) для определения величины морозного пучения и толщины теплоизолирующего слоя предусмотрено методикой в соответствии с ОДН 218.046-01[1].

Методы определения коэффициента влагопроводности подразделяются на три группы — стационарного, квазистационарного и нестационарного влагообмена [4]. При стационарном методе определения $K_{вл}$ приток влаги к образцу постоянный. В таком случае проведение лабораторных экспериментов проходит в изотермических условиях с увлажнением грунтового образца снизу. О наступлении стационарного влагообмена свидетельствует равенство объёмов жидкой влаги в образце и испарения. Стационарный способ является более трудоёмким и требует привлечения исполнителей высокой квалификации. В тоже время водонасыщение грунта будет максимальным по отношению к теоретически возможному. Когда грунт адсорбирует влагу он создаёт водяную плёнку, которая притягивается к скелету грунта. В грунте также есть поровые пространства, заполненные воздухом (рис. 1), которые в полевых условиях трудно устранить.

[1] ОДН 218.046-01. Проектирование нежёстких дорожных одежд. Государственная служба дорожного хозяйства Министерства транспорта Российской Федерации. — М.: Информавтодор, 2001. — 145 с.

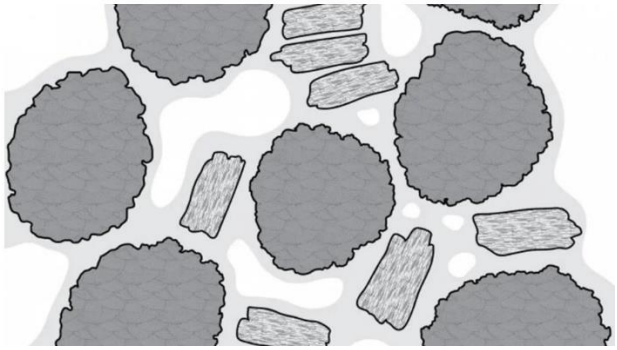


Рисунок 1. *Расположение частиц грунта и затянутые пузырьки воздуха (источник www.metergroup.com)*

Figure 1. *Soil particles arrangement and entrained air bubbles (source www.metergroup.com)*

Следует отметить, что полученные значения влагопроводности стационарным способом имеют завышенные значения по сравнению с натурными измерениями.

В зависимости от разновидности грунта одно испытание может продолжаться от 5 до 30 сут. Это обусловлено необходимостью достижения стационарного состояния образца [5]. Аналогичные недостатки проведения испытаний характерны и для методов квазистационарного влагообмена, выполняемых, например, на приборах Ричардсона [6], Юнгса [7] или по способу горизонтальных колонн [8].

В связи с этим широкое практическое применение получили методы нестационарного влагообмена, при которых приток влаги через единичную площадь в единицу времени является величиной переменной. Среди них наиболее простым является способ построения интегральной функции величины коэффициента влагопроводности от влажности идентичных образцов, насыщавшихся разное по продолжительности время. Однако и он не лишён недостатков, связанных с трудностью формования идентичных образцов для проведения опытов [4].

Для того, чтобы несколько упростить методику определения коэффициента влагопроводности нестационарным методом, проф. И.А. Золотарь предложил определять величину $K_{вл}$ исходя из объёма впитавшейся влаги через единицу площади образца за определённое время [1]. Такой подход не требует привлечения высококвалифицированных специалистов и применения сложных прецизионных приборов [4]. Продолжительность испытания в таком случае может составлять от 2 до 3 ч., что является одним из преимуществ по сравнению с ранее используемым методом проведения эксперимента в лабораторных условиях. Этот подход позднее был реализован в методике определения

коэффициента влагопроводности на приборе конструкции[2] И.А. Золотаря, Г.И. Собко, Ю.Г. Лазарева и отражён в Методических рекомендациях по обеспечению надёжности автомобильных дорог[3] и ОДН 218.046-01.

В монографии под редакцией проф. И.А. Золотаря, Н.А. Пузакова, В.М. Сиденко [1] показаны изменения величины коэффициента влагопроводности суглинков средних и тяжёлых пылеватых, отобранных на железной дороге Ивдель-Обь, а также установлена зависимость $К_{вл}$ от коэффициента уплотнения ($К_у$) по данным 265 испытаний Н.А. Клёсс. По графикам зависимости $К_{вл}$ от $К_у$ было выявлено, что при достижении $К_у = 1$, величина коэффициента влагопроводности стремится к нулю. Это также подтверждено результатами исследований Н.П. Вырко и И.И. Леоновича [9].

В.М. Маркуц в своих работах отметил, что основным недостатком метода проф. И.А. Золотаря является «невоспроизводимость опытов в одной и той же серии экспериментов и нерепрезентативность результатов, что проявляется в большом разбросе полученных значений» [5]. В.М. Маркуц уточнил методику проведения лабораторного эксперимента по методу проф. И.А. Золотаря, а также предложил методику обработки результатов испытаний. На этой основе им были установлены [4] основные закономерности, определяющие величину коэффициентов влагопроводности для песков пылеватых мелких ($К_{вл}$ от 4,5 до 6,0 см^2/ч), супесей ($К_{вл}$ от 2,5 до 3,5 см^2/ч), а также суглинков ($К_{вл}$ от 1,5 до 2,4 см^2/ч).

Гораздо сложнее стоит задача определения коэффициента влагопроводности промерзающих грунтов. В основном из-за сложности достоверного аналитического описания процессов переноса влаги во время промерзания грунта. Одними из первых стали попытки установления $К_{вл}$ промерзающих грунтов и его зависимости от температуры предпринятые Л.В. Чистотиновым и Н.С. Ивановым [10]. Авторами было установлено, что при водонасыщении образцов в изотермических условиях при температуре близкой к 0°С величина коэффициента влагопроводности грунта будет характерна для приближенного описания процессов миграции влаги в промерзающих грунтах. При этом основной поток влаги будет двигаться из зоны талого

[2] Пат. 6627:21.0421.04 Российская Федерация. Прибор для определения коэффициента влагопроводности талых связных грунтов нарушенной структуры нестационарным методом / Золотарь И.А., Собко Г.И., Лазарев Ю.Г.; заявитель и патентообладатель Золотарь Израиль Абрамович, Собко Геннадий Иванович, Лазарев Юрий Георгиевич. — № 97106667/20; опубл. 21.04.1997.

[3] Методические рекомендации по обеспечению надёжности автомобильных дорог в период их проектирования, строительства и эксплуатации. — М.: РАО «Россавтодор», 1998. — 80 с.

[4] Маркуц, В.М. Установление расчётных характеристик земляного полотна нефтепромысловых дорог Западной Сибири с учетом особенностей водно-теплового режима: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.14 / Маркуц Вениамин Михайлович. — М., 1986. — 20 с.

грунта к зоне промерзающего грунта, а поток внутри промерзающей зоны составит незначительную величину [4].

В исследованиях И.Ю. Видяпина и В.Г. Чеверева [11] получена величина влагопроводности промерзающих засоленных грунтов. Эксперименты показали, что с увеличением засоленности грунтов влагопроводность талой зоны падает, а мёрзлой зоны возрастает. При небольших значениях концентрации солевого раствора этот эффект проявляется только при отрицательной температуре до минус 3°С, а при увеличении концентрации — возрастает и при температуре ниже минус 3°С [4].

В работе А.И. Шеслера, А.А. Миронова и В.Н. Ефименко [12] установлена зависимость коэффициента влагопроводности грунта от его влажности, плотности и температуры на основе экспериментальных данных [4]. Испытания были проведены на суглинке тяжёлом пылеватом. Авторами было показано, что на величину $K_{вл}$ существенное влияние оказывает плотность грунта, поскольку с её увеличением коэффициент влагопроводности уменьшается. Влияние влажности также существенно, а влияние температуры незначительно и проявляется в изменении подвижности воды за счёт снижения её поверхностного натяжения при увеличении температуры.

В Северо-Восточном федеральном университете имени М.К. Аммосова специалистами выполнены исследования влагопроводных свойств грунтов земляного полотна автомобильных дорог Центральной Якутии [13]. По результатам исследований отмечено, что разновидность грунта и степень его уплотнения имеют большое значение для капиллярного поднятия влаги. При этом авторы считают [13], что увеличение степени уплотнения грунта земляного полотна является одним из наиболее эффективных мероприятий по стабилизации водно-теплового режима дорожной конструкции [4].

Также следует отметить работы, направленные на определение коэффициента влагопроводности почв. В работе Н.А. Муромцева [14] показано, что незначительное уменьшение содержания влаги в почве может существенно снизить величину коэффициента влагопроводности. В исследованиях С.А. Лаврова получена зависимость $K_{вл}$ мёрзлых почв от величины и условий формирования начальной льдистости. Впервые установлено, что значения $K_{вл}$ почв с льдистостью, сформированной в процессе промерзания, выше, чем в условиях её формирования при кристаллизации инфильтрующейся влаги [4].

Обзор и анализ исследовательских работ позволили установить, что влажность и плотность грунта оказывают значительное влияние на коэффициент влагопроводности глинистых грунтов. В связи с этим целесообразно изучить влияние этих характеристик на коэффициент

влагопроводности глинистых грунтов, характерных для территории Западной Сибири и применяемых при строительстве земляного полотна автомобильных дорог региона.

Статья написана на основе диссертационного исследования [5] соавтора в части использования результатов эксперимента по определению коэффициента влагопроводности глинистого грунта. Полученные результаты использованы для анализа влияния не только влажности и плотности грунта на коэффициент влагопроводности, но и для оценки других переменных.

Методы

Methods

Для эксперимента выбран грунт, отбор которого выполнен из рабочего слоя земляного полотна автомобильной дороги «Тобольск — Тара — Томск» на участке «Тара — Седельниково» в Омской области. По результатам лабораторных исследований установлено, что отобранный грунт содержит 24,87 % песчаной, 46,84 % пылеватой и 28,29 % глинистой фракций (табл. 1) [15].

Таблица 1 / Table 1

Свойства исследуемого грунта

Properties of the soil under study

Влажность грунта на границе текучести, д. ед. The soil moisture content at the liquid limit, units	Влажность грунта на границе раскатывания, д. ед. The moisture content of the soil at the plastic limit, units	Число пластичности, д. ед. Plastic number, units	Показатель текучести, д. ед. Liquid rate, units	Гранулометрический состав grain size composition						
				Размер фракции, мм; содержание, % Fraction size, mm; content, %						
				0,50–0,25	0,25–0,10	0,10–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001
				0,87	3,45	20,55	32,96	13,88	19,47	8,82
0,38	0,23	0,15	< 0	24,87			46,84		28,29	

Составлено авторами на основе [15] / Compiled by the authors based on [15]

Согласно действующей классификации (ГОСТ 33063-2014 [6]), исследуемый грунт наиболее распространён на территории Западной Сибири [16] и относится к суглинку тяжёлому, пылеватому, твёрдому.

[5] Сухоруков, А.В. Обоснование региональных расчётных значений характеристик глинистых грунтов для проектирования дорожных одежд в условиях Западной Сибири: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / Сухоруков Алексей Владимирович. — Сиб. гос. ун-т путей сообщ., 2017. — 166 с.

[6] ГОСТ 33063-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Классификация типов местности и грунтов. — Введ. 11.08.2015. — М.: Стандартинформ, 2016. — 54 с.

Для постановки эксперимента была выбрана модель полного факторного эксперимента (ПФЭ) ротатабельного планирования второго порядка. Такой подход позволил определить минимальное количество опытов с сохранением статистической достоверности результатов [17]. Факторы, интервалы их варьирования, а также уровни и плечи звёздных точек приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Экспериментальные факторы и интервалы их варьирования

Experimental factors and intervals of their variation

Наименование фактора Factor name	Единица измерения Measurement unit	Код фактора Factor code	Интервал варьирования фактора Factor variability interval	Уровни и плечи звёздных точек Star points levels and shoulders				
				-1,414	-1	0	+1	+1,414
Влажность грунта Soil moisture	%	x_1	2,0	12,2	13	15	17	17,8
Плотность скелета грунта Particle specific gravity	г/см^3	x_2	0,1	1,51	1,55	1,65	1,75	1,79

Составлено авторами на основе [17] / Compiled by the authors based on [17]

Матрица планирования эксперимента имеет три блока (табл. 3). Первый блок построен по принципу планирования типа 2^2. Во второй блок входят значения звёздных точек, а в третий — нулевые точки.

Таблица 3 / Table 3

Матрица планирования эксперимента

Experiment planning matrix

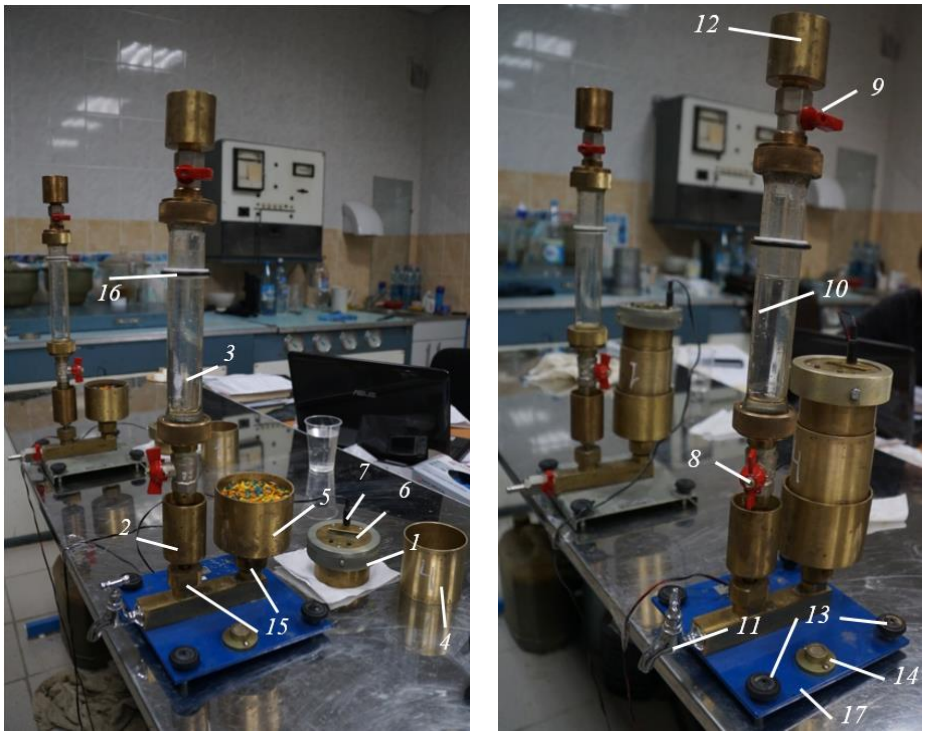
Блоки матрицы Matrix Blocks	Номер опыта Experiment number	Факторы в условных единицах Factors in conventional units	
		x_1	x_2
Планирование типа 2^2 Type 2^2 planning	1	+1	+1
	2	-1	+1
	3	+1	-1
	4	-1	-1
Звёздные точки Star points	5	+1,414	0
	6	-1,414	0
	7	0	+1,414
	8	0	-1,414
Нулевые точки Zero points	9	0	0
	10	0	0
	11	0	0
	12	0	0
	13	0	0

Составлено авторами на основе [17] / Compiled by the authors based on [17]

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Для определения $К_{вл}$ использовали прибор ПКВГ-Футурум (ПКВГ-Ф). Стоит отметить, что методика работы с прибором ПКВГ-Ф имеет некоторые отличия от методики выполнения исследований на приборе, рекомендованным ОДН 218.046-01. Однако различие методик обусловлено лишь разницей в конструкциях приборов.

Прибор ПКВГ-Ф включает следующие основные конструктивные элементы (рис. 2): 1 — регистрирующий блок со встроенным в панель (6) минутным таймером, датчиком определения влажности и проводом подключения к сети переменного тока (7); 2 — камеру питания образца водой; 3 — питающий сосуд со шкалой расхода воды — 10; 4 — цилиндр-грунтонос; 5 — форму для фильтрующего материала; 8 — питающий вентиль; 9 — заливной вентиль; 11 — сливной вентиль; 12 — заливной цилиндр; 15 — соединительные трубки; 16 — фиксирующее кольцо; 17 — основание прибора с винтами для регулировки (13) и круглым уровнем (14).



а *б*

Рисунок 2. *Конструкция прибора ПКВГ-Ф: а — в процессе подготовки к испытанию; б — во время проведения эксперимента (фото авторов)*

Figure 2. *Design of the PKVG-F device: a — during the experiment preparation process; b — during the experiment (photo by the authors)*

Работа прибора ПКВГ-Ф построена на принципе сообщающихся сосудов, которые образуют форма для фильтрующего материала и питающая камера. Соединение питающего сосуда с питающей камерой при помощи трубки с косым отверстием, расположенной на уровне

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

поверхности фильтрационного материала, при закрытом заливном вентиле обеспечивает их работу как сосуд Мариотта.

Подготовка и проведение испытаний выполнялись в следующем порядке[4]:

1. Пробу грунта массой около 5 кг высушивали при комнатной температуре и размельчали.

2. Определяли величину оптимальной влажности (W_{opt}) и максимальной плотности ($\rho_{d\ max}$) грунта по ГОСТ 22733-2016[7].

3. Повторно высушивали и размельчали отобранный для испытания грунт, а затем увлажняли его до заданного в опыте значения влажности и не менее 12 часов выдерживали в эксикаторе.

4. Выдержанный грунт с заданным значением влажности загружали в цилиндр-грунтонос и уплотняли его до требуемой в опыте плотности при помощи малого прибора СоюзДорНИИ.

Для равномерного распределения плотности образца грунт засыпали в три приёма равными по весу порциями. Количество ударов подбирали экспериментально, выполняя пробное уплотнение. Для контроля плотности образца производили его взвешивание на лабораторных весах.

5. Параллельно с подготовкой образца грунта выполняли подготовку прибора к работе в следующей последовательности:

5.1 винтами для регулировки основания прибора приводили его в горизонтальное положение по круглому уровню;

5.2 закрыв сливной и питающий вентили, заполняли форму для фильтрационного материала фильтрующим заполнителем;

5.3 поверхность фильтрующего заполнителя выравнивали в соответствии с имеющейся насечкой на внутренней стенке формы для фильтрующего материала и заполняли её водой до верхнего обреза формы;

5.4 наполняли питающий сосуд водой через заливной цилиндр до верхней отметки по шкале;

5.5 закрыв заливной, питающий вентиль приводили в положение «открыто»;

5.6 открыв сливной вентиль, сливали воду до появления в питающем сосуде восходящих пузырьков воздуха, после чего вентиль приводили в положение «закрыто»;

[7] ГОСТ 22733-2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. — Введ. 01.01.2017. — М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2016. — 15 с.

5.7 на фильтрующий материал укладывали фильтровальную бумагу, далее в процессе стабилизации уровня воды в питающем сосуде снова дожидались появления восходящих пузырьков воздуха;

5.8 по окончании стабилизации уровня воды в питающем сосуде отмечали фиксирующим кольцом её начальный уровень ($H_н$) и заносили в журнал испытаний;

5.9 регистрирующий блок подключали к сети переменного тока. При этом на панели загорался световой индикатор и на минутном таймере появлялись показания «00.0», что указывало на готовность прибора к работе.

6. Устанавливали на поверхность подготовленного цилиндра-грунтоноса с грунтом регистрирующий блок немного «притирая» его для обеспечения плотного контакта датчика влажности с поверхностью грунта. Затем нажатием кнопки «СБРОС» на панели регистрирующего блока приводили датчик влажности в рабочее состояние, фиксируя этим начальную влажность образца в зоне контакта.

7. Цилиндр-грунтонос с находящимся на поверхности образца грунта регистрирующим блоком устанавливали на фильтрующий материал в форме. Далее нажатием кнопки «СБРОС», а после короткого звукового сигнала кнопки «ПУСК» включали минутный таймер, свидетельствовавший о начале испытания.

Рисунок 3. *Панель блока с минутным таймером, зарегистрировавшим конец испытания (фото авторов)*

Figure 3. *Block panel with a minute timer that registered the end of the experiment (photo by the authors)*

Рисунок 4. *Датчик влажности для регистрации выхода фронта увлажнения грунта в конце испытания (фото авторов)*

Figure 4. *Humidity sensor for recording the exit of the soil moisture front at the end of the experiment (photo by the authors)*

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

По мере увлажнения грунтового образца на минутном индикаторе помимо прошедшего времени указывался индекс (–, =, ≡), характеризующий изменение влажности испытываемого образца.

Появление индекса ≡ (рис. 3) указывает на то, что фронт увлажнения подходит к верхнему торцу образца и испытание в скором времени закончится. При выходе фронта увлажнения на верхнюю поверхность грунтового образца (рис. 4) датчик регистрирует изменение влажности, подаёт звуковой сигнал и останавливает минутный таймер, фиксировавший время увлажнения образца.

8. После звукового сигнала закрывали питающий вентиль и по водомерной шкале фиксировали конечный уровень воды ($H_к$) в питающем сосуде.

Для выполнения повторной серии испытаний необходимо заменить фильтровальную бумагу или промыть её водой и повторить операции 3–8 в изложенной выше последовательности.

По определённым в ходе испытания времени и количеству впитавшейся воды вычисляли значения коэффициента влагопроводности грунта по зависимости из ОДН 218.046-01 (1) и зависимости И.А. Золотаря (2) [1]:

$$K_{вл} = \frac{4}{3{,}14 \cdot d^4 \cdot t}\left[\frac{q}{\rho_s \cdot (W_{пв} - W_н)}\right]^2, \quad (1)$$

где d — внутренний диаметр цилиндра-грунтоноса, см; t — время увлажнения образца, час; ρ_s — плотность сухого грунта, г/см^3; q — количество впитавшейся воды в образец грунта, г; $W_{пв}$ — полная влагоёмкость испытываемого грунта, д. ед.; $W_н$ — начальная влажность испытуемого образца грунта, д. ед.

$$K_{вл} = \frac{1}{\pi\tau} \cdot \left(\frac{(2\rho \cdot (100 + w)}{d^2 \gamma_{вл} (W_{пв} - W)}\right)^2, \quad (2)$$

где τ — время водонасыщения, ч; ρ — количество впитавшейся в образец воды, г; $\gamma_{вл}$ — плотность грунта при начальной влажности, г/см^3; $W_{пв}$ — полная влагоёмкость испытываемого грунта, %; W — начальная влажность испытываемого грунта, %.

Интенсивность потока влаги вычисляли по уравнению [18]:

$$I = Q\frac{10}{S\tau}, \quad (3)$$

где Q — расход воды, см^3; S — площадь основания образца, см^2; τ — время увлажнения, ч или мин.

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Результаты

Results

Наличие выбросов в экспериментальных данных оценивалось диаграммой размаха (рис. 5). Верхняя и нижняя граница дисперсии назначена интерквантильным размахом IQR = 1,5.

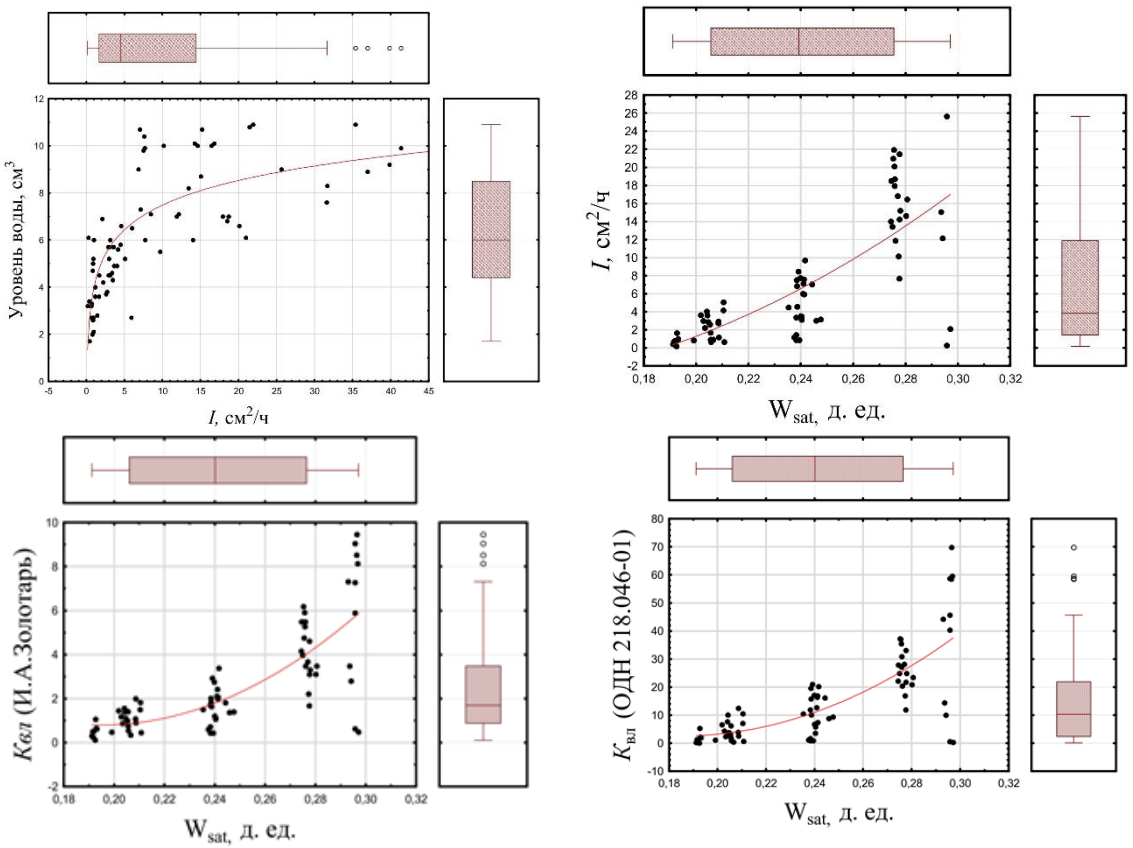


Рисунок 5. *Диаграммы размаха исследуемых параметров (величин) (разработано авторами)*

Figure 5. *Box-and-whisker plot of the studied parameters (values) (developed by the authors)*

По диаграммам размаха установлены четыре выброса экспериментальных данных, которые исключены из анализируемой генеральной совокупности. Положение значений влагопроводности положительно ассиметричное, следовательно, их медиана меньше среднего значения. Исследование взаимосвязи значений переменных выполнено посредством факторного анализа главных компонентов с помощью программы «Statistica». В таблице 5 представлена корреляционная матрица между исследуемыми переменными.

На значения влагопроводности и интенсивности потока влаги переменная «начальная влажность» влияет незначительно. При этом наибольшее влияние на влагопроводность и интенсивность потока влаги оказывают переменные «масса воды, плотность грунта, плотность сухого грунта, уровень воды, полная влагоёмкость, время увлажнения».

Таблица 5 / Table 5

Корреляционная матрица между исследуемыми переменными

Correlation matrix between the studied variables

Переменные Variables		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	1	1,00	0,96	0,96	0,79	-0,56	0,69	-0,13	-0,71	-0,70	0,72
$K_{вл}$ (1)	2	0,96	1,00	0,96	0,74	-0,67	0,76	-0,15	-0,78	-0,76	0,71
$K_{вл}$ (2)	3	0,96	0,96	1,00	0,64	-0,69	0,70	-0,004	-0,69	-0,70	0,60
Масса воды Mass of water	4	0,79	0,74	0,64	1,00	-0,18	0,63	-0,50	-0,76	-0,64	0,92
Время увлажнения Humidification time	5	-0,56	-0,67	-0,69	-0,18	1,00	-0,61	-0,08	0,56	0,59	-0,26
Полная влагоёмкость Full moisture capacity	6	0,69	0,76	0,70	0,63	-0,61	1,00	0,02	-0,96	-1,00	0,71
Начальная влажность Initial humidity	7	-0,13	-0,15	-0,003	-0,50	-0,08	0,02	1,00	0,24	-0,03	-0,47
Плотность грунта Ground density	8	-0,71	-0,78	-0,69	-0,76	0,56	-0,96	0,24	1,00	0,96	-0,82
Плотность сухого грунта Dry ground density	9	-0,70	-0,76	-0,70	-0,64	0,59	-1,00	-0,03	0,96	1,00	-0,71
Уровень воды Water level	10	0,72	0,71	0,60	0,92	-0,26	0,71	-0,47	-0,82	-0,71	1,00
Среднее арифметическое Average		12,00	6,94	2,05	18,86	58,38	0,24	0,15	1,90	1,65	6,04
Стандартное отклонение Standard deviation		10,98	6,76	1,60	13,46	25,06	0,03	0,02	0,11	0,09	2,54

Примечание: Номера столбцов соответствуют нумерации индексов переменных. Составлено авторами / Note: The column numbers correspond to the numbering of the variable indexes. Compiled by the authors

Переменные «плотность грунта» и «плотность сухого грунта» взаимосвязанные и поэтому предположительно, их возможно объединить в один кластер. Для проверки объединения однородных переменных в одну группу выполним кластеризацию методом одиночных связей (рис. 6).

Видно, что при втором шаге происходит изменение расстояния связи по шкале *y*, равное 0,05. Спроецировав это расстояние на дендрограмму, установили 5 кластеров. Следовательно, переменные «плотность грунта» и «плотность сухого грунта» можно объединить в один кластер. Так как в формулах 1–2 в расчёте участвует переменная «плотность грунта», тогда переменные 8 и 9 объединяем в кластер «плотность грунта».

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

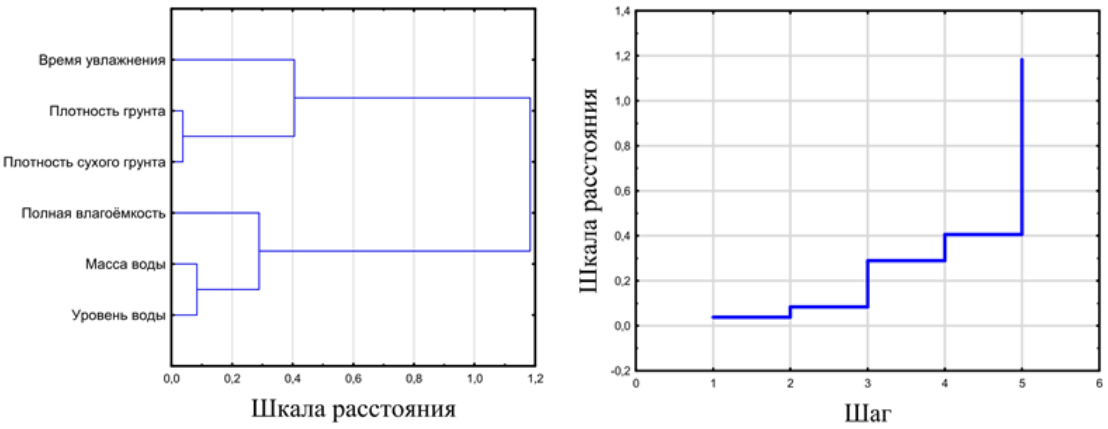


Рисунок 6. *Дендрограмма и график кластеризации переменных (разработано авторами)*

Figure 6. *Dendrogram and variable clustering plot (developed by the authors)*

Методом главных компонентов выполним факторный анализ при минимальном собственном значении, равном 0, и максимальном количестве факторов — 6. В таблице 6 представлены значения факторных нагрузок.

Таблица 6 / Table 6

Факторные нагрузки

Factor loadings

Переменные Variables	Фактор 1 Factor 1	Фактор 2 Factor 2	Фактор 3 Factor 3	Фактор 4 Factor 4	Фактор 5 Factor 5	Фактор 6 Factor 6
Уровень воды Water level	**0,921**	0,262	0,138	0,139	-0,213	-0,001
Плотность грунта Ground density	**-0,964**	0,166	-0,046	0,201	-0,030	0,019
Начальная влажность Initial humidity	-0,377	**-0,788**	0,465	0,143	-0,005	-0,005
Полная влагоёмкость Full moisture capacity	**0,889**	-0,392	0,159	-0,174	0,012	0,018
Время увлажнения Humidification time	-0,525	**0,644**	0,533	-0,158	-0,001	0,0002
Масса воды Mass of water	**0,879**	0,351	0,162	0,218	0,176	0,001
Пояснительная переменная Explanatory variable	3,757	1,409	0,573	0,183	0,077	0,0007

Примечание: полужирным цветом выделены переменные, оказывающие влияние на соответствующий фактор. Составлено авторами / Note: Variables that affect the corresponding factor are highlighted in bold. Compiled by the authors

Из данных таблицы 6 следует, что два фактора описывают взаимосвязь переменных. Первый фактор описывает 62 % дисперсии. Общая накопленная дисперсия первого и второго фактора составляет 86 %. Для новых координат переменных, полученных в результате расчёта факторной нагрузки, построен график рассеивания (рис. 7).

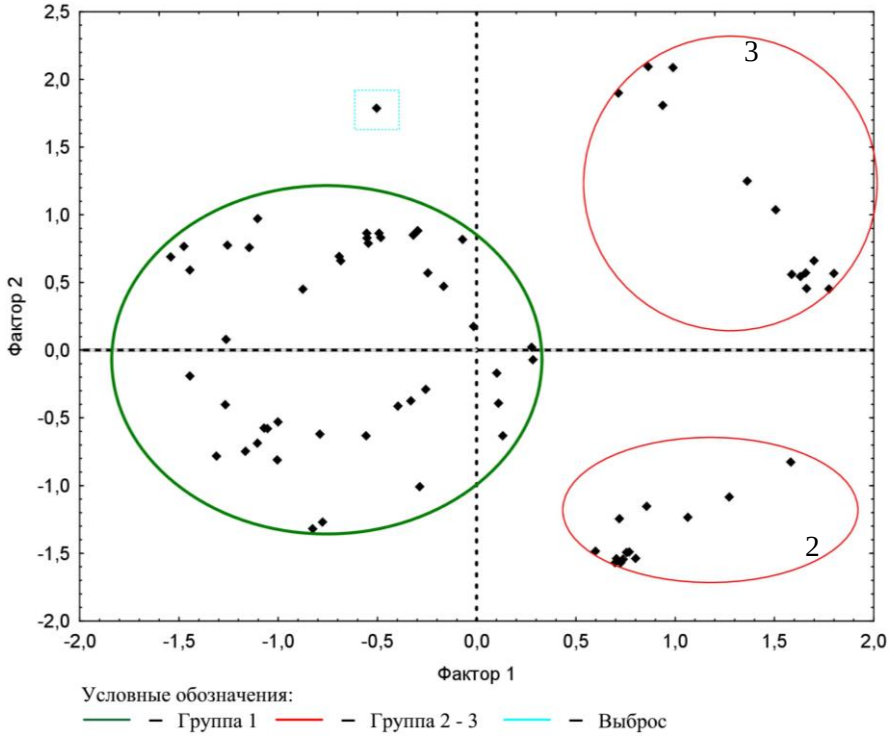


Рисунок 7. *График рассеивания переменных для новых координат (составлено авторами)*

Figure 7. *Variable scatter plot for new coordinates (compiled by the authors)*

На графике рассеивания обнаружен один выброс (аномальное значение), при этом выявлено две группы переменных, объединённых фактором 1 и 2. В результате анализа графика рассеивания переменных и корреляционной матрицы (табл. 5) группу 1 можно объединить одним механизмом миграции влаги, который описывается уравнениями 1–3. Группа 3 имеет примерно одинаковый вес влияния на фактор 1 и 2. Факторный анализ полученных результатов показывает, что методика проведения испытания по определению коэффициента влагопроводности согласно ОДН 218.046-01 в установке ПКФГ-Ф оценивает влагоперенос в грунте капиллярной влаги с эффектом давления столба воды.

Заключение

Conclusion

Инженер-исследователь В. Штукенберг [19] предложил капиллярную гипотезу как основной механизм движения влаги в грунтах земляного полотна. Гипотеза заключалась в миграции влаги в результате капиллярного всасывания из талых в промерзающие слои по порам, образующимся при кристаллизации влаги. Представленную гипотезу нельзя признать полностью верной, так как при температуре, близкой к 0°С, капиллярная влага переходит в твёрдое состояние и отсутствует

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

явление мениска [19; 20]. По мнению Гольдштейна М.Н. [21] капиллярный механизм обеспечивает подток необходимого количества влаги к фронту промерзания грунтового массива.

Исследования, проведённые в институте мерзлотоведения АН СССР [22], установили основной механизм миграции влаги в водонасыщенных грунтах. Определяющее значение миграции влаги в грунтах имеют адсорбционные силы минерального скелета, обусловленное «плёночно-кристаллизационным» механизмом. Впоследствии полученные выводы подтвердились в работе [23].

Установлено, что переменные, входящие в формулы 1, 2 для определения коэффициента влагопроводности и интенсивности потока влаги (формула 3), имеют близкую связь. Наибольшая корреляционная связь 0,6 и более установлена для переменных — «масса воды, полная влагоёмкость, плотность грунта, время увлажнения».

При кластерном анализе были объединены переменные (плотность и плотность сухого грунта) для выполнения факторного анализа. Таким образом, в факторном анализе участвовало 7 переменных. В результате факторного анализа определён основной механизм миграции влаги (капиллярный), который учитывается в случае проведения нестационарным методом на приборе конструкции ПКВГ-Футурум при измерении коэффициента влагопроводности.

Заметное влияние переменной «масса воды» в факторе 1 и не существенное влияние переменной «начальная влажность» (менее 0,4) может свидетельствовать об отсутствии учёта плёночного механизма миграции влаги при испытании исследуемого грунта в установке ПКВГ-Футурум.

Для исключения влияния давления столба воды при определении коэффициента влагопроводности рекомендуем внести изменения в конструкцию прибора ПКВГ-Футурум. При этом необходимо выполнить сопоставление результатов оценки коэффициента влагопроводности, полученного в лабораторных и полевых условиях.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на детальное изучение влияния температуры на коэффициент влагопроводности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд / Под ред. проф. А.И. Золотаря [и др.]. — М.: Транспорт, 1971. — 415 с.
2. **Ефименко, С.В.** Исследования состава и свойств глинистых грунтов районов Западной Сибири для назначения их расчётных характеристик / С.В. Ефименко // Вестник Том. гос. архитектурно-строит. ун-та. — 2005. — № 1. — С. 213–220.

3. Water in Road Structures. Movement, Drainage and Effects. / DOI https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8562-8. — Под ред. A. Dawson. — Дордрехт: Springer, 2008. — 438 с. — URL: https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4020-8562-8 (дата обращения: 01.11.2022).
4. **Калинкин, М.Ю.** Анализ существующих методов определения коэффициента влагопроводности грунтов / М.Ю. Калинкин, М.В. Бадина, А.В. Сухоруков // Избранные доклады 62-й университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых, Томск, 26 апреля 2016 года / Томский государственный архитектурно-строительный университет Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2016. — С. 277–280. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27275263 (дата обращения: 01.11.2022).
5. **Маркуц, В.М.** Определение коэффициента капиллярной диффузии в грунтах земляного полотна / В.М. Маркуц // Автомобильные дороги. — 1985. — № 4. — С. 22–23.
6. **Richards, L.A.** Physical Processes Determining Water Loss from Soil / L.A. Richards, W.R. Gardner, Ogata Gen. — DOI https://doi.org/10.2136/sssaj1956.03615995002000030004x // Soil Science Society of America Journal. — 1956. — Т 173. — С. 310–314. — URL: https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1956.03615995002000030004x (дата обращения: 01.11.2022).
7. **Youngs, E.G.** Moisture Profile During Vertical Infiltration / E.G. Youngs // Soil Science. — 1957. — Т 84. — № 4. — С. 283–290. — URL: https://journals.lww.com/soilsci/citation/1957/10000/moisture_profiles_during_vertical_infiltration.3.aspx (дата обращения: 01.11.2022).
8. **Глобус, А.М.** Экспериментальная гидрофизика почв / А.М. Глобус. — Ленинград: Гидрометеоиздат, 1969. — 355 с.
9. **Леонович, И.И.** Глубина промерзания грунтов — важнейший фактор водно-теплового режима земляного полотна / И.И. Леонович, Н.П. Вырко // Дорожное строительство. — 2011. — № 5. — С. 27–35. — URL: https://elib.belstu.by/bitstream/123456789/47997/1/Леонович.%20Вырко_Глубина.pdf (дата обращения: 02.11.2022).
10. **Чистотинов, Л.В.** Миграция влаги в промерзающих неводонасыщенных грунтах / Л.В. Чистотинов. — М.: Наука, 1973. — 144 с.
11. **Видяпин, И.Ю.** Влагопроводность промерзающих засоленных грунтов / И.Ю. Видяпин, В.Г. Чеверев // Криосфера Земли. — 2008. — Т 12. — № 4. — С. 43–45. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11706192 (дата обращения: 02.11.2022).
12. **Шеслер, А.И.** Определение коэффициентов тепло- и влагопроводности суглинистых грунтов земляного полотна / А.И. Шеслер, А.А. Миронов, В.Н. Ефименко // Труды ГИПРОДОРНИИ / М.: Б.И., 1976. — С. 82–94.
13. **Николаева, Г.О.** Исследование влагопроводных свойств грунтов земляного полотна автомобильных дорог Центральной Якутии / Г.О. Николаева // Транспортное дело России. — 2018. — № 6. — С. 347–351. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36905519 (дата обращения: 20.10.2022).
14. Внутрипочвенный влагообмен, водопотребление и водообеспеченность многолетних культурных травостоев / Н.А. Муромцев, П.И. Коваленко, Н.А. Семенов [и др.]. — Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2013. — 300 с. — URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=21045320 (дата обращения: 20.10.2022).
15. **Сухоруков, А.В.** Экспериментальные исследования коэффициента влагопроводности глинистых грунтов / А.В. Сухоруков, М.Ю. Калинкин // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 26–29 апреля 2016 г.: в 7 т. Т. 6: Строительство и архитектура / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ); под ред. И.А. Курзиной, Г.А. Вороновой Томск: Изд-во ТПУ, 2016. — С. 58–60. — URL: https://earchive.tpu.ru/handle/11683/25979 (дата обращения: 20.10.2022).

16. **Сухоруков, А.В.** Обоснование расчётных значений прочностных и деформационных характеристик глинистых грунтов для проектирования дорожных одежд в экономически перспективных районах Западной Сибири / А.В. Сухоруков. — DOI https://doi.org/10.15862/08SATS419 // Транспортные сооружения. — 2019. — Т 6. — № 4. — С. 08SATS419. — URL: https://t-s.today/08SATS419.html (дата обращения: 20.10.2022).
17. **Сухоруков, А.В.** Определение коэффициента влагопроводности глинистых грунтов нестационарным методом / А.В. Сухоруков, М.Ю. Калинкин // Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы (МНТ-2016): материалы III Международной научной конференции студентов и молодых ученых, Томск, 22–25 ноября 2016 года / Томский государственный архитектурно-строительный университет Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2016. — С. 176–179. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28797456 (дата обращения: 20.10.2022).
18. **Муромцев, Н.А.** Определения коэффициента влагопроводности почв в почвенных колоннах и лизиметрах / Н.А. Муромцев. — DOI https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-72-84-95 // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. — 2013. — № 72. — С. 84–95. — URL: https://bulletin.esoil.ru/jour/article/view/525/409 (дата обращения: 20.11.2022).
19. **Штукенберг, В.А.** Заметка о пучинах на железных дорогах и о мерах для уничтожения их / В.А. Штукенберг. — Санкт-Петербург: тип. М-ва пут. сообщ. (А. Бенке), 1885. — 30 с.
20. Historical Perspectives in Frost Heave Research. The Early Works of S. Taber and G. Beskow / Под ред. Black P.B., Hardenberg M.J. — Нью-Гемпшир U.S. Army Corps of Engineers Cold Regions Research & Engineering Laboratory, 1991. — 167 с. — URL: https://archive.org/details/DTIC_ADA247395/mode/2up (дата обращения: 17.11.2022).
21. **Гольдштейн, М.Н.** Деформации земляного полотна и оснований сооружений при промерзании и оттаивании / М.Н. Гольдштейн. — М.: изд-во и 1-я тип. Трансжелдориздата, 1948. — 212 с. — (Труды Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта; Вып. 16).
22. **Боженова, А.П.** Экспериментальные исследования механизмов передвижения влаги в промерзающих грунтах / А.П. Боженова, Ф.Г. Бакулин // Мат-лы по лаборат. исследованиям мёрзлых грунтов / М.: Б.И., 1957. — С. 117–128.
23. **Jumikis, A.R.** Upward Migration of Soil Moisture by Various Mechanisms upon Freezing / A.R. Jumikis // International Conference on Low Temperature Science. I. Conference on Physics of Snow and Ice, II. Conference on Cryobiology. (August, 14–19, 1966, Sapporo, Japan) / 1967. — С. 1387–1399. — URL: https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/20388/1/2_p1387-1399.pdf (дата обращения: 20.11.2022).

Сведения об авторах:
Сухоруков Алексей Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильных дорог» «Дорожно-строительного» факультета, старший научный сотрудник лаборатории инфраструктуры Крайнего Севера и Арктики, ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», Томск, Россия, Научно-исследовательский институт строительных материалов, e-mail: av_suhar@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8778-5418
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=716563
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56487124300
Web of Science: https://www.webofscience.com/wos/author/rid/W-2901-2017

Бадина Мария Владимировна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильных дорог» «Дорожно-строительного» факультета, ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», Томск, Россия, e-mail: mvbadina@yandex.ru
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=562555

Чурилин Владимир Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильных дорог» «Дорожно-строительного» факультета, старший научный сотрудник лаборатории инфраструктуры Крайнего Севера и Арктики, ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», Томск, Россия, Научно-исследовательский институт строительных материалов, e-mail: Lex-16-2008@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8898-4766
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=786843

Бурлуцкий Андрей Александрович — кандидат технических наук, декан «Дорожно-строительного» факультета, ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», Томск, Россия, e-mail: abura124@yandex.ru
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=566812

Сиволап Виталий Евгеньевич — инженер-исследователь лаборатории инфраструктуры Крайнего Севера и Арктики, ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», Томск, Россия, Научно-исследовательский институт строительных материалов, e-mail: vidosbos422@gmail.com
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1172363

Статья получена: 07.12.2022. Принята к публикации: 22.01.2023. Опубликована онлайн: 06.02.2023.

Работа выполнена при поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0003

REFERENCES

1. Zolotar' A.I. ed. Vodno-teplovoy rezhim zemlyanogo polotna i dorozhnykh odezhd [Water-thermal regime of subgrade and pavement]. Moscow: Transport Publ.; 1971. (In Russ.).
2. Efimenko S.V. Issledovaniya sostava i svoystv glinistykh gruntov rayonov Zapadnoy Sibiri dlya naznacheniya ikh raschëtnykh kharakteristik [Studies of the composition and properties of clay soils in Western Siberia regions for the purpose of assigning their design characteristics]. *Journal of Construction and Architecture*. 2005; (1): 213–220. (In Russ.)
3. Dawson A. ed. Water in Road Structures. Movement, Drainage and Effects. Dordrecht: Springer; 2008. Available at: https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4020-8562-8 (accessed 1st November 2022). (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8562-8.
4. Kalinkin M.Yu., Badina M.V., Sukhorukov A.V. [Analysis of existing methods for determining the coefficient of moisture conductivity of soils]. In: Tomsk State University of Architecture and Building. [*Selected reports of the 62nd university scientific and technical conference of students and young scientists, Tomsk, April 26, 2016*]. Tomsk: Tomsk State University of Architecture and Building; 2016. p. 277–280. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27275263 (accessed 1st November 2022). (In Russ.).
5. Markuts V.M. Opredeleniye koeffitsiyenta kapillyarnoy diffuzii v gruntakh zemlyanogo polotna [Determination of the coefficient of capillary diffusion in subgrade soils]. *Avtomobil'nyye dorogi*. 1985; (4): 22–23. (In Russ.).
6. Richards L.A., Gardner W.R., Gen Ogata Physical Processes Determining Water Loss from Soil. *Soil Science Society of America Journal*. 1956; 173: 310–314. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.2136/sssaj1956.03615995002000030004x.
7. Youngs E.G. Moisture Profile During Vertical Infiltration. *Soil Science*. 1957; 84(4): 283–290. Available at: https://journals.lww.com/soilsci/citation/1957/10000/moisture_profiles_during_vertical_infiltration.3.aspx (accessed 1st November 2022). (In Eng.).
8. Globus A.M. Eksperimental'naya gidrofizika pochv [Experimental soil hydrophysics]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1969. (In Russ.).

9. Leonovich I.I., Vyrko N.P. [The depth of soil freezing is the most important factor in the water-thermal regime of the subgrade]. *Road Construction*. 2011; (5): 27–35. Available at: https://elib.belstu.by/bitstream/123456789/47997/1/Леонович.%20Вырко_Глубина.pdf (accessed 2nd November 2022). (In Russ.).

10. Chistotinov L.V. Migratsiya vlagi v promerzayushchikh nevodonasyshchennykh gruntakh [Moisture migration in freezing non-saturated soils]. Moscow: Nauka; 1973. (In Russ.).

11. Vidyapin I.Y., Cheverev V.G. The Hydraulic Conductivity of Freezing Saline Soils. *Earth's Cryosphere*. 2008; 12(4): 43–45. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11706192 (accessed 2nd November 2022). (In Russ., abstract in Eng.).

12. Shesler A.I., Mironov A.A., Efimenko V.N. Opredeleniye koeffitsiyentov teplo- i vlagoprovodnosti suglinistykh gruntov zemlyanogo polotna [Determination of the coefficients of heat and moisture conductivity of loamy soils of subgrade]. In: *Proceedings of GIPRODORNII*. Moscow; 1976. p. 82–94. (In Russ.).

13. Nikolaeva G. Research on the Hydraulic Conductivity Properties of The Materials of The Soil Subgrade of The Highways of Central Yakutiya. *Transport business of Russia*. 2018; (6): 347–351. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36905519 (accessed 20th October 2022). (In Russ., abstract in Eng.).

14. Muromtsev N.A., Kovalenko P.I., Semenov N.A. et al. [Intrasoil moisture exchange, water consumption and water supply of perennial cultivated grass stands]. Ryazan: Ryazan State Agrotechnological University Named After P.A. Kostychev; 2013. Available at: https://elibrary.ru/item.asp?id=21045320 (accessed 20th October 2022). (In Russ.).

15. Sukhorukov A.V., Kalikin M.Yu. Experimental Studies on Hydraulic Conductivity Coefficient of Clay Soils. In: Tomsk Polytechnic University. *Prospects Of Fundamental Sciences Development. XIII International Conference of students, graduate students and young scientists. Volume 6. Construction and architecture. Russia, Tomsk, April 26–29, 2016*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2016. p. 58–60. Available at: https://earchive.tpu.ru/handle/11683/25979 (accessed 20th October 2022). (In Russ.).

16. Sukhorukov A.V. Justification of the calculated values of strength and deformation characteristics of clay soils for pavement design in economically promising areas of Western Siberia. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2019; 6(4): 08SATS419. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: https://doi.org/10.15862/08SATS419.

17. Sukhorukov A.V., Kalikin M.Yu. [Determination of the coefficient of moisture conductivity of clay soils by a non-stationary method]. In: Tomsk State University of Architecture and Building. [Youth, Science, Technology: New Ideas and Perspectives (MNT-2016): Proceedings of the III International Scientific Conference of Students and Young Scientists, Tomsk, November 22–25, 2016]. Tomsk: Tomsk State University of Architecture and Building; 2016. p. 176–179. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28797456 (accessed 20th October 2022). (In Russ.).

18. Muromtsev N.A. Methods of determining the coefficient of water conductivity in soils. Dokuchaev Soil Bulletin. 2013; (72): 84–95. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: https://doi.org/10.19047/0136-1694-2013-72-84-95.

19. Shtukenberg V.A. Zametka o puchinakh na zheleznykh dorogakh i o merakh dlya unichtozheniya ikh [Note on the abysses on the railways and measures to destroy them]. Saint Petersburg: printing house of the Ministry of Railways (A. Benke); 1885. (In Russ.).

20. Black P.B., Hardenberg M.J. eds. Historical Perspectives in Frost Heave Research. The Early Works of S. Taber and G. Beskow. New Hampshire: U.S. Army Corps of Engineers Cold Regions Research & Engineering Laboratory; 1991. Available at: https://archive.org/details/DTIC_ADA247395/mode/2up (accessed 17th November 2022). (In Eng.).

21. Gol'dshteyn M.N. Deformatsii zemlyanogo polotna i osnovaniy sooruzheniy pri promerzanii i ottaivanii [Deformations of subgrade and foundations of structures during freezing and thawing]. *Trudy Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta; Vyp. 16*. [*Proceedings of the All-Union Research Institute of Railway Transport; Issue. 16.]*. Moscow: izd-vo i 1-ya tip. Transzheldorizdata; 1948. (In Russ.).

22. Bozhenova A.P., Bakulin F.G. Eksperimental'nyye issledovaniya mekhanizmov peredvizheniya vlagi v promerzayushchikh gruntakh [Experimental studies of the mechanisms of moisture movement in freezing soils]. In: *Materialy po laboratornogo issledovaniya mërzlykh gruntov* [*Materials for laboratory research of frozen soils*]. Moscow: 1957. p. 117–128. (In Russ.).

23. Jumikis A.R. Upward Migration of Soil Moisture by Various Mechanisms upon Freezing. In: *International Conference on Low Temperature Science. I. Conference on Physics of Snow and Ice, II. Conference on Cryobiology. (August, 14–19, 1966, Sapporo, Japan).* 1967. p. 1387–1399. Available at: https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/20388/1/2_p1387-1399.pdf (accessed 20th November 2022). (In Eng.).

Information about the authors:
Alexey V. Sukhorukov — Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia, e-mail: av_suhar@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8778-5418
RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=716563
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56487124300
Web of Science: https://www.webofscience.com/wos/author/rid/W-2901-2017

Mariya V. Badina — Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia, e-mail: mvbadina@yandex.ru
RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=562555

Vladimir S. Churilin — Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia, e-mail: Lex-16-2008@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8898-4766
RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=786843

Andrey A. Burlutsky — Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia, e-mail: abura124@yandex.ru
RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=566812

Vitaliy E. Sivolap — Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia, e-mail: vidosbos422@gmail.com
RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1172363

Submitted: 7th December 2022. Revised: 22nd January 2023. Published online: 6th February 2023.

The paper was carried out with the state assignment support of the Russian Federation Ministry of Science and Higher Education FEMN-2022-0003