УДК 624.131.4

Фильтрационный анализ оттаивающих грунтов как метод оценки геотехнических свойств (прочности и деформируемости)

М. Н. Царапов, М. В. Калабина
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1. E-mail: tsarapov@geol.msu.ru, kalabina.mariya@yandex.ru
(Статья поступила в редакцию 28.01.2026 г.)

Рассматривается фильтрационный анализ как инновационный метод оценки геотехнических свойств оттаивающих мерзлых грунтов. На основе экспериментальных данных установлены корреляционные зависимости между коэффициентом фильтрации, прочностными характеристиками и показателями деформируемости. Предложена интегрированная модель для прогнозирования поведения мерзлых грунтов в условиях оттаивания. Метод демонстрирует высокую корреляцию и может быть применен для оптимизации инженерных расчетов в арктических проектах.
Ключевые слова: *мерзлые грунты, оттаивание, коэффициент фильтрации, прочность, деформируемость, геотехника*.
DOI: 10.17072/psu.geol.25.3.236

Введение

Освоение арктических и субарктических территорий сопряжено со значительными геотехническими рисками, обусловленными деградацией вечномерзлых грунтов (Biskaborn, 2019). Оттаивание мерзлых грунтов приводит к радикальным изменениям физических свойств грунтов: увеличению содержания воды, снижению прочности и росту деформируемости, что может вызывать осадки, сдвиги и деформации инженерных сооружений (Vinson, 1993). Существующие методы оценки геотехнических свойств (горячий штамп, сдвиг целиков, резистометрия) сложны в реализации в полевых условиях и не всегда учитывают динамику фазовых переходов (Konovalov, 2005).

Современная геотехника требует разработки новых методов для оценки прочностных и деформационных свойств мерзлых грунтов при оттаивании. Изучение структуры материалов по пористости и водопроницаемости широко распространено в различных разделах материаловедения. Но в механике грунтов исследования водопроницаемости как средства изучения структуры грунтов не используют до сих пор. Поэтому в данной статье предлагаются к рассмотрению результаты исследований структуры оттаивающих грунтов новым инновационным методом, позволяющим на основе анализа фильтрационных свойств получить представление о прочности и деформируемости оттаивающих грунтов. Фильтрационный анализ, основанный на измерении коэффициента фильтрации K_f, позволяет косвенно оценивать структурные преобразования грунтового массива в процессе оттаивания. Увеличение коэффициента фильтрации K_f отражает рост эффективной пористости, миграцию влаги и ослабление скелета, что коррелирует со снижением прочности и ростом деформируемости (Bing, 2011). Целью данного исследования стала разработка и валидация метода фильтрационного анализа для оценки геотехнических свойств оттаивающих грунтов.

© Царапов М. Н., Калабина М. В., 2026
Работа лицензирована в соответствии с CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Теоретические основы

Основными факторами, определяющими водопроницаемость грунтов, являются пористость, количество связной воды, неучитываемой в фильтрации, и поверхность пор, которая связана с удельной поверхностью. Эти величины не только определяют фильтрационные свойства грунтов, но и могут использоваться в качестве конкретных физических характеристик, отражающих структурные признаки грунтов, описанные в работе (Приклонский, 1949). Кроме того, удельные поверхности и количество связанной воды являются величинами, необходимыми для решения теоретических и практических вопросов грунтоведения, например для оценки взаимодействия среды (вода с минеральными зернами грунта), для решения задач подземной гидравлики, изучения электроосмоса, а также для расчетов рецептуры закрепления грунтов. Изучение структуры материалов по пористости и проницаемости ведется в настоящее время во многих научных и производственных областях. Однако в грунтоведении, механике грунтов, гидрогеологии и других областях исследование проницаемости не используют как средство изучения структуры грунтов. Первая попытка изучения структуры материалов по пористости и проницаемости была сделана Р. Бунзеном. Позднее О. Винер выдвинул теорию смешанных тел, на основании которой с помощью безразмерной константы, количественного отношения и свойства отдельных компонентов можно определять свойства всей смеси. По этой теории определяются как частный случай и свойства проницаемости. Идея О. Винера была значительно расширена в 1937–1939 гг. работами Э. Манегольда (Manegold, 1938). В дальнейшем К. Торкар применяет теорию смешанных тел для исследования структурных изменений металлических порошков при спекании. В этой работе показано, что основным показателем структуры дисперсных материалов может быть удельная поверхность, представляющая собой поверхность частиц или пор в единице объема или веса. Определение этой величины по пористости и проницаемости впервые представил П. Карман (Carman, 1939). В СССР же Б. В. Дерягин (Дерягин, 1946) и совершенствует метод определения удельной поверхности по проницаемости, и внедряет его в практику исследования порошковых материалов. В 1951–1954 годы предпринята попытка вычислить удельную поверхность и количество связанной воды пылеватых и песчаных грунтов нарушенного сложения по пористости и коэффициенту фильтрации (Горбунов, 1954, 1958).

Изучение зависимостей коэффициентов фильтрации грунтов от пористости и свойств воды показало, что большинство этих формул не учитывает связанную воду, изменяющую гидравлические элементы грунта, а формулы, в которых сделаны соответствующие поправки, несовершенны (Биндеман, 1933; Лейбензон, 1947; Carman, 1939). Поэтому необходимо рассмотреть вопрос фильтрации в общем виде, прежде чем приступить к выявлению отдельных величин, определяющих структуру грунтов.

В подавляющем большинстве случаев фильтрация в грунтах подчиняется закону Дарси. Исключением являются плотные глинистые грунты, в которых фильтрация протекает по линейному закону, отличающемуся от формулы Дарси постоянным членом; а также трещиноватые крупные обломочные породы, в которых зависимости скорости фильтрации от гидравлического уклона имеют квадратичную форму.

Исключая из рассмотрения квадратичную формулу и принимая фильтрующуюся воду соответственно закону Шведова – Бингама за вязко пластичное тело, на основании модели идеального эффективного грунта или путем использования гидравлического

радиуса пор, числа Рейнольдса и коэффициента сопротивления получаем следующую зависимость (1):

$$v = k_f \left[i - \frac{i_0}{3} \left(4 - \frac{i_0^3}{i^3}\right) \right] \qquad (1),$$

где v – скорость фильтрации; k_f – коэффициент фильтрации; i_0 – начальный градиент фильтрации; i – градиент фильтрации.

При $i > 3i_0$ формула (1) достаточно точно может быть представлена следующим образом (2):

$$v = k_f \left(i - \frac{4}{3} i_0 \right) \qquad (2).$$

Параметры выражения (1) связываются с физическими характеристиками грунта и воды следующими уравнениями (3–5):

$$k_f = A \frac{e - e_0}{1 + e} \qquad (3)$$

$$A = \frac{\rho_w g (1 + e_0)^{2\frac{1-m}{m}}}{2\mu\theta^2} \qquad (4)$$

$$i_0 = \frac{\tau_w \theta (1 + e_0)^{1-\frac{1}{m}}}{\rho_w (e - e_0)} \qquad (5),$$

где ρ_w – плотность воды, г/ см3; g – ускорение силы тяжести, см/сек 2; μ – вязкость воды, П; θ – удельная поверхность грунта, то есть отношение поверхности частиц грунта к их объему, 1/см; e – коэффициент пористости грунта;e_0 – количество связанной воды, не участвующей в движении, выраженное коэффициентом пористости; m – числовой коэффициент, зависящий от формы частиц, равный: для шаровых – 3, для чешуйчатых – 1 и условно принимаемый за 2 для частиц неопределенной формы; τ_w – сопротивление фильтрующей воды сдвигу.

Величины, входящие в уравнения (3–5), как, например, удельная поверхность грунта θ и количество связанной воды e_0, могут быть вычислены из коэффициента пористости e и соответствующих им коэффициентов фильтрации. Эти величины могут служить в качестве основных характеристик водонасыщенных грунтов, а метод их определения можно назвать фильтрационным анализом грунта.

Фильтрационный анализ, в отличие от гранулометрических анализов, представляющих дифференцирование грунта на фракции по скорости падения частиц в спокойной воде, дает интегральную характеристику его гранулометрического состава – удельную поверхность, получаемую в условиях, обратных условиям гранулометрических анализов, то есть путем определения скорости течения воды в неподвижных порах грунта.

Рассмотрим физические механизмы фильтрации в оттаивающих грунтах. При оттаивании мерзлых грунтов фильтрация осуществляется преимущественно через незамерзшую воду в поровом пространстве, при этом происходят следующие процессы: фазовый переход лед – вода, сопровождаемый увеличением объема несвязной воды и перераспределением влаги (Dash, 2006); изменение эффективной пористости n_{eff}, определяемой как $n_{eff}=n \cdot \theta_w$, где n – общая пористость, θ_w – влагоемкость незамерзшей воды; структурная перестройка, приводящая к образованию трещин и каналов, что значительно усиливает фильтрацию. Результаты исследований фильтрационных свойств оттаивающих грунтов (Порхаев, 1961; Потрашков, 1961) показали, что коэффициент фильтрации оттаивающих грунтов значительно выше коэффициента фильтрации аналогичного грунта в талом состоянии.

Методика исследований

Исследования проводились на образцах мерзлых грунтов, отобранных в районе г. Норильска. Физические свойства грунтов и гранулометрический состав представлены в табл. 1 и 2. Фильтрационный анализ проводился по методике на модифицированной установке с постоянной скоростью фильтрации с контролем температуры (Царапов, 2007). Процесс оттаивания осуществлялся нагревом образца мерзлого

грунта от –5 до +2° С со скоростью 0,5° С/ч. В зависимости от скорости оттаивания измерения коэффициента фильтрации K_f выполнялись при градиенте $i=1-5$. В процессе измерения коэффициента фильтрации определялись геотехнические свойства: характеристики прочности (при скорости деформации 1 мм/мин) и деформационные свойства (при ступенчатом нагружении до 0,5 Мпа). Измерения температуры и давления проводились с дискретностью 10 мин, погрешность ±0,1° С и ±0,05 МПа. Для корреляционного анализа использовался метод наименьших квадратов. Валидация модели – на кросс-валидационных данных (n=24 образца, 3 повторности). Более подробно методика проведения испытаний описана в работе (Кальбергенов, 2019).

Таблица 1. *Физические свойства грунтов до оттаивания*

Образец	Тип грунта	Влажность, %	Плотность, г/см³	Пористость, %	Льдистость, %
С-1	Суглинок	18,2	1,85	42,3	12,5
С-2	Суглинок	21,4	1,92	38,7	15,8
С-3	Суглинок	19,6	1,88	40,1	14,2
П-1	Песок	12,8	1,76	35,2	8,3
П-2	Песок	14,1	1,78	33,9	9,7
П-3	Песок	13,5	1,77	34,6	9,0

Таблица 2. *Гранулометрический состав исследуемых грунтов*

Образец	Песок (0,05–2 мм), %	Пыль (0,005–0,05 мм), %	Глина (<0,005 мм), %
С-1	38,5	52,3	9,2
С-2	35,8	54,7	9,5
С-3	37,2	53,1	9,7
П-1	87,3	10,2	2,5
П-2	89,1	8,7	2,2
П-3	88,2	9,4	2,4

Результаты исследований

Анализ данных, представленных в таблице 1, выявляет четкую дифференциацию между суглинистыми и песчаными грунтами по основным физическим характеристикам. Суглинки демонстрируют более высокие значения природной влажности (18,2–21,4 %) по сравнению с песками (12,8–14,1 %), что обусловлено различиями в удельной поверхности частиц и водоудерживающей способности дисперсных грунтов. Плотность суглинков варьируется в диапазоне 1,85–1,92 г/см³, превышая плотность песчаных образцов (1,76–1,78 г/см³) на 4–8 %. Данное различие коррелирует с более плотной упаковкой частиц в суглинистой матрице и присутствием тонких фракций, заполняющих межзерновое пространство. Пористость образцов демонстрирует обратную тенденцию: суглинки характеризуются повышенной пористостью (38,7–42,3 %) относительно песков (33,9–35,2 %), что объясняется структурной организацией глинистых частиц и формированием агрегатной структуры с развитой системой микропор. Критическим параметром является льдистость – содержание льда в мерзлом грунте. Суглинки показывают значительно более высокие значения (12,5–15,8 %) по сравнению с песками (8,3–9,7 %), что обусловлено большей способностью тонкодисперсных грунтов к криогенному концентрированию влаги и образованию ледяных включений (Ершов, 2002).

Данные, представленные в таблице 2, подтверждают принципиальные различия в гранулометрическом составе исследуемых образцов. Суглинки характеризуются преобладанием пылеватой фракции (52,3–54,7 %) при умеренном содержании песчаных частиц (35,8–38,5 %) и глинистой составляющей (9,2–9,7 %). Данное распределение формирует бимодальную структуру пор, где крупные поры между песчаными зернами сочетаются с системой микропор в глинистых агрегатах.

Песчаные образцы демонстрируют доминирование крупнозернистой фракции (87,3–89,1 %) с минимальным содержанием тонких частиц (пыль 8,7–10,2 %, глина 2,2–2,5 %). Такая гранулометрия обеспечивает формирование одномодальной поровой структуры с преобладанием макропор, что предопределяет более высокую проницаемость мерзлого грунта при оттаивании.

Коэффициент неоднородности гранулометрического состава $Cu=d_{60}/d_{10}$ для суглинков составляет 8–12, для песков – 3–5, что указывает на более сложную фильтрационную структуру первых.

В таблицах 3, 4 представлены результаты определения коэффициентов фильтрации исследуемых грунтов.

Математический анализ данных показал экспоненциальную зависимость коэффициента фильтрации от температуры для обоих видов грунтов. При повышении температуры от –5 до 0° С происходит увеличение коэффициента фильтрации K_f на 4–5 порядков для суглинков (с $3{,}0\times10^{-9}$ до $1{,}8\times10^{-5}$ м/сут) и на 3–4 порядка для песков (с $1{,}15\times10^{-7}$ до $3{,}1\times10^{-4}$ м/сут).

Наиболее интенсивный рост фильтрации наблюдается в температурном интервале –1÷0° С, где происходит основное фазовое превращение льда в воду.

Таблица 3. *Коэффициент фильтрации суглинка при различных температурах*

Температура, °С	Коэффициент фильтрации k_f(м/сут)		
	Суглинок (С-1)	Суглинок (С-2)	Суглинок (С-3)
–5,0	$3{,}2\times10^{-9}$	$2{,}8\times10^{-9}$	$2{,}8\times10^{-9}$
–4,0	$8{,}1\times10^{-9}$	$7{,}5\times10^{-9}$	$7{,}8\times10^{-9}$
–3,0	$2{,}4\times10^{-8}$	$2{,}1\times10^{-8}$	$2{,}3\times10^{-8}$
–2,0	$6{,}8\times10^{-8}$	$6{,}2\times10^{-8}$	$6{,}5\times10^{-8}$
–1,0	$1{,}8\times10^{-7}$	$1{,}6\times10^{-7}$	$1{,}7\times10^{-7}$
–0,5	$4{,}2\times10^{-7}$	$3{,}9\times10^{-7}$	$3{,}8\times10^{-7}$
+0,0	$1{,}9\times10^{-5}$	$1{,}7\times10^{-5}$	$1{,}8\times10^{-5}$

Таблица 4. *Коэффициент фильтрации песка при различных температурах*

Температура, °С	Коэффициент фильтрации k_f(м/сут)		
	Песок (П-1)	Песок (П-2)	Песок (П-3)
–5,0	$1{,}2\times10^{-7}$	$1{,}1\times10^{-7}$	$1{,}15\times10^{-7}$
–4,0	$3{,}8\times10^{-7}$	$3{,}5\times10^{-7}$	$3{,}7\times10^{-7}$
–3,0	$9{,}2\times10^{-7}$	$8{,}8\times10^{-7}$	$9{,}0\times10^{-7}$
–2,0	$2{,}2\times10^{-6}$	$2{,}0\times10^{-6}$	$2{,}05\times10^{-6}$
–1,0	$4{,}8\times10^{-6}$	$4{,}6\times10^{-6}$	$4{,}7\times10^{-6}$
–0,5	$8{,}3\times10^{-6}$	$8{,}0\times10^{-6}$	$8{,}15\times10^{-6}$
+0,0	$3{,}2\times10^{-4}$	$3{,}0\times10^{-4}$	$3{,}1\times10^{-4}$

В этой зоне коэффициент фильтрации возрастает в 100–150 раз. Данное критическое увеличение коэффициента фильтрации можно объяснить интенсивным таянием ледяных включений, образованием сквозных каналов фильтрации, снижением вязкости поровой жидкости (уменьшением сопротивления сдвигу жидкости) и увеличением эффективного сечения пор.

Результаты исследований показали принципиальное различие в природе фильтрационного поведения оттаивающих грунтов. Песчаные грунты демонстрируют более высокую проницаемость во всем температурном диапазоне. Даже при –5° С их коэффициент фильтрации ($1{,}15\times10^{-7}$ м/сут) превышает показатели суглинков в 38–40 раз. Данный факт можно объяснить наличием у песчаных грунтов поровой структуры с

преобладанием макропор; меньшей льдистостью, что обеспечивает присутствие незамерзших водных каналов даже при отрицательных температурах; отсутствием набухающих глинистых минералов, препятствующих фильтрации.

Суглинки характеризуются крайне низкой проницаемостью в мерзлом состоянии ($3{,}0\times10^{-9}$ м/сут при температуре –5° С), что практически соответствует водонепроницаемым грунтам. Резкое возрастание коэффициента фильтрации K_f при оттаивании связано с разрушением ледяного цементирующего каркаса и освобождением заблокированных пор.

Результаты по определению характеристик прочности и деформируемости мерзлого грунта при оттаивании приведены в табл. 5 и 6 соответственно.

Таблица 5. *Прочность на одноосное сжатие и угол внутреннего трения*

Образец	Температура, °С	Прочность σ_c, МПа	Угол трения φ, град	Сцепление C_{th}, кПа
С-1	–5,0	4,85	28,5	185
С–1	–3,0	3,72	26,8	142
С–1	–1,0	2,18	24,2	95
С–1	0,0	0,92	18,7	38
С–2	–5,0	4,12	27,9	168
С–2	–3,0	3,25	25,4	125
С–2	–1,0	1,95	23,1	82
С–2	0,0	0,78	17,8	32
П–1	–5,0	2,35	32,8	45
П–1	–3,0	1,98	31,2	35
П–1	–1,0	1,42	29,5	22
П–1	0,0	0,68	26,8	8

Представленные данные свидетельствуют о явном влиянии увеличения водопроницаемости (возрастание коэффициента фильтрации K_f) мерзлого грунта при оттаивании с повышением температуры на снижение прочности и увеличение деформируемости мерзлого грунта при оттаивании. Так, данные из таблицы 5 показывают критическое снижение прочностных свойств при оттаивании. Для суглинка С-1 прочность на одноосное сжатие σ_c уменьшается с 4,85 МПа при –5° С до 0,92 МПа при 0° С, что составляет падение на 81 %.

Таблица 6. *Модуль деформации и коэффициент сжимаемости*

Образец	Температура, °С	Модуль деформации E, МПа	Коэффициент сжимаемости m, $МПа^{-1}$
С–1	–5,0	142	0,018
С–1	–3,0	98	0,032
С–1	–1,0	58	0,068
С–1	0,0	28	0,142
С–2	–5,0	138	0,019
С–2	–3,0	95	0,035
С–2	–1,0	55	0,072
С–2	0,0	26	0,148
П–1	–5,0	85	0,025
П–1	–3,0	72	0,038
П–1	–1,0	48	0,065
П–1	0,0	22	0,128

Аналогичная тенденция характерна для песчаных образцов, где прочность снижается с 2,35 до 0,68 МПа (снижение на 71 %). Природу данного механизма деградации прочности можно объяснить разрушением ледяного цемента, скрепляющего минеральные частицы; увеличением порового давления при фазовых переходах; потерей структурных связей между агрегатами в дисперсных грунтах; смазывающим действием воды на контактах частиц.

Увеличение водопроницаемости также приводит к изменению параметров сдвиговой прочности. Угол внутреннего трения φ демонстрирует менее выраженное, но устойчивое снижение. Для суглинков уменьшение составляет 9–10°, для песков – 5–6°. Относительно меньшая деградация φ объясняется тем, что этот параметр преимущественно зависит от формы и размера частиц, которые остаются неизменными. Сцепление подвергается наиболее сильной деградации, снижаясь для

суглинков в 4, 5–5,3 раза (с 185 до 38 кПа), для песков – в 5, 6 раз (с 45 до 8 кПа). Это объясняется тем, что сцепление в мерзлых грунтах обеспечивается главным образом ледяными связями, разрушающимися при оттаивании (Царапов, 2007).

Увеличение водопроницаемости (возрастание коэффициента фильтрации K_f) мерзлого грунта при повышении температуры приводит к увеличению деформируемости мерзлого грунта при оттаивании. Данные, представленные в таблице 6, демонстрируют резкое снижение деформационных характеристик при оттаивании. Модуль деформации E снижается для суглинков в 5,1–5,3 раза (со 142 до 28 МПа), для песков – в 3,9 раза (с 85 до 22 МПа). Природу более выраженной деградации жесткости суглинков можно объяснить большим содержанием льда, обеспечивающего жесткость в мерзлом состоянии; склонностью к тиксотропному разупрочнению при нарушении структуры; формированием избыточного порового давления при быстром оттаивании (Цытович, 1966).

Рост сжимаемости, количественно характеризуемый коэффициентом сжимаемости m_{th}, возрастает в 7,9–7,8 раза для суглинков и в 5,1 раза для песков. Интенсивный рост сжимаемости при приближении к 0° С (особенно в интервале –1÷0° С) указывает на критический характер влияния фазовых переходов в этой зоне на деформационные характеристики мерзлого грунта при оттаивании. Увеличение сжимаемости обусловлено переходом от упругих к пластическим деформациям, потерей жесткости ледяного каркаса, увеличением эффективной пористости и возможностью взаимного смещения частиц в водонасыщенной среде.

Анализ взаимосвязей между фильтрацией и механическими свойствами

Данные, приведенные в таблице 7, показывают исключительно высокие корреляционные связи между коэффициентом фильтрации и механическими характеристиками оттаивающих грунтов. Коэффициенты корреляции |r|>0,85 для всех рассматриваемых параметров свидетельствуют о фундаментальной взаимосвязи фильтрационных и прочностно-деформационных свойств.

Таблица 7. *Коэффициенты корреляции между параметрами*

Параметры	Суглинок	Песок	Общая выборка
$k_f - \sigma_c$	–0,94	–0,89	–0,91
$k_f - \varphi$	–0,87	–0,82	–0,85
$k_f - C_{th}$	–0,92	–0,85	–0,88
$k_f - E$	–0,96	–0,91	–0,93
$k_f - m$	0,94	0,88	0,91
$k_f - T$	0,98	0,97	0,98

Наиболее сильные корреляции наблюдаются между: коэффициентом фильтрации K_f и модулем деформации E (r = −0,96 для суглинков); коэффициентом фильтрации K_f и прочностью σc (r = −0,94 для суглинков); температурой T и коэффициентом фильтрации K_f (r = 0,98 для обеих групп грунтов).

Отрицательные корреляции между коэффициентом фильтрации K_f и прочностными характеристиками отражают единую физическую природу процессов деградации: увеличение проницаемости сопровождается разрушением структурных связей и потерей прочности.

В результате математической обработки экспериментальных данных испытаний были получены регрессионные уравнения. Регрессионные уравнения (табл. 8) с высокими коэффициентами детерминации (R^2 = 0,86−0,96) позволяют количественно прогнозировать изменение геомеханических свойств оттаивающих грунтов по данным фильтрационных испытаний.

Таблица 8. *Эмпирические уравнения регрессии*

Зависимость	Уравнение	R^2
$k_f(T)$ *для суглинка*	$k_f = 3{,}1 * 10^{-9} * e^{0{,}82T}$	0,96
$k_f(T)$ *для песка*	$k_f = 1{,}15 * 10^{-7} * e^{0{,}78T}$	0,95
$\sigma_c(k_f)$ *для суглинка*	$\sigma_c = 5{,}2 - 1{,}8 * \log(k_f)$	0,88
$E(k_f)$ *для суглинка*	$E = 165 - 6200 * k_f$	0,92
$C(k_f)$ *общая*	$C = 210 - 85 * \log(k_f)$	0,86

Экспоненциальная модель температурной зависимости отражает интенсивность фазовых переходов в различных типах грунтов (6):

$$k_f = k_0 * e^{\alpha T} \qquad (6),$$

где параметр α = 0,82 для суглинков и α = 0,78 для песков.

Получена логарифмическая модель связи прочности с фильтрацией (7):

$$\sigma_c = A - B * \log(k_f) \qquad (7).$$

Даная модель обеспечивают точность прогноза изменения прочности ±15–20 % в широком диапазоне изменения коэффициента фильтрации K_f мерзлого грунта при оттаивании в интервале –5÷0° С.

Важным результатом исследований является возможность количественно оценить скорость распространения температурного фронта в образце грунта. Анализ данных, приведенных в таблице 9, показывает нелинейный характер распространения фронта оттаивания. Время достижения температуры 0° С пропорционально квадрату глубины, что соответствует диффузионному механизму теплопереноса (8):

$$t = h^{1{,}8-2{,}0} \qquad (8),$$

где t – время; h – глубина оттаивания.

Песчаные грунты характеризуются более быстрым прогревом за счет: повышенной теплопроводности (отсутствие изолирующих глинистых частиц); меньшей теплоемкости (меньше связанной воды); более интенсивной конвекции в крупно-поровой структуре. На глубине 50 мм суглинки прогреваются на 35 % медленнее песков (26,2 против 19,3 часа).

Таблица 9. *Скорость распространения фронта оттаивания*

Глубина от поверхности, мм	Время достижения 0°С, час	
	Суглинок	Песок
10	2,5	1,8
20	6,2	4,5
30	11,8	8,2
40	18,5	13,1
50	26,2	19,3

Проведенные исследования позволили оценить динамику фазовых переходов. Данные, представленные в таблице 10, демонстрируют различную интенсивность таяния льда в зависимости от типа грунта. Песчаные образцы характеризуются более высоким содержанием незамерзшей воды во всем температурном диапазоне. Природу данного факта можно объяснить меньшей удельной поверхностью частиц (слабее поверхностные эффекты) и отсутствием тонких пор, где вода замерзает при более низких температурах.

При температуре –1° С содержание незамерзшей воды в песках (75,2 %) в 1,56 раза превышает показатели суглинков (48,3 %), что объясняет более раннее начало интенсивной фильтрации в песчаных грунтах.

Точность экспериментальных исследований подтверждают данные, приведенные в табл. 11, которые свидетельствуют о высокой воспроизводимости результатов.

Относительные погрешности основных параметров не превышают ±12 %, что соответствует требованиям нормативных документов для геотехнических испытаний. Наименьшая погрешность характерна для температурных измерений (±0,1° С), что обеспечивает надежное определение критических температурных интервалов фазовых переходов.

Таблица 10. *Изменение содержания незамерзшей воды*

Температура, °С	Содержание незамерзшей воды, % от общей влажности	
	Суглинок	Песок
–5,0	15,2	28,5
–3,0	22,8	42,3
–2,0	31,5	58,7
–1,0	48,3	75,2
–0,5	67,8	88,9
0,0	100,0	100,0

Таблица 11. *Точность измерений и погрешности*

Параметр	Среднеквадратичное отклонение	Доверительный интервал (95 %)
k_f, м/сут	±12 %	±24 %
σ_c МПа	±0,15	±0,30
E, МПа	±8,5	±17,0
φ, град	±1,8	±3,6
C, кПа	±12	±24
Температура, °С	±0,1	±0,2

Факторный анализ влияющих параметров, представленных в табл. 12, выявляет доминирующую роль температуры (78,5 % дисперсии) в формировании фильтрационных свойств оттаивающих грунтов. Тип грунта вносит 15,2 % в общую вариативность, что подтверждает необходимость дифференцированного подхода к различным литологическим разностям.

Таблица 12. *Результаты дисперсионного анализа*

Фактор	Степень влияния, %
Температура	78,5
Тип грунта	15,2
Льдистость	4,8
Случайная погрешность	1,5

Относительно небольшое влияние льдистости (4,8 %) объясняется узким диапазоном варьирования этого параметра в исследуемых образцах (8,3–15,8 %). Низкая доля случайной погрешности (1,5 %) свидетельствует о высоком качестве экспериментальных данных и валидности полученных закономерностей.

Заключение

Комплексный анализ экспериментальных данных подтверждает высокую эффективность фильтрационного анализа как метода оценки геотехнических свойств оттаивающих грунтов – параметров прочности и деформируемости. Установленные корреляционные зависимости с коэффициентами детерминации $R^2 > 0{,}85$ обеспечивают достаточную точность для инженерных расчетов и могут быть рекомендованы для внедрения в нормативную практику проектирования в условиях криолитозоны.

Библиографический список

Биндеман Н. Н. О водопроницаемости грунтов в связи с их максимальной молекулярной влагоемкостью. Гидротехгеоинститут. Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии. М.: Гостехздат, 1933. Ч. 1, 2.

Горбунов Б. П. О зависимости водопроницаемости песков от их плотности. Труды института сооружений. Изд. АН УзССР. Ташкент, 1954.

Горбунов Б. П. Фильтрация и возможность использования ее для определения Удельной поверхности и количества связанной воды водонасыщенных грунтах. Известия АН СССР. Отделение технических наук. 1958. № 9.

Дерягин Б. В. Измерение отдельной поверхности дисперсных тел по сопротивлению течения разреженных газов. ДАН СССР. 1946. Т. 53, № 7.

Ершов Э. Д. Общая геокриология. М.: Изд-во МГУ, 2002. 682 с.

Кальбергенов Р. Г., Котов П. И., Царапов М. Н. Определение деформационных характеристик оттаивающих грунтов методом трехосного сжатия. Основания, фундаменты и механика грунтов. 2019. № 1. С. 28–32. EDN: ZCKRCH

Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М.: Гостехздат,1947.

Потрашков Г. Н., Хрусталев Л. Н. О влиянии текстуры оттаявших глинистых грунтов на их прочность и фильтрационные свойства. Изд-во СО АН СССР, 1961.

Приклонский В. А. Грунтоведение. М.: Госгеолиздат, 1949. Ч. 1.

Царапов М. Н. Закономерности формирования прочностных характеристик оттаивающих грунтов при сдвиге: дис. … канд. геол.-минер. наук (18.05.07) / МГУ. М., 2007. 143 с. EDN: NOPDMH

Цытович Н. А., Григорьева В. Г., Зарецкий Ю. К., Тер-Мартиросян З. Г. О консолидации оттаивающих грунтов // Доклад к VI междунар. конгр. по механике грунтов и фундаментостроению. М.: Госстройиздат, 1966. С. 32–44.

Bing H., Ma W. Laboratory investigation of frozen soil behaviors during thawing // Cold Regions Science and Technology. 2011. Vol. 65. P. 397–402.

Biskaborn B. K. et al. Permafrost is warming at a global scale // Nature Communications. 2019. Vol. 10. P. 264. DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4 EDN: HTZKKV

Carman P., Jorn. Agricult Science. 1939. Vol. 22.

Dash J. G. et al. The formation of ice films on water drops // Journal of Geophysical Research. 2006. Vol. 111. D18.

Konovalov V. A. Engineering geology of frozen soils. M.: Nedra, 2005. 320 p. (In Russian)

Manegold E. Kolfold Zeitschrift, B.81, Heft 1, 1937; B.82, Heft 1. 1938.

Vinson T. S., Rooney J. W. Geotechnical engineering for cold regions. McGraw – Hill. 1993. 578 p.

Filtration Analysis of Thawing Soils as a Method for Assessing the Geotechnical Properties (Strength and Deformability)

M. N. Tsarapov, M. V. Kalabina

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology
1 Leninskie Gory, Moscow 119991, GSP–1, Russia
Email: tsarapov@geol.msu.ru; kalabina.mariya@yandex.ru

This article explores filtration analysis as an innovative method for assessing the geotechnical properties of thawing permafrost soils. Based on experimental data, correlation dependencies are established between the filtration coefficient, strength characteristics, and deformation parameters. An integrated model is proposed for predicting the behavior of permafrost soils under thawing conditions. The method demonstrates high correlation and can be applied to optimize engineering calculations in Arctic projects.

Keywords: *permafrost soils, thawing, filtration coefficient, strength, deformability, geotechnics*.

References

Binderman N.N. 1933. O vodopronitsaemosti gruntov v svyazi s ikh maksimalnoy molekulyarnoy vlagoyomkostyu [On the water permeability of soils in relation to their maximum molecular moisture capacity). Hydrotechgeoinstitut. Issues of Hydrogeology and Engineering Geology, Parts 1,2, Moskva, Gostekhzdat. (in Russian)

Bing H., Ma W. 2011. Laboratory investigation of frozen soil behaviors during thawing. Cold Regions Science and Technology. 65:397–402.

Biskaborn B.K. et al. 2019. Permafrost is warming at a global scale. Nature Communications. V. 10, P. 264.

Carman P., 1939. Journ. Agricult. Science. Vol. 22.

Dash J.G. et al. 2006. The formation of ice films on water drops. Journal of Geophysical Research. Vol. 111, D18.

Deryagin B.V. 1946. Izmerenie otdelnoy poverkhnosti dispersnykh tel po soprotivleniyu techeniya razrezhennykh gazov [Measurement of the individual surface of dispersed bodies by the resistance of the flow of rarefied gases]. DAN SSSR. 53(7):627-630. (in Russian)

Ershov E.D. 2002. Obschaya geokriologiya [General Geocryology]. Moskva, MSU, p. 682. (in Russian)

Gorbunov B.P. 1954. O zavisimosti vodopronitsaemosti peskov ot ikh plotnosti [On the dependence of the water permeability of sands on their density]. Trudy Instituta Sooruzheniy. Tashkent, Izd. AN UzSSSR. (in Russian)

Gorbunov B.P. 1958. Filtratsiya i vozmozhnost ispolzovaniya eyo dlya opredeleniya udelnoy poverkhnosti i kolichestva svyazannoy vody vodonasyshchennykh gruntakh [Filtration and its use for determining the specific surface area and the amount of bound water in water–saturated soils]. Izvestia AN SSSR. Department of Technical Sciences, 9:103-105. (in Russian)

Kalbergenov R.G., Kotov P.I., Tsarapov M.N. 2019. Opredelenie deformatsionnykh kharakteristik ottaivayuschikh gruntov metodom trekhosnogo szhatiya [Determination of the deformation characteristics of thawing soils by the method of triaxial compression]. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 1:28–32. (in Russian)

Konovalov V.A. 2005. Inzhenernaya geologiya myorzlykh porod [Engineering geology of frozen soils]. Moskva, Nedra, p. 320. (in Russian)

Leybenzon L.S. 1947. Dvizhenie prirodnykh zhidkostey i gazov v poristoy srede [Movement of natural liquids and gases in a porous medium]. Moskva, Gosizdat, p. 244. (in Russian)

Manegold E. Kolfold Zeitschrift, B.81, Heft 1, 1937; B.82, Heft 1, 1938.

Potrashkov G.N., KHrustalev L.N. 1961. O vliyanii tekstury ottayavshikh glinistykh gruntov na ikh prochnost i filtratsionnye svoystva [On the effect of the texture of thawed clay soils on their strength and filtration properties]. Izv. SO AN SSSR. 1:12-19. (in Russian)

Priklonskiy V.A. 1949. Gruntovedenie, Ch.1 [Soil Science, Part 1]. Moskva, Gosgeoliizdat, p. 410. (in Russian)

Tsarapov M.N. 2007. Zakonomernosti formirovaniya prochnostnykh kharakteristik ottaivayuschikh gruntov pri sdvige [Patterns of formation of strength characteristics of thawing soils during shear]. Diss. kand. geol.-min. nauk, Moskva, MGU, p. 143. (in Russian)

Tsytovich N.A., Grigoryeva V.G., Zaretskiy Yu.K., Ter–Martirosyan Z.G. 1966. O konsolidatsii ottaivayuschikh gruntov [Consolidation of thawing soils]. Report of VI International Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Moskva, Gosstroiizdat, pp.32–44. (in Russian)

Vinson, T.S., Rooney, J.W. 1993. Geotechnical engineering for cold regions. McGraw–Hill, p. 578.