

УДК 624.131.43:551.34

Научная специальность: 1.6.7 Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

ВЛИЯНИЕ ЦИКЛОВ ЗАМОРАЖИВАНИЯ-ОТТАИВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И ВОДНО-ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ

Анисимова Ольга Геннадьевна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» Москва, Россия

e-mail: anisimova_olga_12_12@mail.ru

Аннотация

В статье обобщены современные представления о влиянии циклического замораживания и оттаивания на структуру и водно-физические свойства дисперсных грунтов. Рассмотрены механизмы фазового перехода поровой воды, криогенного перераспределения влаги, изменения порового пространства и агрегатного состояния частиц. Материал сформирован на основе сравнительного анализа нормативных документов и рецензируемых экспериментальных исследований глинистых и пылеватых грунтов. Показано, что наиболее выраженные изменения обычно происходят в первые циклы, после чего система стремится к новому квазистационарному структурному состоянию. Направление изменения плотности, пористости и деформируемости зависит от исходной структуры, влажности, степени водонасыщения, температурной амплитуды и условий водообмена. Отмечено, что циклы замораживания–оттаивания способны увеличивать гидравлическую проводимость талого грунта, перераспределять поры и снижать устойчивость структуры, однако универсальная количественная зависимость для всех типов дисперсных грунтов отсутствует. Результаты важны для оценки сезонно промерзающих оснований и интерпретации лабораторных испытаний в инженерной геологии.

Ключевые слова: замораживание–оттаивание, дисперсные грунты, глинистый грунт, пористость, влажность, криогенная структура, гидравлическая проводимость, мерзлотоведение.

EFFECT OF FREEZE–THAW CYCLES ON THE STRUCTURE AND HYDROPHYSICAL PROPERTIES OF DISPERSED SOILS

Anisimova Olga Gennadievna

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)» Moscow, Russia

e-mail: anisimova_olga_12_12@mail.ru

Abstract

The paper summarizes current knowledge on the effect of cyclic freezing and thawing on the structure and hydrophysical properties of dispersed soils. The mechanisms of pore-water phase transition, cryogenic moisture redistribution, pore-space transformation and particle aggregation are considered. The study is based on a comparative analysis of standards and peer-reviewed experimental publications dealing with clayey and silty soils. The strongest transformations are generally observed during the first cycles, after which the soil tends toward a new quasi-steady structural state. The direction of changes in density, porosity and deformability depends on the initial fabric, water content, degree of saturation, temperature amplitude and drainage conditions. Freeze–thaw cycling may increase the hydraulic conductivity of thawed soil, redistribute pore sizes and reduce structural stability, but no universal quantitative relationship is applicable to all dispersed soils. The findings are relevant to the assessment of seasonally frozen foundations and to the interpretation of laboratory tests in engineering geology.

Keywords: *freeze–thaw cycles, dispersed soils, clay, porosity, water content, cryogenic structure, hydraulic conductivity, permafrost engineering.*

Введение

Циклическое промерзание и оттаивание грунтов представляет собой один из наиболее распространенных природных процессов в холодных и умеренных климатических зонах. Его влияние не сводится к объемному расширению воды при кристаллизации. При движении фронта промерзания возникают температурные градиенты, меняется химический потенциал поровой воды, развивается криогенное всасывание и происходит перераспределение влаги. В результате после оттаивания грунт может существенно отличаться от исходного по строению порового пространства, плотности, водопроницаемости и механическим свойствам [3–6].

Для дисперсных грунтов особенно важна роль гранулометрического и минералогического состава. Чем выше доля пылеватых и глинистых частиц, тем заметнее вклад связанной и незамерзшей воды, а также миграции влаги к фронту замерзания. Однако знак и величина изменения свойств не являются однозначными: рыхлые и плотные грунты, закрытые и открытые системы, водонасыщенные и ненасыщенные образцы реагируют на одинаковое число циклов по-разному [5; 7; 8]. Именно поэтому перенос результатов отдельного лабораторного эксперимента на природный массив требует осторожности.

Актуальность темы усиливается тем, что сезонная динамика температуры грунта меняется вместе с продолжительностью снежного покрова, количеством переходов температуры через 0°C и режимом увлажнения. В инженерной геологии это влияет на оценку оснований дорог, площадочных сооружений и других объектов, работающих в зоне сезонного промерзания. ГОСТ 25100-2020 выделяет мерзлые грунты как самостоятельный класс и связывает их состояние с наличием льда и отрицательной температурой [1]. При проектировании оснований в районах распространения многолетнемерзлых грунтов дополнительно учитываются температурное состояние и возможность изменения свойств при оттаивании [2].

Цель работы – обобщить закономерности изменения структуры и водно-физических свойств дисперсных грунтов под действием повторных циклов замораживания–оттаивания. Для достижения цели решались задачи: сопоставить применяемые в публикациях условия циклирования; выделить показатели, наиболее чувствительные к фазовым переходам воды; определить общие и зависящие от условий тенденции изменения пористости, влажности и фильтрационных свойств; обозначить ограничения лабораторного моделирования.

Методы и методики

Работа выполнена как обзорно-аналитическое исследование. В качестве материала использованы нормативные документы по классификации и расчетному учету мерзлых грунтов [1; 2], классические и современные рецензируемые публикации по физике промерзания, структурным перестройкам и изменению свойств глинистых и пылеватых грунтов [3–10]. При отборе источников учитывались наличие контролируемых циклов замораживания–оттаивания, описание исходного состояния грунта и фиксация хотя бы одного водно-физического или структурного показателя. Работы, посвященные только морозному пучению без анализа состояния грунта после оттаивания, рассматривались как вспомогательные.

Сопоставление исследований проводилось по четырем группам факторов: 1) тип и исходная структура грунта; 2) влажность и степень водонасыщения; 3) температурный режим и число циклов; 4) условия водообмена. Такой подход необходим, поскольку одинаковое число циклов при разных минимальных температурах и скоростях охлаждения не является эквивалентным воздействием. Обзор Henry [3] показывает, что чрезмерные температурные амплитуды и быстрые лабораторные переходы могут снижать природную репрезентативность эксперимента. В таблице 1 приведены параметры, определяющие результат лабораторного циклирования.

Таблица 1 – Параметры, определяющие результат лабораторного циклирования

Фактор	Физический смысл	Ожидаемое влияние
Исходная плотность	Определяет резерв для уплотнения или разуплотнения	Рыхлые и плотные образцы могут менять объем в противоположных направлениях
Влажность / насыщение	Определяет количество воды, способной к фазовому переходу	При высокой влажности сильнее проявляются миграция воды и структурная перестройка
Минимальная температура	Задаёт долю замерзшей воды и интенсивность температурного градиента	Более низкая температура обычно усиливает криогенное воздействие
Условия водообмена	Открытая система допускает приток воды, закрытая – нет	Приток воды повышает вероятность сегрегационного льдообразования
Число циклов	Характеризует накопленное воздействие	Наиболее быстрые изменения часто наблюдаются в первые циклы

Примечание. Составлено автором на основе [3–8].

Для сопоставления влажностного состояния использовалась массовая влажность w , определяемая отношением массы воды к массе сухого грунта. В общем виде показатель записывается как:

$$w = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где m_w – масса воды в пробе;

m_d – масса сухого грунта.

Для описания порового пространства использовались пористость n и коэффициент пористости e . При известной плотности частиц ρ_s и сухой плотности ρ_d коэффициент пористости может быть выражен зависимостью:

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (2)$$

Для количественного сравнения изменения любого показателя X после N циклов применима относительная величина изменения:

$$\Delta X_N = \left(\frac{X_N - X_0}{X_0} \right) \cdot 100\%, \quad (3)$$

где X_0 – исходное значение,

X_N – значение после N циклов.

В настоящей работе эта формула используется как единая схема интерпретации опубликованных данных, а не для формирования искусственно объединенной выборки: различия методик не позволяют корректно рассчитывать единую метааналитическую оценку без доступа к первичным данным.

Результаты

Сопоставление публикаций показывает, что повторное замораживание–оттаивание следует рассматривать не как простой процесс разрушения, а как структурную перестройку. При замерзании часть поровой воды превращается в лед, а незамерзшая вода мигрирует в направлении зоны с более низким потенциалом. Ледяные включения создают локальные напряжения и раздвигают частицы; при оттаивании сформированная структура частично оседает. Одновременно возможны агрегация тонких частиц и изменение контактов между агрегатами. Поэтому итоговая структура определяется конкуренцией разуплотнения, уплотнения и переупаковки частиц [4; 6].

Для глинистых грунтов характерна выраженная зависимость результата от исходного состояния. Konrad J.-M. [5] показал, что после циклов общий коэффициент пористости талого пылевато-глинистого грунта мог как возрастать, так и уменьшаться в

зависимости от степени переуплотнения, при этом эффективная пористость возрастала, а вертикальная гидравлическая проводимость после оттаивания увеличивалась. Fan и соавт. [7] также выявили неоднородное изменение влажности, сухой плотности и коэффициента пористости по высоте водонасыщенного глинистого образца. Это подтверждает, что использование только среднего значения по всему образцу может скрывать локальные зоны структурной перестройки.

Повторность воздействия имеет нелинейный характер. В экспериментальных работах с глинами наиболее заметная часть изменений физико-механических показателей происходит в начальные циклы, затем темп изменения снижается [6]. Подобное поведение согласуется с представлением о переходе системы к структуре, более устойчивой к заданному режиму циклирования. Однако «стабилизация» не означает возвращение к исходному состоянию: новое равновесие может характеризоваться иной системой пор и другими фильтрационными путями.

Водно-физические свойства наиболее тесно связаны с изменением распределения пор по размерам. Развитие трещин и расширение части макропор после оттаивания способно повышать водопроницаемость; с другой стороны, уплотнение отдельных зон и переориентация глинистых агрегатов могут локально снижать ее. Современные обзоры механических свойств мерзлых грунтов указывают на растущее значение методов компьютерной томографии, ЯМР, электронной микроскопии и ртутной порометрии, позволяющих связывать макроскопический отклик с эволюцией микроструктуры [9].

Таблица 2 – Обобщенные изменения свойств дисперсных грунтов после циклов замораживания–оттаивания

Показатель	Типичная тенденция	Ключевые оговорки
Плотность сухого грунта	Может уменьшаться или возрастать	Зависит от исходной плотности, нагрузки и дренирования
Коэффициент пористости	Перераспределяется; знак среднего изменения неоднозначен	Необходимо учитывать распределение по высоте и размер пор
Гидравлическая проводимость	Часто возрастает после оттаивания	Эффект сильнее при формировании связанных макропор и трещин
Влажность	Перераспределяется внутри образца	При открытой системе возможен дополнительный приток воды
Структурная устойчивость	В первые циклы обычно снижается или перестраивается	В последующих циклах возможен выход на квазистационарный режим

Примечание. Таблица отражает качественные тенденции и не является универсальной расчетной зависимостью; составлено по [3–9].

Анализ методик выявляет существенное ограничение сравнимости данных. В публикациях используются разные диапазоны температур, длительности фаз, размеры образцов и критерии завершения замораживания. Быстрое охлаждение небольшого лабораторного образца способно создавать температурные градиенты, которые отличаются от естественного промерзания массива. Кроме того, закрытая система исключает внешний источник воды, тогда как в природном грунте миграция из нижележащих горизонтов может быть принципиально важной [3; 5]. Поэтому число циклов само по себе не может служить достаточной характеристикой криогенного воздействия.

Для инженерно-геологической интерпретации наиболее надежным является совместный анализ температуры, влажности, плотности и изменения порового пространства. Если после циклирования фиксируется увеличение водопроницаемости при небольшом изменении средней пористости, это может указывать не на отсутствие структурной трансформации, а на перераспределение пор и формирование более связанной сети крупных каналов. Аналогично одинаковое среднее влагосодержание не исключает

сильного внутрипрофильного перераспределения воды. Такие эффекты особенно важны для тонкодисперсных грунтов, где доля незамерзшей воды сохраняется и при отрицательной температуре.

В природных условиях действие замораживания–оттаивания сочетается с нагрузкой, фильтрацией, засолением и сезонным высыханием. Поэтому лабораторные результаты следует использовать как механизм-ориентированную основу, а не как прямой коэффициент пересчета свойств основания. Для практических исследований целесообразно задавать температурные режимы по данным наблюдений на конкретной площадке и фиксировать не только начальное и конечное состояние, но и пространственное распределение температуры и влажности в ходе цикла.

Заключение

Циклы замораживания–оттаивания вызывают комплексную перестройку дисперсных грунтов, включающую фазовые превращения поровой воды, миграцию влаги, изменение контактов между частицами и перераспределение пор. Эти процессы определяют последующее состояние грунта после оттаивания и могут существенно менять его водно-физические свойства.

Обобщение опубликованных данных показывает, что универсального направления изменения плотности и пористости не существует. Результат задается исходной структурой, влажностью, степенью водонасыщения, температурной амплитудой, внешней нагрузкой и возможностью притока воды. При этом увеличение гидравлической проводимости после циклирования встречается достаточно часто и связано прежде всего с перестройкой сети эффективных пор и развитием трещиноватости.

Наиболее интенсивные изменения во многих экспериментах приходятся на первые циклы, после чего темп трансформации снижается. Это позволяет говорить о формировании нового квазистационарного состояния, но не о восстановлении исходной структуры. Для корректной оценки необходимо рассматривать не только средние значения влажности или пористости, но и их пространственное распределение.

Перспективным направлением является сочетание традиционных физических испытаний с компьютерной томографией, ЯМР и другими методами визуализации порового пространства. Такой подход позволяет связать макроскопические изменения водопроницаемости и деформируемости с конкретными микроструктурными механизмами и повысить надежность прогноза поведения сезонно промерзающих грунтов.

Литература

1. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2020.
2. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. СНиП 2.02.04-88. – М.: Минстрой России, 2020.
3. Henry H.A.L. Soil freeze-thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2007. – Vol. 39, No. 5. – P. 977–986. DOI: 10.1016/j.soilbio.2006.11.017.
4. Zhang Z. Reconstruction of Soil Particle Composition During Freeze-Thaw Cycling / Z. Zhang, W. Ma, W. Feng, D. Xiao, X. Hou // *Pedosphere*. – 2016. – Vol. 26, No.2. – P. 167-179. DOI: 10.1016/S1002-0160(15)60033-9.
5. Konrad J.-M. Physical processes during freeze-thaw cycles in clayey silts / J.-M. Konrad // *Cold Regions Science and Technology*. – 1989. – Vol. 16, No.3. – P. 291-303. – DOI: 10.1016/0165-232X(89)90029-3.
6. Wang D. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai–Tibet clay / D. Wang, W. Ma, Y. Niu, X. Chang, Z. Wen // *Cold Regions Science and Technology*. – 2007. – Vol. 48, No.1. – P. 34-43. – DOI: 10.1016/j.coldregions.2006.09.008.
7. Fan W. Impact of freeze-thaw on the physical properties and compressibility of saturated clay / W. Fan, P. Yang, Z. Yang // *Cold Regions Science and Technology*. – 2019. – Vol. 168. – DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102873.

8. Zhang Y., Lu Y., Liu S., Fang B., Li Z., Liu K. Volumetric behavior of an unsaturated clayey soil-rock mixture subjected to freeze-thaw cycles: A new insight / Y. Zhang, Y. Lu, S. Liu, B. Fang, Z. Li, K. Liu // Cold Regions Science and Technology. – 2022. – Vol. 201. – DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103608.
9. Li K.-Q. State of the art of mechanical behaviors of frozen soils through experimental investigation / K.-Q. Li, Z.-Y. Yin, Z.-H. Yang, Y. Liu // Cold Regions Science and Technology. – 2025. – Vol. 236. – DOI: 10.1016/j.coldregions.2025.104497.
10. Czurda K.A. Freezing effects on soils: Comprehensive summary of the ISGF 82 / K.A. Czurda // Cold Regions Science and Technology. – 1983. – Vol. 8, No.2. – P. 93-107. – DOI: 10.1016/0165-232X(83)90001-0.