



CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 11, № 4, 2020

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2020.4.01

УДК 624.131.436, 551.34

ИННОВАЦИОННОЕ ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССА МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ГРУНТОВ

А.А. Коршунов, С.В. Чуркин, А.Л. Невзоров

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 09 сентября 2020

Принята: 09 ноября 2020

Опубликована: 30 декабря 2020

Ключевые слова:

морозное пучение, фильтрация, численное моделирование, оценка пучинистости грунтов.

АННОТАЦИЯ

Воздействие процесса промерзания-оттаивания на грунты, сопровождающееся морозным пучением и изменением их свойств, приводит к снижению надежности проектируемых сооружений. Существующие приборы для изучения морозного пучения систематизированы по назначению (измеряемым параметрам), конструктивным признакам и условиям проведения экспериментов. Авторами определены направления совершенствования лабораторного оборудования и представлены вновь разработанные приборы для изучения как самого процесса морозного пучения, так и его последствий. В статье представлены приборы для исследования морозного пучения грунтов с возможностью управления фронтом промерзания и миграцией влаги из талой зоны в мерзлую. Представлена лабораторная установка для изучения водопроницаемости образцов грунтов вдоль и поперек фронта промерзания после циклического их промораживания и оттаивания.

Учитывая зависимость показателей пучинистости от условий проведения экспериментов, авторы предлагают новый подход к оценке воздействия этого процесса на сооружения, согласно которому подготовку программы лабораторных исследований и анализ их результатов выполняют с использованием данных, получаемых при численном моделировании, как самих приборов, так и сооружений.

© ПНИПУ

© **Коршунов Алексей Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, e-mail: a.a.korshunov@yandex.ru. ORCID: 0000-0001-5082-8111

Чуркин Сергей Владимирович – ассистент, e-mail: s.v.churkin@yandex.ru. ORCID: 0000-0001-7770-3140

Невзоров Александр Леонидович – доктор технических наук, профессор, e-mail: a.l.nevzorov@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-6547-2741

Alexey A. Korshunov – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: a.a.korshunov@yandex.ru. ORCID: 0000-0001-5082-8111

Sergey V. Churkin – Assistant, e-mail: s.v.churkin@yandex.ru. ORCID: 0000-0001-7770-3140

Alexander L. Nevzorov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: a.l.nevzorov@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-6547-2741

THE INNOVATIVE LABORATORY EQUIPMENT FOR ASSESSMENT OF A FROST HEAVE PHENOMENON OF THE SOILS

A.A. Korshunov, S.V. Churkin, A.L. Nevzorov

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 09 September 2020
Accepted: 09 November 2020
Published: 30 December 2020

Keywords:

frost heave, water permeability, numerical simulation, frost-susceptibility classification.

ABSTRACT

The impact of the freezing-thawing process on soils, accompanied by frost heaving and changes of physico-mechanical properties and water permeability, leads to a decrease in the reliability of the designed structures such as dams, landfill caps, pavements. The existing apparatuses for the study of frost heaving are systematized according to their purpose (measured parameters), design features and experimental conditions. The authors pointed out the directions for improving laboratory equipment and presented developed innovative equipment for studying both the frost heave and its consequences. The article presents apparatuses for testing of frost-susceptible soils with the ability to manage the freezing front movement and water migration from the thawed to the freezing parts of soil. A laboratory equipment for studying the water permeability of soils along and across the ice lenses in subject to cyclic freezing and thawing is presented.

Taking into account the dependence of criteria of frost-susceptibility of soils on experimental conditions, the authors propose a new approach to assessing the impact of frost heave phenomenon on designed structures. According to the approach the preparation of the laboratory research program and the analysis of their results are carried out using data obtained from numerical modeling both of the laboratory equipment and of the designed constructions.

© PNRPU

Введение

Морозное пучение может достигать 15–20 % от толщины слоя грунта и является одним из факторов, оказывающих существенное влияние на сооружения, возводимые в условиях холодного климата. Обратной стороной этого явления является ухудшение деформационных и прочностных характеристик, а также повышение водопроницаемости грунтов при оттаивании, что приводит к снижению надежности дамб, транспортных сооружений, накопителей бытовых и промышленных отходов.

Прогноз деформаций морозного пучения по гранулометрическому составу или иным классификационным характеристикам не отличается надежностью и, как правило, позволяет лишь разделить заведомо пучинистые и непучинистые грунты. Результаты лабораторных испытаний могут считаться достоверными, если используется оборудование, позволяющее воспроизводить условия промерзания грунтов в основании сооружений.

Многочисленные исследования показали, что так называемое первичное пучение, обусловленное замерзанием воды, первоначально содержащейся в грунте, невелико. Основной причиной деформаций является формирование линз льда при замерзании влаги, мигрирующей к фронту промерзания из непромерзшей части массива. К настоящему времени предложено более десятка теорий, объясняющих механизм миграции, среди них капиллярная, осмотическая, гидродинамическая и адсорбционная. Последняя, получившая наибольшее признание, основана на представлениях об адсорбционно-пленочном механизме миграции. Согласно этой теории, при отрицательной температуре на поверхности частиц остается слой незамерзшей связанной влаги, благодаря чему в системе, стремящейся сохранить термодинамическое равновесие, происходит всасывание воды из незамерзших

нижерасположенных слоев. Иными словами, движущей силой миграции служит разность потенциалов поровой влаги с одной и другой стороны фронта промерзания. Этот механизм и должен приниматься во внимание при проектировании лабораторного оборудования для изучения феномена морозного пучения.

1. Анализ конструкции существующего лабораторного оборудования

К настоящему времени разработано множество приборов для исследования морозного пучения грунтов [1–21]. Их можно систематизировать по назначению (измеряемым параметрам), конструктивным признакам и условиям проведения экспериментов.

Принципиальные схемы приборов представлены в табл. 1. В верхней части таблицы показаны приборы для исследования самого процесса – природы пучения, деформаций, интенсивности миграции влаги и т.д., а в нижней части таблицы – его последствия на примере определения водопроницаемости после одного или нескольких циклов промерзания-оттаивания.

Для приборов первой группы характерны следующие конструктивные особенности:

- испытанию подвергают образцы грунтов цилиндрической формы диаметром от 5 до 15 см, отношение их высоты к диаметру обычно изменяется от 0,5 до 3;
- образцы размещают в гильзе, покрытой слоем теплоизоляции, которая обеспечивает преимущественно одномерный тепловой поток из образца;
- нагрузку на образцы создают с помощью поршня, в ходе опыта измеряют его перемещения;
- обеспечивают свободную подпитку промерзающих образцов водой.

Следует заметить, что известны также крупные лабораторные установки для испытания призматических образцов размером 40×40 см в плане, высотой 45 см [22] и 70×80 см, высотой 40 см [23].

Для того чтобы снизить влияние на измеряемые деформации пучения смерзания образца с вмещающей его гильзой, последнюю собирают из отдельных колец с подвижным стыком, используют смазки и мембраны. В приборе К. Кујала [10] с этой же целью днище прибора выполнено подвижным относительно гильзы.

В большинстве лабораторных установок, как и в природных условиях, образец замораживают сверху, а подпитку водой осуществляют снизу. Исключение составляют приборы Т. Ishizaki, J. Kondrad, S. Freden [9, 24–26], в которых указанные процессы имеют обратное направление. Благодаря смещению образца при пучении в сторону его непромерзшей части исключается влияние смерзания на измеряемые деформации пучения. Приборы с горизонтальным перемещением фронта промерзания создавались для оценки пучения вокруг колонок при искусственном замораживании грунтов. Подобные приборы могут быть востребованы также при оценке воздействия пучения на подпорные стены и стенки колодцев. Их создание может быть одним из направлений развития лабораторной базы.

Морозное пучение обусловлено главным образом миграцией влаги к фронту промерзания, поэтому чем медленнее промерзает грунт, тем большие деформации пучения имеют место. Вот почему в лабораторных экспериментах следует обеспечивать скорость перемещения фронта промерзания, близкую к природным условиям. Выполнить это требование при постоянных значениях температуры на торцах образца невозможно. В наиболее совершенных и сложных приборах в образец внедряют датчики температуры и в зависимости от их показаний с помощью компьютера регулируют температуру на верхнем, «холодном» торце образца.

Таблица 1

Принципиальные схемы лабораторных установок

Table 1

Review of laboratory apparatus

Вид испытаний	Направление перемещения фронта промерзания		
	сверху вниз (I)	снизу вверх (II)	горизонтально (III)
Морозное пучение (A)			Могут быть разработаны
Фiltrация	<p>перпендикулярно линзам льда (B)</p>		Могут быть разработаны
	<p>вдоль линз льда (C)</p>	Могут быть разработаны	

Примечание: - - - - - фронт промерзания
 - линзы льда
 - термодатчики
 - фильтрационный

1 – пористый материал; 2 – теплоизоляция;
 3 – охлаждающая плита; 4 – гильза; 5 – образец грунта; 6 – подвижное днище; 7 – перфорированная труба

Интенсивность миграции влаги к фронту промерзания определяют обычно по расходу воды из подающего резервуара, реже – с помощью датчиков влажности, размещаемых внутри образца. Существовали также попытки применения флюоресцирующих веществ для окраски проникающей в образец влаги. Обязательным является послойный отбор проб на влажность из образца по окончании опыта.

Что касается установок для определения водопроницаемости грунтов после оттаивания, представленных во второй части табл. 1, то при их создании принимают во внимание особенности формирующейся при промерзании слоистой текстуры. Оттаивание многочисленных линз льда, преимущественно вытянутых вдоль фронта промерзания, приводит к появлению фильтрационной анизотропии в грунтах. В большинстве приборов водопроницаемость определяют вдоль оси образца, т.е. в направлении, перпендикулярном фронту промерзания.

Исследованием водопроницаемости грунтов в направлении, параллельном сформировавшейся слоистой текстуре, занимались В.Н. Жиленков [27], G. Hirose, Y. Ito [28]. В приборе первого автора фронт промерзания перемещался сверху вниз, а фильтрационный поток создавался в горизонтальном направлении – от пористой трубки в центре образца к перфорированным стенкам гильзы. Во втором случае образец промораживали в горизонтальном направлении, а фильтрацию измеряли в вертикальном направлении.

Принимая во внимание природу процесса морозного пучения, преимущества и недостатки существующего лабораторного оборудования, можно сформулировать основные требования к конструкции приборов для исследования морозного пучения грунтов:

- возможность управления скоростью перемещения фронта промерзания и интенсивностью миграционного потока влаги;
- минимальное влияние вмещающей образец гильзы на деформации пучения и ориентацию формирующихся линз льда;
- сведение до минимума манипуляций с образцом перед определением водопроницаемости, прочностных или деформационных характеристик после промерзания-оттаивания.

Именно с учетом приведенных требований авторы конструировали новые приборы для исследования морозного пучения грунтов.

2. Совершенствование лабораторной базы приборов

В 2012 г. был создан прибор, в котором использован весьма простой способ обеспечения заданной скорости промерзания образца (рис. 1) [29]. Более того, прибор позволяет останавливать фронт промерзания для наблюдения за ростом линз льда. Он включает гильзу, собранную из нескольких полиэтиленовых колец высокой плотности, морозильную и холодильную камеры, процессор, предназначенный для управления температурным режимом в камерах, регистрации температуры внутри образца и деформаций пучения. Гильза с образцом размещается в холодильной камере, где поддерживается температура 0...+2 °С. Подпитка водой осуществляется через нижний торец образца. Морозильная камера, в которой с помощью элементов Пельтье поддерживается заданная отрицательная температура, перемещается вдоль образца сверху вниз. Скорость перемещения фронта промерзания определяется скоростью перемещения этой камеры. Для создания нагрузки на образец используется загрузочная рама LoadTrac-II компании Geocomp (USA), она же и обеспечивает измерение деформаций пучения с точностью 0,001 мм.

Для массовых испытаний по циклическому промерзанию-оттаиванию грунтов при проектировании гидротехнических объектов был создан прибор упрощенной конструкции, в котором гильза с образцом размещается в емкости с водой (рис. 2) [30]. Стенки емкости покрыты слоем теплоизоляции, а на поверхности воды плавает диафрагма из теплоизоляционного материала. Температура воды поддерживается чуть выше нуля. Прибор размещается в морозильной камере с отрицательной температурой. В ходе опыта по мере слива воды из емкости диафрагма перемещается вниз, обеспечивая тем самым равномерное с заданной скоростью промерзание образца. Для быстрого оттаивания образца камеру наполняют теплой водой. Кроме того, через трубчатые пористые зонды в образец грунта может нагнетаться вода, по расходу которой определяют коэффициент фильтрации.

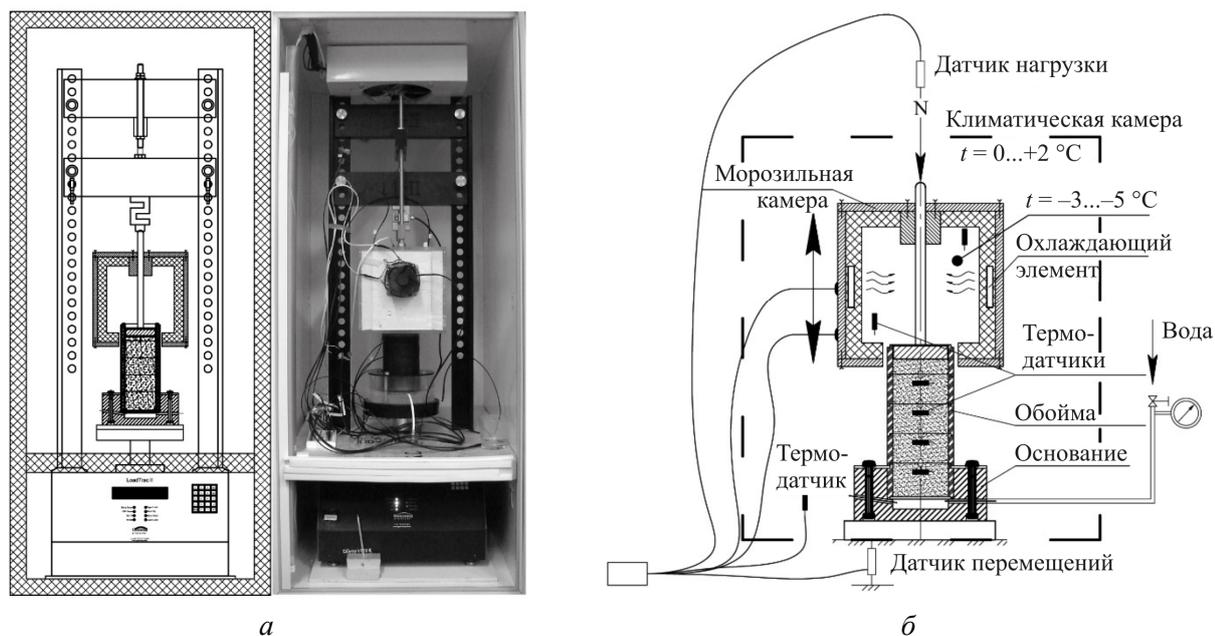


Рис. 1. Прибор морозного пучения с возможностью управления фронтом промерзания
 Fig. 1. Experimental apparatus for frost heaving test with controlled frost front penetration

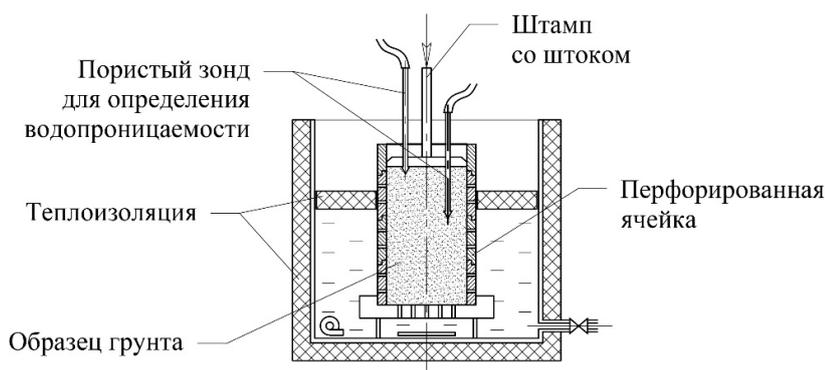


Рис. 2. Прибор для измерения морозного пучения и водопроницаемости грунтов
 Fig. 2. Experimental apparatus for frost heaving and hydraulic conductivity tests

Авторами усовершенствован прибор традиционной конструкции, в котором для обеспечения равномерного промерзания грунта в центральной и периферийной частях образца вокруг гильзы вместо теплоизоляции засыпается сухая смесь специально подобранного состава (рис. 3, а). Теплофизические свойства засыпки определяют до начала лабораторных экспериментов путем численного моделирования процесса охлаждения образца в приборе в программном комплексе, позволяющем учитывать теплоту фазовых переходов воды (рис. 3, б) [31].

Следующее направление совершенствования приборов связано с регулированием миграции влаги к фронту промерзания. Наличие такой возможности, во-первых, позволяет глубже изучить сам феномен морозного пучения, а во-вторых, при проведении испытаний учитывать положение уровня грунтовых вод в основании сооружения. Заметим, что в стандартных приборах предусмотрен лишь свободный приток воды к нижнему торцу образца высотой около 15 см, т.е. моделируются наиболее неблагоприятные условия промерзания в основании сооружений.

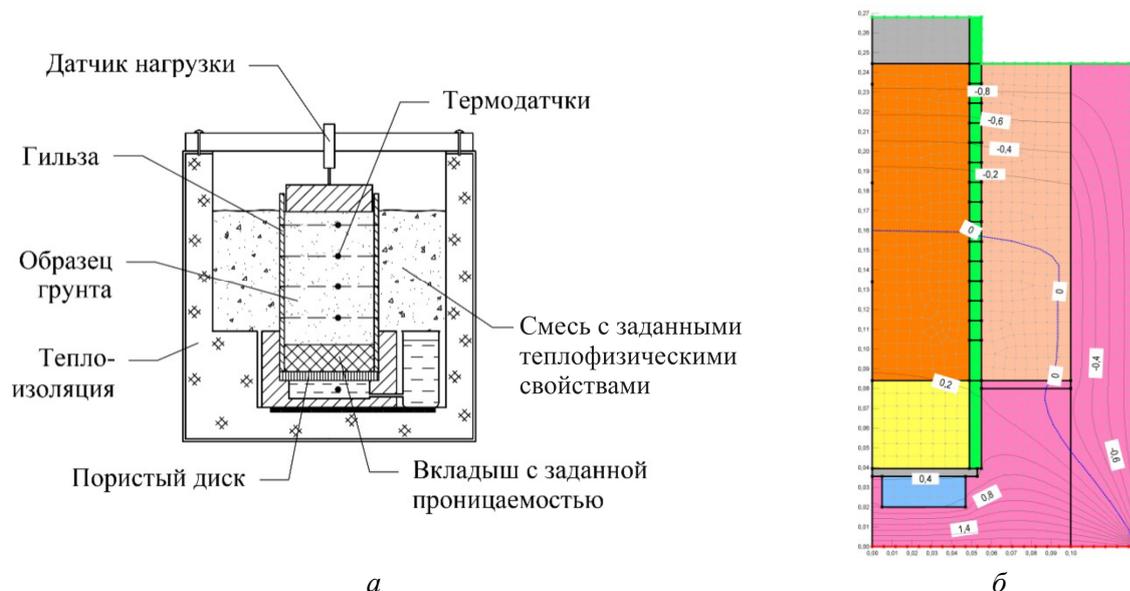


Рис. 3. Прибор для измерения морозного пучения: *а* – принципиальная схема; *б* – результаты численного моделирования
 Fig. 3. Experimental apparatus for frost heaving test: *a* – schematic of apparatus; *b* – numerical simulation

В приборе, показанном на рис. 4, *а*, гильзы, заполняемые исследуемым грунтом, выполнены телескопическими, т.е. вкладываются друг в друга. Это позволяет собирать в лаборатории образцы различной высоты и, кроме того, измерять их усадку ниже фронта промерзания [32].

В следующем приборе указанная цель достигается за счет создания вакуума в камере с водой, расположенной под образцом (рис. 4, *б*) [33]. Поддерживая давление в камере ниже атмосферного, моделируют промерзание исследуемого грунта при заданном расстоянии от фронта промерзания до поверхности грунтовых вод.

В третьем приборе (см. рис. 3, *а*) управление миграцией влаги обеспечивается с помощью размещенного под нижним торцом образца вкладыша, который обладает меньшей, чем исследуемый грунт, водопроницаемостью.

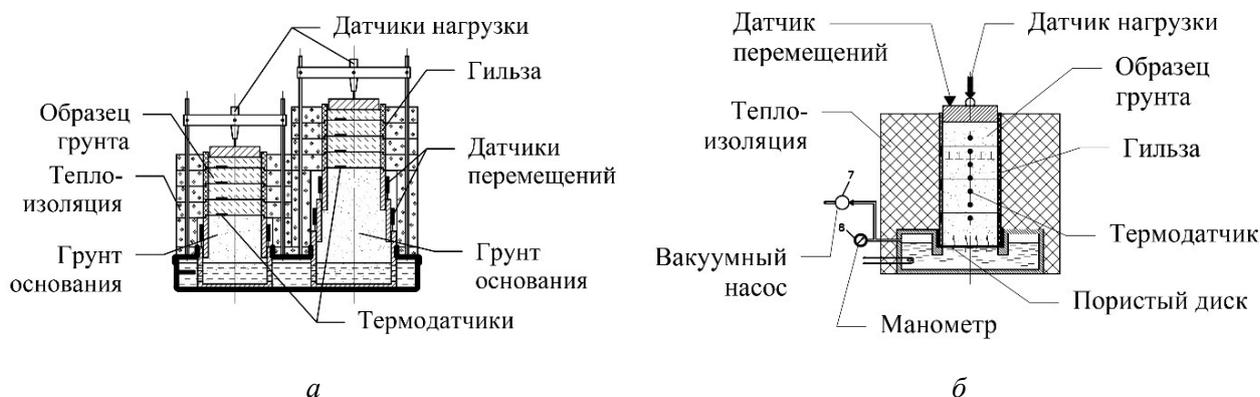


Рис. 4. Прибор морозного пучения с возможностью управления миграцией влаги
 Fig. 4. Laboratory apparatus for frost heaving test with controlled water flow

Известно, что водопроницаемость грунтов после нескольких циклов промерзания-оттаивания может увеличиваться в 10–300 раз [27, 34–38], что, как отмечалось выше, необходимо учитывать при проектировании гидротехнических сооружений.

Для изучения этого явления авторами создан прибор, позволяющий определять деформации морозного пучения и водопроницаемость грунтов как вдоль, так и поперек текстурной слоистости (рис. 5) [30, 39]. Особенностью прибора является гильза для размещения образца, составленная из колец с двойными стенками. Камеры между стенками в каждом из колец разделены на четыре сектора. Два сектора с перфорированными внутренними стенками предназначены для подачи и отвода воды, фильтрующейся через образец в горизонтальном направлении, а два других – со стенками без перфорации – для размещения трубок с водой. После заданного числа циклов промерзания-оттаивания испытания на водопроницаемость проводят без извлечения образца из гильзы, что позволяет сохранить его посткриогенную текстуру. Поток воды направляют или в горизонтальном направлении – через перфорированные стенки, или в вертикальном – через пористые диски, размещенные на торцах образца.

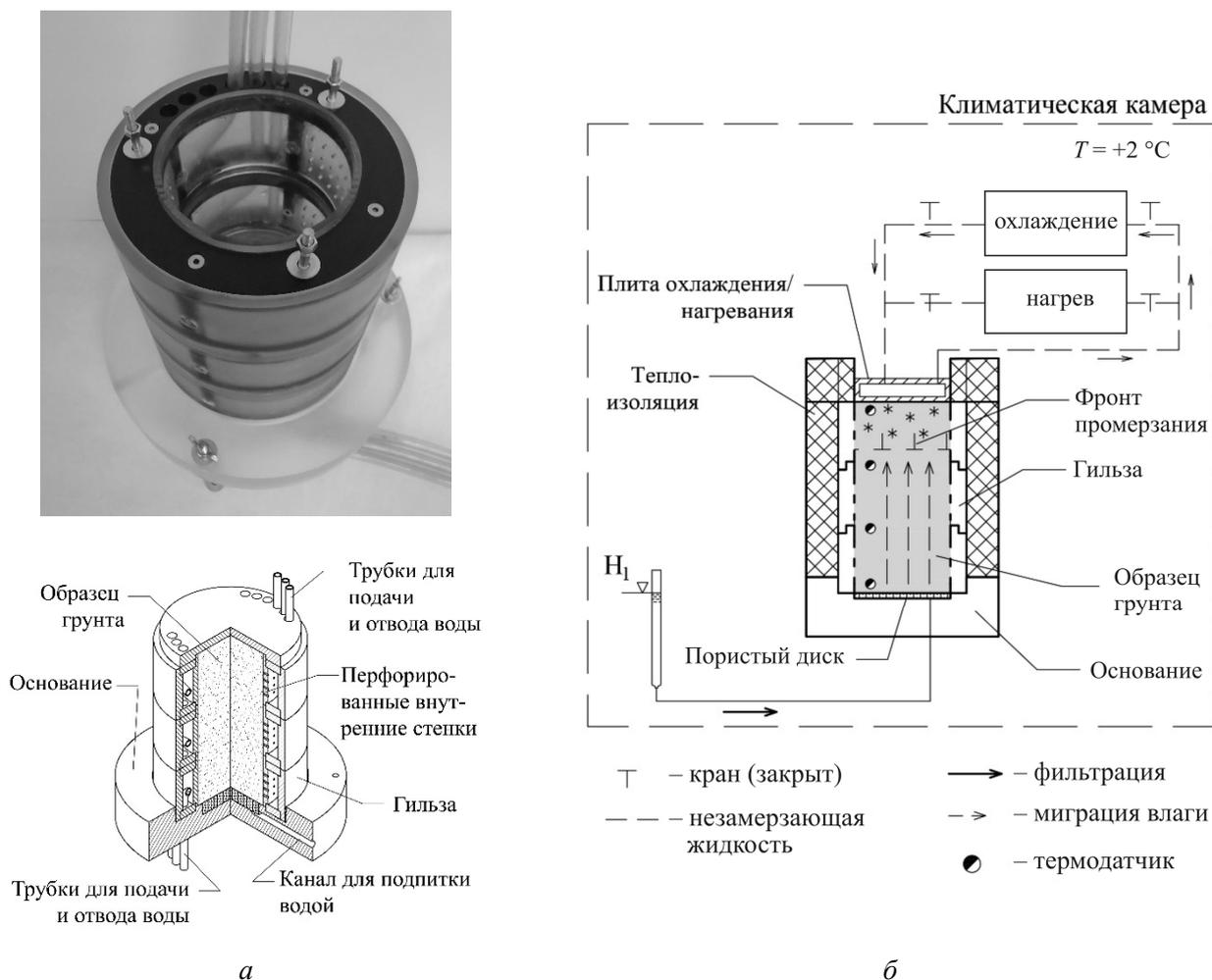


Рис. 5. Лабораторная установка для измерения водопроницаемости и морозного пучения грунтов
 Fig. 5. Laboratory apparatus for water permeability and frost heaving testing

Таким образом, вновь созданные приборы позволяют моделировать в лаборатории природные условия промерзания грунтов, изучать феномен пучения, задавая различные граничные условия при испытаниях, а также исследовать результаты воздействия циклического промерзания на их свойства. Дальнейшее их совершенствование позволит повысить точность и достоверность оценки пучинистости грунтов.

3. Оценка пучинистости грунтов

Следует отметить, что, кроме многообразия имеющихся приборов и методик испытания грунтов на морозное пучение, отличаются еще и получаемые по результатам экспериментов характеристики, а их используют для классификации грунтов и расчета деформации конструкций при промерзании основания. В качестве характеристики в нормативных документах России используются относительные деформации пучения¹, США – скорость пучения², Великобритании – абсолютные деформации³ образца определенной высоты. Широкое распространение получил показатель, вычисляемый как отношение скорости миграции влаги к градиенту температуры в пределах каймы промерзания и называемый сегрегационным потенциалом (R. Miller, R. Gilpin, E. Chamberlain, J.-M. Kondrad, N. Morgenstern [4, 9, 35]). Критерии классификации грунтов по указанным характеристикам приведены в табл. 2.

Таблица 2

Критерии пучинистости грунтов

Table 2

Frost-Susceptibility Criteria

Критерии пучинистости грунтов	Скорость пучения, v_h , мм/сут			SP, мм ² /ч, °С	Деформация морозного пучения, мм	Относительная деформация морозного пучения ϵ_{fh}
	ASTM D5918 ²	E. Chamberlain [4]	K. Kujala [10, 40]	J.-M. Kondrad, N. Morgenstern [9]	BS 812–124 ³	ГОСТ 28622 ¹
Непучинистый	<1	<0,5	<0,5	<0,5		<0,01
Слабопучинистый	1...2	0,5...2	0,5...2,4	0,5...1,5	<12,7	0,01...0,035
	2...4					
Среднепучинистый	4...8	2...4	–	1,5...3	12,7...17,8	0,035...0,07
Сильнопучинистый	8...16	>4	>2,4	>3	>17,8	0,07...0,10
Чрезмернопучинистый	>16					>0,10

¹ ГОСТ 28622–2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости: дата введения 2013-11-01. М.: Стандартинформ, 2019.

² ASTM D5918-13e1, Standard Test Methods for Frost Heave and Thaw Weakening Susceptibility of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org.

³ BS 812-124:2009 Testing aggregates. Method for determination of frost heave.

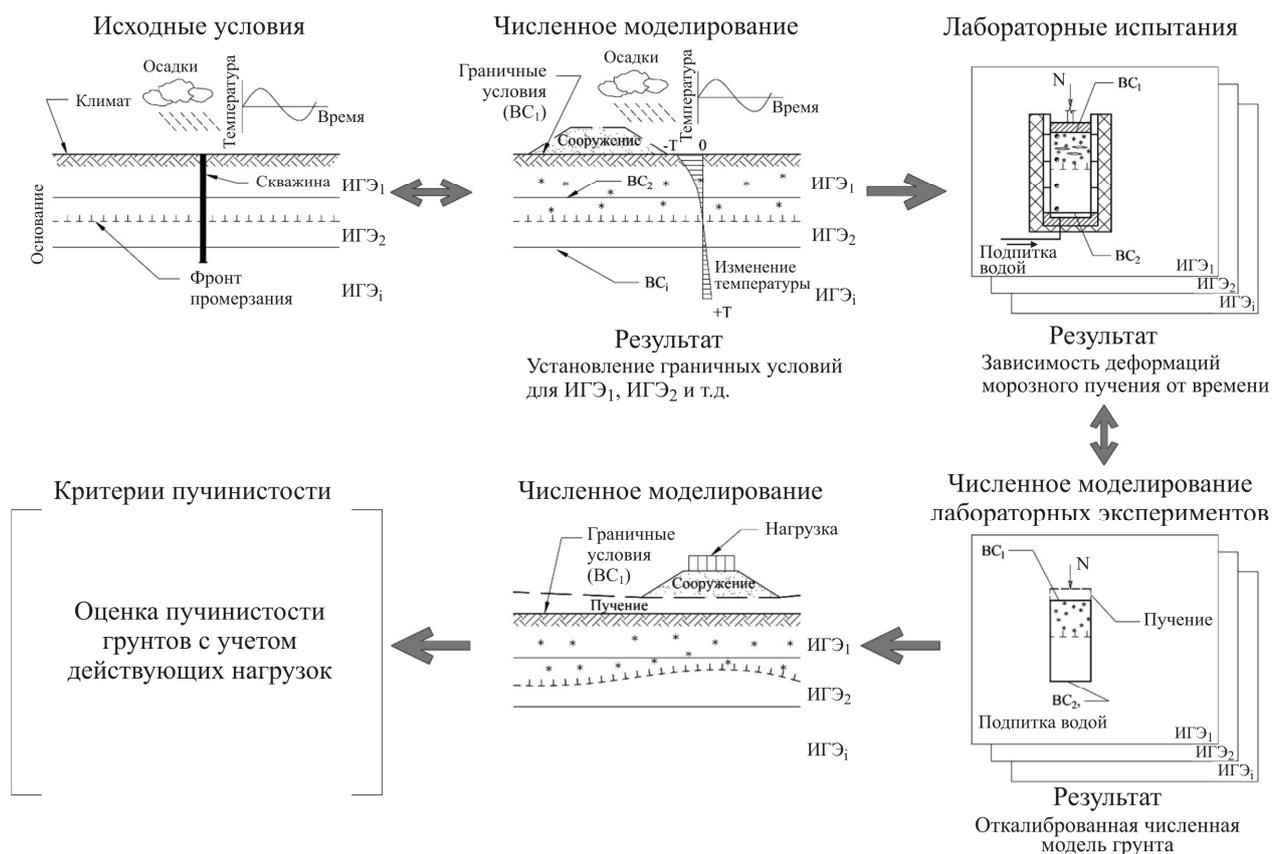


Рис. 6. Последовательность оценки пучинистости грунтов в основании сооружений

Fig. 6. Approach to frost-susceptibility of soils

Учитывая существенные отличия показателей пучинистости, а также их зависимость от условий проведения экспериментов, считаем необходимым предложить следующий порядок оценки пучинистости грунтов в основании сооружений. Суть его состоит в следующем (рис. 6):

1. Используя данные метеорологических наблюдений и геологических изысканий, выполняют численное моделирование процессов промерзания на объекте строительства. Для моделирования должен применяться программно-вычислительный комплекс, использующий термогидромеханическую модель грунта, т.е. одновременно решающий задачи теплопереноса и фильтрации, а также учитывающий изменение напряженно-деформированного состояния массива.

2. По результатам моделирования определяют условия проведения лабораторного эксперимента, а именно: температуру, скорость и направление перемещения фронта промерзания, нагрузку на образец, условия его подпитки водой.

3. Проведя испытания образцов и получив необходимые характеристики пучения, выполняют моделирование лабораторного эксперимента, т.е. хода промерзания и пучения образца в лабораторной установке. При необходимости выполняют калибровку модели.

4. Последней итерацией является численное моделирование процессов промерзания и пучения на проектируемом объекте. Результатом такого моделирования будет расчетное значение деформаций морозного пучения и его воздействий на проектируемый объект.

Авторы успешно апробировали представленный алгоритм на одном из промышленных объектов [41].

Выводы

1. Для получения достоверных результатов при исследовании процесса морозного пучения грунтов лабораторное оборудование должно обеспечивать возможность управления скоростью перемещения фронта промерзания и интенсивностью миграционного потока влаги в образце, сводить к минимуму влияние вмещающей образец гильзы на деформации пучения и ориентацию формирующихся линз льда, исключать механические воздействия на образец перед определением водопроницаемости, прочностных или деформационных характеристик после промерзания-оттаивания.

2. Принимая во внимание существенные отличия показателей пучинистости, а также их зависимость от условий проведения экспериментов, предлагаем следующий алгоритм оценки опасности морозного пучения для проектируемого объекта: численное моделирование процессов промерзания на объекте строительства с использованием данных метеорологических наблюдений и геологических изысканий; определение по результатам моделирования условий проведения лабораторного эксперимента; лабораторные испытания; численное моделирование лабораторного эксперимента с целью калибровки модели; численное моделирование процессов промерзания и пучения на проектируемом объекте.

Библиографический список

1. Taber S. The Mechanics of Frost Heaving // *The Journal of Geology*. – 1930. – Vol. 38 (4). – P. 303–317.
2. Benson C.H., Othman M.A. Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in situ // *J Geotech Eng.* – 1993. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1993\)119:2\(276\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:2(276)).
3. Bescow G. Soil Freezing and Frost Heaving with Special Applications to Roads and Railroads. – Stockholm: Swedish Road Institute, 1935.
4. Chamberlain E.J., Gow A.J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils // *Dev. Geotech. Eng.* – 1979. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-41782-4.50012-9>.
5. Ершов Э.Д. Влагоперенос и криогенные текстуры в дисперсных породах: дис. ... д-ра геол.-минер. наук. – М., 1977. – 452 с.
6. Фельдман Г.М. Прогноз температурного режима грунтов и развития криогенных процессов. – Новосибирск: Наука, 1977. – 186 с.
7. Jessberger H.L. Bearing strength of frost-susceptible soils after thawing as a parameter for dimensioning roads and a measure for evaluating frost criteria. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr.* – 1974. – Vol. 11 (10). – P. 202. DOI: 10.1016/0148-9062(74)91170-X
8. Frost Action Predictive Techniques for Roads and Airfields: A Comprehensive Survey of Re-search Findings / T.C. Johnson, R.L. Berg, E.J. Chamberlain, D.M. Cole // U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory CRREL. – 1986. – Report 86–18.
9. Konrad J.M., Morgenstern N.R. A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils // *Can Geotech J.* – 1980. <https://doi.org/10.1139/t80-056>.
10. Kujala K. Evaluation of factors affecting frost susceptibility in soils // *Frost Geotech Eng Proc 2nd Symp Anchorage.* – 1993.
11. Development of pot-cover effect apparatus with freezing-thawing cycles / T. Luo, H. Chen, Y.P. Yao [et al.] // *Sci China Tech Sci.* – 2019. – Vol. 62. – P. 1636–1648. <https://doi.org/10.1007/s11431-018-9482-1>

12. Невзоров А.Л. Фундаменты на сезоннопромерзающих грунтах: учеб. пособие. – М.: Изд-во АСВ, 2000. – 152 с.
13. Морозоопасные грунты как основания сооружений / В.О. Орлов [и др.]. – Новосибирск: Наука (Сиб. отд-ние), 1992 – 168 с.
14. Penner E. The Importance of freezing rate in frost action in soils // Proc Am Soc Test Mater. – 1972.
15. Пусков В.И., Крицкий М.Я., Мельников И.А. Морозное пучение компрессионно нагруженных образцов грунта // Инж-геол. условия, основания и фундаменты транспортных сооружений в Сибири: межвуз. сб. науч. тр. – Новосибирск: НИИЖТ. – С. 76–84.
16. Ганалес Л.Б. Исследование закономерностей промерзания грунтов для прогноза деформаций пучения оснований: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02. – Л., 1978. – 24 с.
17. Рекомендации по определению морозной пучинистости грунтов оснований зданий и сооружений / В.Я. Лапшин, Л.Б. Ганалес, М.И. Юрганов, Ю.Р. Оржеховский. – Свердловск: УПИ, 1979. – 34 с.
18. Ганалес Л.Б., Оржеховский Ю.Р., Юрганов М.И. Лабораторный метод определения морозной пучинистости грунтов // Инженерно-геологическое обеспечение строительства сооружений: сб. науч. тр. – Новосибирск: Наука, 1989. – С. 41–46.
19. Способ определения давления морозного пучения грунта: пат. СССР / Э.Д. Ершов, В.Г. Чеведев, Ю.П. Лебеденко. – № 1596241. Бюл. № 36. 1990.
20. Устройство для моделирования процессов промерзания грунтов: пат. СССР / В.Я. Лапшин, Б.Г. Алексеев, Н.С. Калинин, К.Г. Пшеничников, Ю.В. Сырокомский. – 1695225. Бюл. № 44. 1991.
21. Устройство для определения характеристик морозоопасности грунтов: пат. СССР / Ю.Р. Оржеховский, А.Н. Алехин, В.Г. Елпанов, Б.В. Никулин. – 1702306. Бюл. № 48. 1991.
22. Пчелинцев А.М. Строение и физико-механические свойства мерзлых грунтов. – М.: Наука, 1964. – 260 с.
23. Яхтенфельд И.П. О причинах морозного пучения грунтов // Мелиорация и водное хозяйство. – 1988. – № 11. – С. 27–30.
24. Freden S., Stenberg L. Frost heave tests on tills with an apparatus for constant heat flow. Comput. Chem. Eng. – 1980.
25. Ishizaki T., Fukuda M. Temperature dependence of unfrozen water film thickness of frozen soils. – 1994. <https://doi.org/10.5331/sepyyo.56.3>.
26. Ishizaki T., Nishio N. Experimental study of frost heaving of a saturated soil // Gr Freez 88 Proc 5th Symp Nottingham. – 1988. – Vol. 1.
27. Жиленков В.Н. Усовершенствованная методика определения фильтрационных свойств грунтов, подвергшихся промораживанию и оттаиванию // Геоэкология. – 2001. – № 4.
28. Hirose G., Ito Y. Experimental Estimation of Permeability of Freeze-thawed Soils in Artificial Ground Freezing // Procedia Eng. – 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.053>.
29. Прибор для определения деформаций и сил морозного пучения грунта: пат. Рос. Федерация / А.Л. Невзоров, А.А. Коршунов. – № 2473080. Бюл. № 2. 2013.
30. Прибор для определения морозного пучения и водопроницаемости грунта при циклическом промерзании-оттаивании: пат. Рос. Федерация / А.Л. Невзоров, С.П. Дорошенко. – № 2586271. Бюл. № 16. 2016.
31. Прибор для определения деформаций морозного пучения грунта: пат. Рос. Федерация / А.Л. Невзоров, С.В. Чуркин, А.А. Коршунов. – № 156395. Бюл. № 31. 2014.

32. Прибор для определения деформаций морозного пучения грунта: пат. Рос. Федерация / А.Л. Невзоров, С.В. Чуркин, А.А. Коршунов. – № 2556681. Бюл. № 19. 2015.
33. Прибор для измерения деформаций морозного пучения грунта: пат. Рос. Федерация / А.Л. Невзоров, А.А. Коршунов. – № 2474650. Бюл. № 4. 2011.
34. Kim W., Daniel D.E. Closure to “Effects of Freezing on Hydraulic Conductivity of Compacted Clay ” by Woon-Hyung Kim and David E. Daniel (July, 1992, Vol. 118, No. 7) // *J GeotechEng.* – 1993. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1993\)119:11\(1865\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1993)119:11(1865)).
35. Konrad J.M., Samson M. Hydraulic conductivity of kaolinite-silt mixtures subjected to closed-system freezing and thaw consolidation // *Can Geotech J.* – 2000. <https://doi.org/10.1139/t00-003>.
36. Influence of freeze-thaw cycles in the presence of a supplementary water supply on mechanical properties of compacted soil / Z. Lu, S. Xian, H. Yao, R. Fang, J. She // *Cold RegSciTechnol.* – 2019. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.09.009>.
37. Qi J., Vermeer P.A., Cheng G. A review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties // *PermafrostPeriglac Process.* – 2006. <https://doi.org/10.1002/ppp.559>.
38. Zimmie T.F., La Plante C. Effect of freeze/thaw cycles on the permeability of a fine-grained soil. *Hazard. Ind. Wastes – Proc. Mid-Atlantic Ind. Waste Conf.*, 1990.
39. Прибор для определения деформаций морозного пучения и водопроницаемости грунтов / С.П. Дорошенко, А.Л. Невзоров, Г.Г. Болдырев, А.А. Коршунов // *Геотехника.* – 2019. – Т. XI, № 4. – С. 18–28, <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2019-11-4-18-28>.
40. Kujala K., Ravaska O. Influence of test conditions and equipment on the frost heave test // *Frost Geotech Eng Int Symp Saariselka.* – 1989. – Vol. 2.
41. Korshunov A.A., Churkin S.V., Nevzorov A.L. Calibration of PLAXIS frozen/unfrozen soil model according to results of laboratory tests and in-situ monitoring // *Lect. Notes Civ. Eng.* – 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_12.

References

1. Taber S. The Mechanics of Frost Heaving. *The Journal of Geology*, 1930, no. 38 (4), pp. 303–317.
2. Benson C.H., Othman M.A. Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in situ. *J. GeotechEng*, 1993, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:2(276).
3. Bescow G. Soil freezing and frost heaving with special applications to roads and railroads. Stockholm, Swedish Road Institute, 1935.
4. Chamberlain E.J., Gow A.J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils. *Dev. Geotech. Eng.*, 1979. DOI: 10.1016/B978-0-444-41782-4.50012-9.
5. Ershov E.D. Vlagoperenos i kriogennyye tekstury v dispersnykh porodakh [Water migration and cryogenic textures in fine-grained soils]. Doctor’s degree dissertation. 1977, 452 p.
6. Feldman G.M. Prognoz temperaturnogo rezhima gruntov i razvitiya kriogennykh processov [Forecast of the temperature regime of soils and the development of cryogenic processes]. Novosibirsk, Nauka, 1977, 186 p.
7. Jessberger H.L. Bearing strength of frost-susceptible soils after thawing as a parameter for dimensioning roads and a measure for evaluating frost criteria. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr.* 1974; no. 11 (10): 202. DOI: 10.1016/0148-9062(74)91170-X
8. Johnson T.C., Berg R.L., Chamberlain E.J., Cole D.M. (1986) Frost Action Predictive Techniques for Roads and Airfields: A Comprehensive Survey of Re-search Findings. *U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory CRREL*. Report 86–18

9. Konrad J.M., Morgenstern N.R. A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils. *Can Geotech J*, 1980. DOI: 10.1139/t80-056
10. Kujala K. Evaluation of factors affecting frost susceptibility in soils. *Frost Geotech Eng Proc 2nd Symp Anchorage*, 1993.
11. Luo T., Chen H., Yao Y.P. et al. Development of pot-cover effect apparatus with freezing-thawing cycles. *Sci China Tech Sci*, 2019, no. 62, pp. 1636–1648, DOI: 10.1007/s11431-018-9482-1
12. Nevzorov A.L. *Fundamenty na sezonnopromerzayushchih gruntah* [Foundations on seasonally freezing soils]. Moscow, ASV, 2000, 152 p.
13. Orlov V.O. i dr. *Morozoopasnye grunty kak osnovaniya sooruzhenij* [Frost-susceptible soils as a strata for building foundations]. Novosibirsk, Nauka, Sib. otdelenie, 1992, 168 p.
14. Penner E. The Importance of freezing rate in frost action in soils. *Proc Am Soc Test Mater*, 1972.
15. Puskov V.I., Krickij M.YA., Melnikov I.A. *Moroznoe puchenie kompressionno nagruzhennyh obrazcov grunta* [Frost heaving of soils under overburden pressure]. *Mezhvuz. sb. nauchn. Trudov: Inzh-geol usloviya, osnovaniya i fundamenty transportnyh sooruzhenij v Sibiri*. Novosibirsk, NIIZHT, pp. 76–84.
16. Ganales L.B. *Issledovanie zakonomernostej promerzaniya gruntov dlya prognoza deformacij pucheniya osnovanij* [Investigation of soil freezing to predict its frost heaving]. Abstract of Ph. D. thesis. Leningrad, 1978, 24 p.
17. Lapshin V.YA., Ganales L.B., Yurganov M.I., Orzhekhovskij YU.R. *Rekomendacii po opredeleniyu moroznoj puchinistosti gruntov osnovanij zdaniy i sooruzhenij* [Recommendations for determining the frost heaving of soils]. Sverdlovsk, UPI, 1979, 34 p.
18. Ganales L.B., Orzhekhovskij YU.R., Yurganov M.I. *Laboratornyj metod opredeleniya moroznoj puchinistosti gruntov* [Laboratory method for determining frost-susceptibility of soils]. *Inzhenerno-geologicheskoe obespechenie stroitel'stva sooruzhenij: Sb.nauchn.trudov*. Novosibirsk: Nauka, 1989, pp. 41–46.
19. Ershov E.D., CHEverev V.G., Lebedenko YU.P. *Sposob opredeleniya davleniya moroznogo pucheniya grunta* [Method for determining the frost heave pressure of soil]. Patent USSR no. 1596241 (1990).
20. Lapshin V.Ya., Alekseev B.G., Kalinin N.S., Pshenichnikov K.G., Syrokomskij Yu.V. *Ustrojstvo dlya modelirovaniya processov promerzaniya gruntov* [An apparatus for simulating soil freezing processes]. Patent USSR no. 1695225 (1991).
21. Orzhekhovskij YU.R., Alekhin A.N., Elpanov V.G., Nikulin B.V. *Ustrojstvo dlya opredeleniya harakteristik morozoopasnosti gruntov* [An apparatus for determining the characteristics of frost-susceptible soils]. Patent USSR no. 1702306 (1991).
22. Pchelincev A.M. *Stroenie i fiziko-mekhanicheskie svoystva merzlyh gruntov* [Composition and physico-mechanical properties of frozen soils]. Moscow, Nauka. 1964, 260 p.
23. Yahtenfeld I.P. *O prichinah moroznogo pucheniya gruntov* [The reasons for frost heaving of soils]. *Melioraciya i vodnoe hozyajstvo*, 1988, no. 11, pp. 27–30.
24. Freden S., Stenberg L. *Frost heave tests on tills with an apparatus for constant heat flow*. *Comput. Chem. Eng.*, 1980.
25. Ishizaki T., Fukuda M. *Temperature dependence of unfrozen water film thickness of frozen soils*, 1994. DOI: 10.5331/seppyo.56.3.
26. Ishizaki T., Nishio N. *Experimental study of frost heaving of a saturated soil*. *Gr Freez 88 Proc 5th Symp Nottingham*, 1988, vol. 1.

27. Zhilenkov V.N. Usovershenstvovannaya metodika opredeleniya filtracionnyh svojstv gruntov, podvergshihsia promorazhivaniyu i ottaivaniyu [An improved method for determining the hydraulic conductivity of soils subjected to freezing and thawing]. *Geoekologiya*, 2001, no. 4.
28. Hirose G., Ito Y. Experimental Estimation of Permeability of Freeze-thawed Soils in Artificial Ground Freezing. *Procedia Eng.*, 2017. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.053.
29. Nevzorov A.L., Korshunov A.A. Pribor dlya opredeleniya deformacij i sil moroznogo pucheniya grunta [An apparatus for determining frost heave deformations and pressure of soils]. Patent Rossiiskaia Federatsiya no. 2473080 (2013).
30. Nevzorov A.L., Doroshenko S.P. Pribor dlya opredeleniya moroznogo pucheniya i vodopronicaemosti grunta pri ciklicheskom promerzanii-ottaivanii [An apparatus for studying of frost heaving and water permeability of soils under cyclic freezing-thawing]. Patent Rossiiskaia Federatsiya no. 2586271 (2016).
31. Nevzorov A.L., Churkin S.V., Korshunov A.A. Pribor dlya opredeleniya deformacij moroznogo pucheniya grunta [An apparatus for determining frost heave]: pat. Ros. Federaciya. Patent Rossiiskaia Federatsiya no. 156395 (2014).
32. Nevzorov A.L., Churkin S.V., Korshunov A.A. Pribor dlya opredeleniya deformacij moroznogo pucheniya grunta [An apparatus for determining frost heave]: pat. Ros. Federaciya. Patent Rossiiskaia Federatsiya no. 2556681 (2015).
33. Nevzorov A.L., Korshunov A.A. Pribor dlya izmereniya deformacij moroznogo pucheniya grunta [An apparatus for determining frost heave]. Patent Rossiiskaia Federatsiya no. 2474650 (2011).
34. Kim W., Daniel D.E. Closure to “Effects of Freezing on Hydraulic Conductivity of Compacted Clay” by Woon Hyung Kim and David E. Daniel (July, 1992, Vol. 118, No. 7). *J. GeotechEng*, 1993. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:11(1865).
35. Konrad J.M., Samson M. Hydraulic conductivity of kaolinite-silt mixtures subjected to closed-system freezing and thaw consolidation. *Can Geotech J.*, 2000. DOI: 10.1139/T00-003.
36. Lu Z, Xian S, Yao H, Fang R, She J. Influence of freeze-thaw cycles in the presence of a supplementary water supply on mechanical properties of compacted soil. *Cold RegSciTechnol*, 2019, DOI: 10.1016/J.COLDREGIONS.2018.09.009.
37. Qi J., Vermeer P.A., Cheng G. A review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties. *PermafrostPeriglac Process*, 2006, DOI: 10.1002/PPP.559.
38. Zimmie T.F., La Plante C. Effect of freeze/thaw cycles on the permeability of a fine-grained soil. *Hazard. Ind. Wastes – Proc. Mid-Atlantic Ind. Waste Conf.*, 1990.
39. Doroshenko S.P., Nevzorov A.L., Boldyrev G.G., Korshunov A.A. Pribor dlya opredeleniya deformacij moroznogo pucheniya i vodopronicaemosti gruntov. *Geotekhnika*, 2019, vol. XI, no. 4, pp. 18–28, DOI: 10.25296/2221-5514-2019-11-4-18-28.
40. Kujala K., Ravaska O. Influence of test conditions and equipment on the frost heave test. *Frost Geotech Eng Int Symp Saariselka*, 1989, vol. 2.
41. Korshunov A.A., Churkin S.V., Nevzorov A.L. Calibration of PLAXIS frozen/unfrozen soil model according to results of laboratory tests and in-situ monitoring. *Lect. Notes Civ. Eng.*, 2020. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_12.