

# ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ КРИОГЕННОГО ПУЧЕНИЯ ГРУНТА

## LABORATORY RESEARCHES OF THE PRESSURE OF CRYOGENIC SOIL HEAVING

А. Г. АЛЕКСЕЕВ, канд. техн. наук

*Приведена методика лабораторного определения удельного нормального давления морозного пучения грунтов. Рассмотрены зависимости величины нормального давления пучения от свойств грунта (влажность, плотность) и величины внешней нагрузки. Представлены значения максимального давления пучения грунта для различным типов грунтов. Рассмотрена задача определения осадки подстилающего немерзлого грунта под действием давления пучения.*

*The technique of laboratory determination of the specific normal pressure of frost heaving of soils is given. The dependences of the normal heaving pressure on the soil properties (moisture, density) and the external load are considered. The values of the maximum pressure of soil heaving for various types of soils are presented. The problem of determining the settlement of underlying unfrozen soil under the influence of heaving pressure is considered.*

### Ключевые слова:

*Нормальное давление морозного (криогенного) пучения грунта, лабораторные исследования, кристаллизация воды, криогенная миграция*

### Key words:

*Normal pressure of frost (cryogenic) soil heaving, laboratory tests, water crystallization, cryogenic migration*

Устройство фундаментов в слое сезонного промерзания-оттаивания пучинистых грунтов приводит к развитию нормального давления криогенного пучения, что обусловлено расширением поровой воды, промерзшего под фундаментом слоя грунта при кристаллизации, а также воды, поступающей в грунт в результате криогенной миграции.

Устойчивость фундаментов на действие нормальных сил пучения выполняется в соответствии с СП 25.13330.2012 [1]. Давление пучения, действующее на подошву фундамента, определяется умножением площади фундамента на значение удельного нормального давления пучения грунта, определяемого опытным путем. До настоящего времени нормативные методы оценки величины удельного нормального давления пучения грунта не разработаны.

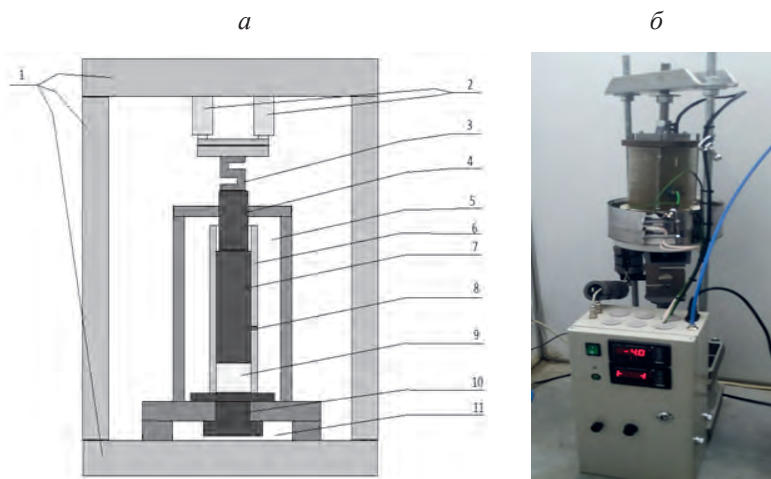
Для разработки метода определения удельного нормального давления пучения грунта с использованием проведенных ранее исследований [2–6] выполнено физическое моделирование процесса криогенного пучения в лабораторных условиях.

При проведении лабораторных исследований решались следующие задачи:

- выявление зависимости давления морозного пучения от физических свойств (влажность и плотность) выбранного типа грунта – суглинка;
- определение давления морозного пучения под действием различных значений внешней нагрузки;
- разработка методики лабораторного определения нормального давления морозного пучения;
- определение величины осадки грунта под действием давления пучения.

### Зависимости давления морозного пучения от физических свойств

Исследования проводились в двух установках. Результаты исследований, проведенных в первой установке, представлены в статьях [7–8]. Вторая установка представлена на рисунке 1. Установка позволяет определять максимальное давление морозного пучения образца грунта, промерзающего без возможности увеличения в объеме, а также перемещение верха образца в результате его промораживания при различной внешней нагрузке. Управление и слежение за испытанием ведется в автоматическом режиме с помощью персонального компьютера.



**Рис. 1.** Установка по определению нормальных сил морозного пучения, а – принципиальная схема установки; б – фото испытательной установки

- 1 – элементы силовой рамы; 2 – система задания нагрузки; 3 – датчик силы; 4 – система поддержания температуры верхней части образца; 5 – термокамера; 6 – гильза из нетеплопроводного материала; 7 – грунт; 8 – температурный датчик, установленный на высоте 100 мм от верха образца; 9 – капиллярно-пористый материал; 10 – система поддержания температуры в нижней части образца; 11 – поддон с водой для подтока воды

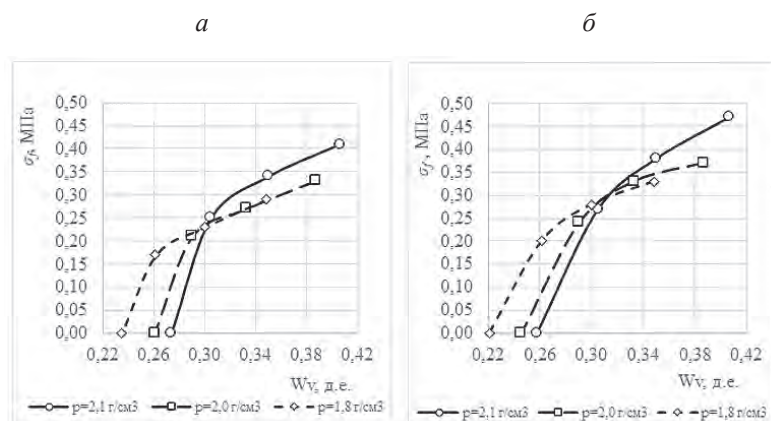
Установка состоит из обоймы для грунта диаметром 112,8 мм и высотой 150 мм, емкости с водой для промораживания грунта с подтоком воды, устройства для регулирования температуры воды, датчика силы для задания, поддержания и измерения внешней нагрузки. Для исключения смерзания грунта с обоймой последняя смазывалась техническим вазелином до укладки грунта.

С помощью установки задаются и определяются нормальные усилия, возникающие при промораживании грунтов в условиях жесткой системы «силовая рама-камера с образцом грунта-датчик силы».

Физическое моделирование заключалось в одностороннем вертикальном промораживании подготовленного образца грунта в условиях компрессии (без возможности объемного расширения  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$ ) с возможностью внешнего массообмена и приложением нагрузки на верхней поверхности образца. Температура на верхней поверхности образца составляла  $-4$  и  $-6,8$  °С. При проведении экспериментов измерялось вертикальное давление пучения  $\sigma_z = \sigma_f$  и вертикальная деформация пучения  $\varepsilon_z = \varepsilon_f$ .

В результате проведенных лабораторных экспериментов по промораживанию образцов суглинка в замкнутом объеме (без возможности перемещения) получены зависимости развития давления морозного пучения от физических характеристик грунта (влажность, плотность (плотность скелета) и степень заполнения пор грунта водой), в открытой (с возможностью поступления воды в промерзающий образец) и закрытой (без доступа воды в образец) системах.

Величина максимального давления морозного пучения грунта с увеличением начальной объемной влажности с 0,23 до 0,41 д. е. (рисунок 2), замерзающего в закрытой системе, возрастала с 0,17 до 0,41 МПа, для открытой системы давление пучения возрастало с 0,20 до 0,47 МПа. При объемной влажности менее 0,22 – 0,27 д. е. (в зависимости от плотности грунта) давление криогенного пучения грунта  $\sigma_f$  не проявляется (рисунок 2).

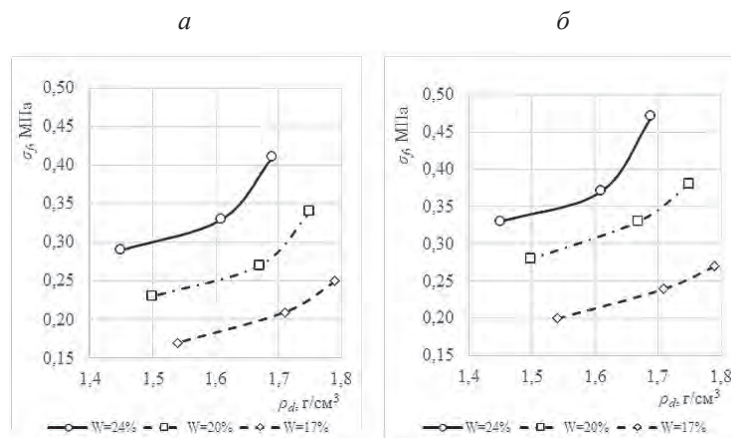


**Рис. 2.** Зависимость давления морозного пучения ( $\sigma_f$ ) от начальной объемной влажности грунта ( $W_v$ ) при различных значениях плотности: а – закрытая система; б – открытая система

Развитие давления пучения в закрытой системе зависит, как показали эксперименты, от начальной плотности грунта. Увеличение плотности скелета с 1.45 до 1.79 г/см<sup>3</sup> при постоянной влажности возрастало, как в закрытой, так и в открытой системах (рисунок 3 а и б). Увеличение плотности грунта в замкнутом объеме приводит к возрастанию степени заполнения пор грунта водой и более плотной компоновкой минеральных частиц. Перемещению частиц при кристаллизации поровой воды препятствует замкнутый объем, благодаря чему развивается максимально возможное для данных условий давление криогенного пучения.

Открытая система позволяет развиваться пленочному механизму криогенной миграции. В результате миграции влажность промерзших образцов возрастала на 1,4–3,5%. В замкну-

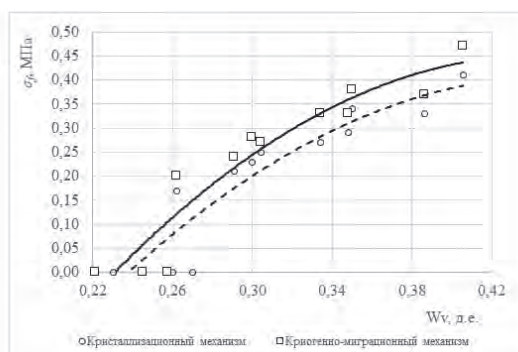
том объеме (полное подавление деформации пучения) происходит торможение процесса криогенной миграции воды в промерзающий грунт.



**Рис. 3.** Зависимость давления морозного пучения ( $\sigma_f$ ) от начальной плотности скелета грунта ( $\rho_d$ ): а – закрытая система; б – открытая система

Криогенное пучение формируется за счет двух механизмов: кристаллизационного, реализация которого осуществляется при замерзании начальной поровой воды и криогенно-миграционного, развивающегося за счет массопереноса в результате криогенной миграции воды в промерзающий грунт. Экспериментально получены зависимости максимального давления криогенного пучения при кристаллизационном и криогенно-миграционном механизме от начальной влажности (рисунок 4).

Увеличение объемной влажности образцов, промерзающих в замкнутом объеме приводит к возрастанию давления пучения. Кривые, описывающие рассматриваемые механизмы, практически повторяют траекторию друг друга. Кривая, описывающая криогенно-миграционный механизм проходит выше кривой кристаллизационного механизма, разница составляет величину давления, реализуемого за счет криогенной миграции. Как видно из рисунка 4, основная доля в развитии давления пучения принадлежит начальной влажности грунта – порядка 90%, остальная часть приходится на воду, приходящую в грунт при криогенной миграции.



**Рис. 4.** Зависимость давления криогенного пучения ( $\sigma_f$ ) от влажности ( $W_v$ )

### Определение влияния внешней нагрузки на величину давления морозного пучения грунта и разработка методики лабораторного определения данного давления

При проведении исследований проведено несколько серий экспериментов. В первой серии определена величина максимальной деформации криогенного пучения при свободной поверхности и при отсутствии внешней нагрузки. Во второй серии определялось максимальное давление пучения грунта без допущения деформации пучения (таблица 1). В третьей серии экспериментов определяли деформации морозного пучения при нагрузке равной 0,6 от максимального давления. В четвертой серии определялась деформация морозного пучения при нагрузке равной 0,3 от максимального давления. Во время экспериментов замерялось вертикальное перемещение образца.

Таблица 1

#### Значения максимального давления криогенного пучения грунта

Максимальное нормальное давление, МПа	Разновидность грунта			
	Песок	Супесь	Суглинок	Глина
	0,05	0,33	0,83	1,53

Результаты определения деформации морозного пучения при различных значениях внешней нагрузки приведены в таблице 2 и на рисунке 5.

Таблица 2

#### Значения деформации криогенного пучения при различных значениях внешней нагрузки

Вид грунта	Величина нормального давления $\sigma$ , МПа			
	$\sigma_{\max}$	$0,6 \cdot \sigma_{\max}$	$0,3 \cdot \sigma_{\max}$	0
	Относительная деформация криогенного пучения, д.е.			
Песок	0	0,001	0,002	0,003
Супесь	0	0,005	0,011	0,040
Суглинок	0	0,011	0,021	0,043
Глина	0	0,022	0,045	0,075

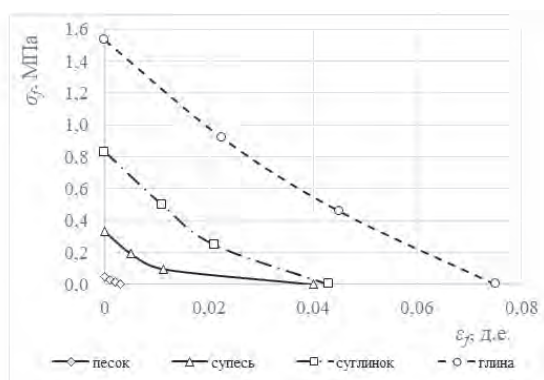


Рис. 5. Зависимость нормального давления ( $\sigma$ ) от относительной деформации криогенного пучения грунта ( $\epsilon$ )

Эксперименты показали, что внешняя нагрузка оказывает существенное влияние на развитие давления криогенного пучения грунта. Внешняя нагрузка в пучающемся грунте вызывает развитие давления морозного пучения. Нагрузка на промерзающий грунт может превышать давление пучения, в этом случае поднятия поверхности не произойдет.

Давление криогенного пучения возрастает с увеличением содержания начальной влажности грунта. Глина влажностью 60,9% имела максимальное значение давления пучения равное 1,53 МПа, суглинок и супесь влажностью 24,2 и 21,1%, соответственно, имели давление пучения 0,83 и 0,33 МПа, для песка влажностью 18,2% давление составило 0,05 МПа (таблица 1).

Развитие процесса криогенного пучения грунта в зависимости от величины внешней нагрузки можно разделить на три стадии.

1 Стадия – отсутствие внешней нагрузки. Пучение развивается при стандартных условиях развития механизма кристаллизации поровой воды и механизма криогенной миграции воды в промерзающий слой.

2 Стадия – наличие внешней нагрузки на грунт. В грунте развиваются процессы консолидации, поровая вода отжимается, процесс криогенной миграции подавляется.

3 Стадия – наличие максимальной внешней нагрузки, превышающей максимальное давление пучения. В данном случае давление при промерзании грунта в замкнутом объёме будет зависеть от начального количества воды в грунте, так как криогенная миграция практически полностью подавляется.

Внешняя нагрузка на образец может привести к подавлению процессов массопереноса в нем. Плотность миграционного потока в образце без нагрузки значительно больше, чем под нагрузкой.

Действие давления на скелет грунта приводит к перекомпоновке минеральных частиц, увеличению плотности и перераспределению воды. Для крупнозернистых песчаных грунтов отмечается отток воды в нижние слои грунта.

Методика проведения лабораторных испытаний позволила определить зависимости давления от различных параметров грунта и значениях внешней нагрузки с требуемой для подобных экспериментов точностью и достоверностью, после чего была использована при разработке ГОСТ Р «Грунты. Определение нормальных сил морозного пучения грунтов в лабораторных условиях».

Учитывая, что методика позволяет определить единичное значение давления пучения при одной нагрузке, рекомендовано выполнять серию экспериментов при значениях нагрузок: 0, max, 0,3 и 0,6 от max, что позволяет построить зависимость давления от деформации. После чего при фактических значениях нагрузки от здания определяется деформация морозного пучения грунта. Данные рекомендации предложено внести в СП 25.13330.2012 [1].

### **Определение величины осадки грунта под действием давления пучения**

Под действием давления пучения грунта, обусловленного сопротивлением внешней нагрузке при кристаллизации воды, отмечается осадка подстилающего немерзлого грунта. Оценить влияние внешней нагрузки на величину деформации пучения можно, рассчитав осадку с учетом дополнительного давления от морозного пучения грунта, вызванного внешней нагрузкой. Действие давления на подстилающий грунт приведет к изменению коэффициента пористости.

Примем для изменения давления пучения компрессионную кривую первичного сжатия.

$$e_1 = e_0 - C \cdot \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (1)$$

где  $e_1$  – коэффициент пористости при напряжении  $\sigma$ , д. е;

$e_0$  – начальный коэффициент пористости грунта, д. е.;

$C$  – коэффициент компрессии, д. е.;

$\sigma_0$  – давление, при котором начинается первичное сжатие грунта, кПа.

В данном выражении в качестве внешней нагрузки  $\sigma$  принимаем давление пучения равного внешнему давлению  $\sigma = \sigma_f = F + \gamma_f d_{fi}$

где  $F$  – внешняя нагрузка, кПа;

$\gamma_f d_{fi}$  – нагрузка от веса промерзшего слоя грунта, кПа.

Коэффициент пористости также можно определить из следующего выражения

$$e_1 = e_0 - \varepsilon(1 + e_0) = e_0 - \frac{s}{H}(1 + e_0) \quad (2)$$

Откуда

$$s = e_0 - \varepsilon(1 + e_0) = \frac{H(e_0 - e_1)}{1 + e_0}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – относительная деформация сжатия, равная отношению осадки  $S$  к толщине сжимаемой толщи  $H$ , д. е.

Подставив в выражение (3) выражение (1), получим

$$s = \frac{H(e_0 - e_0 + C \cdot \ln \frac{\sigma}{\sigma_0})}{1 + e_0} = \frac{H \cdot C \cdot \ln \frac{\sigma}{\sigma_0}}{1 + e_0} \quad (4)$$

С учетом давления пучения получим

$$s = \frac{H \cdot C \cdot \ln \frac{F + \gamma_f d_{fi}}{\sigma_0}}{1 + e_0} \quad (5)$$

Полученные зависимости позволяют определить значение осадки грунта при действии давления морозного пучения, обусловленного внешним давлением см. формулу (5).

## Выводы

1. Установлены зависимости давления криогенного пучения грунта от физических свойств и внешней нагрузки.

2. Установлено, что возрастание начальной влажности грунта приводит к повышению давления криогенного пучения. Так, с увеличением объемной влажности от 0,23 до 0,41 д. е. давление возрастало от 0,17 до 41 МПа для закрытой системы и от 0,2 до 0,45 МПа – для открытой системы.

3. Определено, что увеличение плотности скелета грунта с 1,45 до 1,79 г/см<sup>3</sup> приводит к увеличению давления пучения, что связано с возрастающей степенью заполнения пор грунта водой и более плотной компоновкой минеральных частиц. Перемещению частиц при кристаллизации поровой воды препятствует замкнутый объем, благодаря чему развивается максимально возможное для данных условий давление криогенного пучения.

4. Установлено, что криогенная миграция с возрастанием нагрузки на грунт снижается, как в результате уменьшения плотности миграционного потока, так при промерзании грунта в замкнутом объеме влажность грунта в результате криогенной миграции увеличивается до 3,5%.

5. Установлено, что с увеличением глинистых частиц грунты проявляют большие пучинистые свойства. Так, глина имеет максимальное давления пучения 1,53 МПа, суглинков – 0,83 МПа, супесь – 0,33 МПа, пылеватый песок – 0,05 МПа.

6. Установлено, что увеличение внешнего давления на грунт приводит к возрастанию давления и снижению деформации криогенного пучения грунта.

7. Предложена формула для расчета осадки грунта под действием давления криогенного пучения, величина которой определяется коэффициентами пористости, изменяющимися при возрастании давления.

8. По результатам исследований разработан ГОСТ Р «Грунты. Определение нормальных сил морозного пучения грунтов в лабораторных условиях», а также внесено предложение по определению давления морозного пучения грунта по результатам лабораторных исследований в зависимости от веса сооружения, а также деформации сооружения в зависимости от сил морозного пучения в СП 25.13330.2012.

## Библиографический список

1. Свод правил СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04 – 88 / Москва, 2012.

2. Орлов В.О., Дубнов Ю.Д., Меренков Н.Д. Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений. – Л.: Стройиздат, 1977. – 183 с.

3. Толкачев Н.А. Экспериментальные исследования нормальных сил морозного пучения грунтов //Сб. трудов НИИОСП. – М., 1963. – №52 – С. 91 – 116.

4. Чеверев В.Г., Бурнаев Р.С., Гагарин В.Е., Сафронов Е.В. Влияние внешней нагрузки на степень морозной пучинистости глинистых грунтов. Криосфера Земли. 2013. Т. 17. № 4. С. 57-62.

5. Киселев М.Ф. Расчет нормальных сил морозного выпучивания фундаментов //Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1961. – №5 – С. 23 – 24.

6. Голли О.Р. и др. Об опыте моделирования в лаборатории процессов пучения //Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Инженерное мерзлотоведение в гидротехническом строительстве. НИИГ. – Л., 1984. – С. 30 – 34.

7. Бондаренко Г.И., Алексеев А.Г. Определение давления морозного пучения грунтов в лабораторных условиях. В сборнике: Геотехника: актуальные теоретические и практические проблемы. Межвузовский технический сборник трудов. Федеральное агентство по образованию, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Санкт-Петербург, 2006. С. 220-225.

8. Алексеев А.Г. Методика исследования давления, действующего на подпорные стены при промерзании-оттаивании грунта. Основания, фундаменты и механика грунтов. 2007. № 3. С. 15-18.

## Автор

Андрей Григорьевич АЛЕКСЕЕВ, канд. техн. наук, руководитель центра геокриологических и геотехнических исследований НИИОСП им. Н. М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», доцент МГСУ, Москва

Andrey ALEKSEEV, Ph.D. (Engineering), Head of Geocryological and geotechnical research center, NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Associate Professor of Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), Moscow

e-mail: adr-alekseev@yandex.ru