

## Почвы и грунты

## Soils and Grounds / Böden

УДК 551.340:624.131



В.И. Аксёнов



А.В. Иоспа



Д.Н. Кривов

**Аксёнов В.И. \***,  
**Иоспа А.В. \*\***,  
**Кривов Д.Н. \*\*\***,  
**Озерицкий К.В. \*\*\*\***,  
**Дорошин В.В. \*\*\*\*\***



К.В. Озерицкий



В.В. Дорошин

## Сопоставление результатов испытаний мёрзлых грунтов на одноосное сжатие при ступенчатой и постоянной нагрузках

\* Аксёнов Виктор Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, главный специалист Сектора испытаний мёрзлых грунтов ОАО «Фундаментпроект»

E-mail: simg@fundamentroekt.ru, viktor-i-aksenov@j-spacetime.com

\*\* Иоспа Андрей Викторович, начальник Сектора испытаний мёрзлых грунтов ОАО «Фундаментпроект»

E-mail: simg@fundamentroekt.ru, andrey-v-iospa@j-spacetime.com

\*\*\* Кривов Денис Николаевич, кандидат геолого-минералогических наук, руководитель группы Сектора испытаний мёрзлых грунтов ОАО «Фундаментпроект»

E-mail: simg@fundamentroekt.ru, denis-n-krivov@j-spacetime.com

\*\*\*\* Озерицкий Константин Владимирович, инженер Сектора испытаний мёрзлых грунтов ОАО «Фундаментпроект»

E-mail: simg@fundamentroekt.ru, konstantin-v-ozeritskiy@j-spacetime.com

\*\*\*\*\* Дорошин Владимир Викторович, инженер Сектора испытаний мёрзлых грунтов ОАО «Фундаментпроект»

E-mail: simg@fundamentroekt.ru, vladimir-v-doroshin@j-spacetime.com

Целью настоящей работы является сопоставление результатов испытаний образцов мёрзлых грунтов на одноосное сжатие. В работе анализируются и сопоставляются результаты одноосных испытаний мёрзлых грунтов различными методами с привлечением формул расчёта длительной прочности и её снижения с возрастанием времени.

Обработка результатов испытаний позволила получить коэффициенты перехода от кратковременной к длительной прочности мёрзлых грунтов ( $K_t$ ). Для мелких песков величина коэффициента  $K_t$  составляет около 0,8; для слабо засоленных супесей коэффициент  $K_t$  принимает значение 0,54; для влажных не засоленных суглинков  $K_t = 0,69$ ; для суглинков средне- и сильнозасоленных — от 0,29 до 0,60; для сильнольдистых глинистых грунтов  $K_t = 0,39$ . Для нельдистых плотных средне засоленных глинистых грунтов коэффициент  $K_t = 0,42$ .

**Аксёнов В.И., Иоспа А.В., Кривов Д.Н., Озерицкий К.В., Дорошин В.В. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ  
НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ ПРИ СТУПЕНЧАТОЙ И ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКАХ**

**Ключевые слова:** мёрзлые грунты, одноосное сжатие, силы смерзания, коэффициенты перехода, строительство в криолитозоне.

### **Введение**

Одним из методов определения прочности мёрзлых грунтов является испытание образцов на одноосное сжатие. При испытании серии однотипных образцов мёрзлого грунта на сжатие при различных, но постоянных для каждого образца напряжениях, превышающих предел длительной прочности, процесс неизбежно заканчивается возникновением прогрессирующего течения и последующего хрупкого или вязкого разрушения образца [Вялов и др. 1962].

Ранее С.С. Вяловым были рассмотрены 4 способа определения предела длительной прочности мёрзлых грунтов [Вялов 1959].

Первый осуществляется путём испытания серии однотипных образцов под постоянной, но разной для каждого образца нагрузкой и последующим построением кривой длительной прочности. Способ считается наиболее достоверным, однако обладает существенным недостатком — он требует большое количество однотипных образцов естественного сложения, порядка 6—8 штук. Такое требование на практике трудно осуществить, поскольку часто не удаётся подобрать даже двух идентичных образцов (они отличаются по влажности, засолённости, плотности, и т.п.).

Вместе с тем, способ этот нормирован и нашел применение в зарубежных странах, будучи включён в норматив ASTM D5520 [ASTM D5520-94 2006].

Второй способ определения предела длительной прочности позволяет производить испытания под нагрузками, возрастающими ступенями, с выдержкой до стабилизации. Этот способ узаконен и внесён в отечественные нормы [ГОСТ 12248-2010 2011], как метод испытания образцов мёрзлых грунтов на одноосное сжатие.

Третий способ определения предела длительной прочности мёрзлых грунтов применим ограниченно, т.к. в этом случае нагрузки, приложенные к образцу, необходимо выдерживать достаточно продолжительное время, иначе можно допустить ошибку при выделении стадий медленно затухающей деформации и пластического течения. Способ не нашёл широкого применения.

Четвёртый способ определения длительной прочности мёрзлых грунтов является аналитическим, позволяющим определять длительную прочность мёрзлых грунтов по результатам кратковременных испытаний. Способ нашёл широкое применение, хотя он и не нормирован. В нашей работе мы использовали этот метод для анализа и сопоставления результатов испытаний.

Целью настоящей работы является сопоставление результатов испытаний образцов мёрзлых грунтов п-ова Ямал на одноосное сжатие, выполненных в разные годы. В работе анализируются результаты испытаний мёрзлых грунтов двумя нормированными методами с привлечением формул расчёта длительной прочности и её снижения с возрастанием времени.

### **1. Физические свойства и классификационные характеристики отобранных грунтов**

Физические свойства грунтов определялись по 99-ти монолитам. В лабораторных условиях производилось определение влажности (суммарной и минеральных прослоев), плотности грунта, плотности частиц грунта, содержания органического вещества, величины засолённости и химического состава водорастворимых солей.

Коэффициент пористости определялся как суммарный коэффициент пористости мерзлого грунта по формуле А.5 в ГОСТ 25100-2011 [ГОСТ 25100-2011 2013].

Степень заполнения пор мёрзлого грунта льдом и водой рассчитывалась как суммарная степень заполнения пор и пустот мерзлого грунта льдом и незамерзшей водой (формула А.9 в ГОСТ 25100-2011).

Полученные с п-ва Ямал монолиты мёрзлых грунтов, отобранные в интервале глубин 1,0—30,0 м, представлены преимущественно мелкими и пылеватými песками, лёгкими и тяжёлыми суглинками (с преобладанием лёгких суглинков), и супесями, которые встречены по всему разрезу площадок изысканий.

По гранулометрическому составу пески мелкие, как правило, однородные: среди пылеватых песков преобладают неоднородные разновидности.

В целом в песках преобладают льдистые разновидности, в глинистых грунтах — нельдистые и слабольдистые.

Характерной особенностью исследованных мёрзлых грунтов является наличие засолённых образцов: от слабо до сильнозасолённых. Засолённость песков не превышает 0,49%, преобладают значения 0,05—0,15%; у супесей максимальная засолённость 0,29%, основной диапазон значений 0,20—0,29%; у лёгких суглинков засолённость достигает значения 1,5%, у тяжёлых суглинков — 1,8%, преобладающие значения засолённости суглинков 0,20—0,70%.

Органическое вещество в грунтах присутствует, как правило, в верхнем слое грунтовой толщи в виде примеси торфа в количестве до 31,3%. Также в разрезе присутствуют прослои и линзы торфа.

**Аксёнов В.И., Иоспа А.В., Кривов Д.Н., Озерицкий К.В., Дорошин В.В. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ ПРИ СТУПЕНЧАТОЙ И ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКАХ**

Основные физические свойства исследованных грунтов приведены в сводной **таблице 1**.

**Таблица 1**

**Физические свойства мёрзлых грунтов**

Глубина отбора образцов, м	Наименование грунта	Влажность суммарная, %	Влажность за счёт незамёрзшей воды, %	Плотность частиц грунта, г/см <sup>3</sup>	Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>	Плотность сухого грунта, г/см <sup>3</sup>	Коэффициент пористости	Степень заполнения пор льдом и незамёрзшей водой	Суммарная льдистость, д.е.	Засоленность грунта, %	Содержание органического вещества, %	Граница текучести, %	Граница раскатывания, %	Число пластичности, %	Температура начала замерзания грунта, °С
14,3	Песок мелкий	23,5	0,2	2,66	1,94	1,57	0,69	0,99	0,41	0,02	0,2	—	—	—	-0,1
9,3	Песок мелкий	22,9	0,4	2,67	1,92	1,56	0,71	0,95	0,39	0,10	—	—	—	—	-0,3
27,0	Песок пылеватый	24,2	3,3	2,65	1,91	1,54	0,72	0,96	0,36	0,34	0,8	—	—	—	-1,0
2,8	Песок пылеватый	18,3	0,2	2,63	2,02	1,71	0,54	0,98	0,34	0,08	—	—	—	—	-0,5
27,4	Супесь	24,9	5,1	2,71	1,93	1,55	0,75	0,97	0,34	0,21	—	21,8	17,4	4,4	-0,3
6,3	Супесь	23,7	5,1	2,64	1,97	1,59	0,66	1,00	0,33	0,27	—	20,5	14,9	5,6	-1,2
3,6	Супесь	178,2	5,1	2,65	1,15	0,41	5,41	0,96	0,80	0,59	3,1	22,3	15,4	6,9	-0,2
20,1	Суглинок лёгкий	12,8	5,5	2,68	2,06	1,83	0,47	0,78	0,15	0,54	1,9	21,6	12,0	9,6	-3,2
4,5	Суглинок лёгкий	29,6	7,4	2,63	1,90	1,47	0,79	1,00	0,36	0,69	2,4	26,3	16,3	10	-2,0
4,3	Суглинок тяжёлый	31,5	10,4	2,65	1,84	1,40	0,89	1,00	0,33	1,52	4,1	35,1	20,3	14,8	-3,9
7,3	Суглинок тяжёлый с примесью торфа	31,5	14,1	2,57	1,81	1,38	0,87	0,99	0,27	1,03	6,5	42,6	28,0	14,6	-1,8

**2. Методика испытаний мёрзлых грунтов на одноосное сжатие**

**2.1. Разделка монолитов и изготовление образцов**

Для проведения испытаний мёрзлых грунтов на одноосное сжатие было привлечено около 100 монолитов из которых было изготовлено 136 образцов

Все монолиты находились в твёрдомерзлом состоянии. Нарушений в упаковке при транспортировке не обнаружено.

Монолиты были предварительно рассортированы и помещены на хранение в морозильные лари при температуре минус 20 °С. Всего за время испытаний было выполнено 9 распилов монолитов, примерно по 10 — 15 штук в партии.

Для распиловки монолитов мерзлых грунтов применялась универсальная настольная пила GTS-125G.

Одновременно при распиловке монолитов (диаметр ~12 см, длина ~35 см) отпиливались блоки грунта для лабораторных определений физических свойств, температуры начала замерзания, а также других характеристик (влажности, засоленности и т.д.).

Для одноосного сжатия высота блоков составляла ~12 см, а поперечное сечение около 5×5 см<sup>2</sup>. Учитывая необходимость испытывать близкие по свойствам образцы в серии, их требовалось как можно большее количество, поэтому из одного монолита выпиливалось иногда до 4-х блоков.

Подготовленные блоки грунта заносились в камеру подготовки образцов с температурой около минус 3°С, где грунты выдерживались не менее суток.

Образец мерзлого грунта вырезают при помощи кольца пробоотборника. Перед изготовлением образца кольца—пробоотборники нумеруют, взвешивают, замеряют их высоту и внутренний диаметр, смазывают с внутренней стороны тонким слоем технического вазелина, охлаждают и устанавливают кольцо режущим краем на зачищенную поверхность основания грунтового блока.

Изготовление образца мерзлого грунта ненарушенного сложения производилось в следующем порядке:

- при помощи нагрузочного винта вырезного пресса кольцо—пробоотборник слегка вдавливают в грунт;
- постепенно легким надавливанием штампом пресса на кольцо—пробоотборник срезается грунт;
- с помощью толкателя извлекают образец из пробоотборника;
- проверяют взаимную параллельность оснований торцов образца,
- образец грунта взвешивается с погрешностью не более 0,01 г для образцов массой до 400 г, и не более 1 г — для образцов с большей массой.

Подготовленный образец грунта герметизируется (изо-паролентой, полиэтиленовой пленкой, и т.д.).

Подготовленные к испытаниям образцы грунта допускается хранить не более 10 суток.

Непосредственно перед испытанием образцы грунта выдерживались не менее 24 ч при постоянной отрицательной температуре, соответствующей температуре, установленной для испытаний.

Аксёнов В.И., Иоспа А.В., Кривов Д.Н., Озерицкий К.В., Дорошин В.В. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ ПРИ СТУПЕНЧАТОЙ И ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКАХ

## 2.2. Одноосное сжатие со ступенчатым нагружением

Испытание мерзлого грунта методом одноосного сжатия со ступенчатым нагружением позволяет определять условно-мгновенное значение предела прочности  $\sigma_0$ , предельно длительное значение предела прочности  $\sigma_{дл}$ , модуль линейной деформации  $E$ , коэффициент вязкости сильнольдистых грунтов  $\eta$ , и другие коэффициенты деформации.

Эти характеристики определяют по результатам нагружения образцов грунта вертикальной нагрузкой в условиях бокового расширения с доведением образца до хрупкого разрушения или достижения незатухающей ползучести. Для испытаний используют образцы мерзлого грунта ненарушенного сложения с природной влажностью и льдистостью. К образцу плавно прикладывают нагрузку, увеличивая ее равными ступенями нагружения. Время приложения нагрузки на каждой ступени не должно превышать 30 секунд [ГОСТ 12248-2010 2011].

Продолжительность действия каждой ступени нагружения должна составлять 24 часа, длительность ступени может быть увеличена до 48 часов и более (например, при испытании льдистых, заторфованных или засоленных образцов грунта).

Процесс деформирования образца, переходящего в стадию незатухающей ползучести, или достижение им относительной продольной деформации, составляющей 0,2 от его высоты, считают завершением испытания.

Для обеспечения постоянства осевого напряжения в образце отечественные нормативные документы рекомендуют на каждой ступени нагружения дополнительно увеличивать нагрузку при увеличении площади образца на 3% с момента начала испытания [ГОСТ 12248-2010 2011].

По результатам испытаний образца мерзлого грунта на ползучесть определяют предельно—длительное значение предела прочности на одноосное сжатие.

## 2.3. Одноосное сжатие с постоянной нагрузкой

В практике испытаний мерзлых грунтов на одноосное сжатие предусматривается два методических подхода: испытание грунта на прочность и на ползучесть.

Отечественные нормативные документы, в частности, ГОСТ 12248-2010, рекомендуют определять предельно—длительную прочность по испытаниям на одноосное сжатие с нагружением образца ступенями. Кроме того, испытание на ползучесть рекомендовано для определения коэффициента вязкости сильнольдистых грунтов.

Международный норматив ASTM D5520-94 рекомендует проводить испытание мерзлых образцов грунта на ползучесть с нагружением образца постоянной нагрузкой в течение всего срока испытаний [ASTM D5520-94 2006].

На первом этапе методикой предусматривается проведение испытаний при быстром воздействии нагрузки для получения значения  $q$  — кратковременной прочности на одноосное сжатие при постоянной осевой скорости деформации 1 %/мин ( $0,01 \text{ мин}^{-1}$ ). Наше оборудование позволяет определять кратковременную прочность с постоянной осевой скоростью и достигать разрушения или сжатия образца за 7—10 мин.

Для всех выделенных инженерно—геологических элементов проведены испытания по определению кратковременной прочности на 3-х — 6-ти близких по свойствам образцах.

На следующем этапе подбиралось требуемое количество близких по свойствам мерзлых образцов. На этих образцах проводились испытания с постоянной нагрузкой, составляющей от  $0,7q$  до  $0,1q$  (или иногда  $0,05q$ ) от кратковременной прочности на одноосное сжатие. К образцу прикладывалась осевая нагрузка без ударов в течении 20 с. Дальше поддерживалась постоянная нагрузка для постоянного сжатия в течении всего времени испытания (рис. 1). Длительность таких опытов составляла от нескольких минут до 2—15 суток. Длительность некоторых опытов доходила до 30 суток и более.

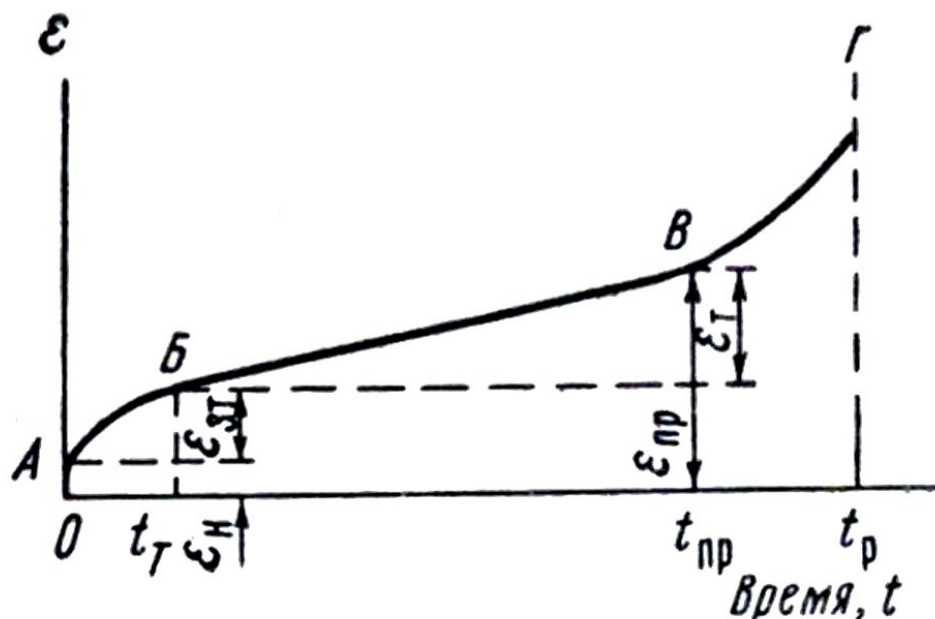


Рис. 1. Кривая незатухающей ползучести

**Аксёнов В.И., Иоспа А.В., Кривов Д.Н., Озерицкий К.В., Дорошин В.В. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ ПРИ СТУПЕНЧАТОЙ И ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКАХ**

ASTM D5520 рекомендует в процессе испытания поддерживать постоянную удельную нагрузку на образец, увеличивая общую нагрузку пропорционально увеличению площади сечения образца. По завершению опыта в ряде случаев определялась минимальная скорость деформации ( $m$ ) и время для этой нагрузки ( $t_m$ ). Эти данные использовались для построения предварительной кривой длительной прочности [Вялов и др. 1966] в интервале времени до 10 суток. Это позволяет более надёжно подобрать значение постоянной нагрузки для последующих опытов.

Недостатком такой методики является сложность в подборке идентичных образцов, т.е. с близкими физическими характеристиками. В пределах длины монолита (около 35 см) не всегда сохраняется однородность грунта. В нашей практике встречались случаи, когда в образце высотой 10 см верхняя и нижняя часть отличались по влажности и засолённости почти в 2 раза. Итогом такого испытания было деформирование (разрушение) одной части образца и искажение результатов всего опыта.

**2.4. Оборудование и приборы для испытания образцов мерзлого грунта на одноосное сжатие**

Испытания одноосным сжатием мерзлых грунтов по методике ASTM 5520 отличаются от таковых в принятом в РФ ГОСТ 12248-2010. Однако измеряемые параметры при проведении испытаний одинаковы, как и пределы их измерения и требуемая точность измерений [ГОСТ 12248-2010 2011].

Исходя из этого, испытания проводились на оборудовании, созданном для испытаний по ГОСТ 12248-2010, с необходимой корректировкой методики проведения испытаний и обработки результатов испытаний.

Испытания проводились в морозильных камерах, поддерживающих температуру с точностью  $\pm 0,25^\circ\text{C}$  при температуре минус  $4^\circ\text{C}$ . В одной морозильной камере проводилось одновременно до 26 испытаний.

Испытания проведены с помощью установок АКР и ИУ-12, входящие в измерительную электронную систему KroiLab [Аксёнов и др. 2014]. Параметры системы АКР ИЭС KroiLab указаны в **таблицах 2 и 3**.

**Таблица 2**

**Основные технические характеристики устройства АКР**

	<b>Наименование основных параметров</b>	<b>Норма</b>
1	Передаваемое усилие	от 100 Н до 6,5 кН
2	Пределы допускаемой приведенной погрешности измерения нагрузки	5%
3	Пределы измерения температуры	от $25^\circ\text{C}$ до минус $10^\circ\text{C}$
4	Пределы допускаемой погрешности измерения температуры	$0,1^\circ\text{C}$
5	Пределы измерения линейного перемещения (деформации образца)	0,0—20,0 мм
6	Пределы допускаемой приведенной погрешности измерения перемещения	$\pm 0,003$ мм
7	Способ задания нагрузки	пневматический

**Таблица 3**

**Основные технические характеристики устройства ИУ-12**

	<b>Наименование основных параметров</b>	<b>Норма</b>
1	Передаваемое усилие	от 600 Н до 22 кН
2	Пределы допускаемой приведенной погрешности измерения нагрузки	5%
3	Пределы измерения температуры	от $25^\circ\text{C}$ до минус $10^\circ\text{C}$
4	Пределы допускаемой погрешности измерения температуры	$0,1^\circ\text{C}$
5	Пределы измерения линейного перемещения (деформации образца)	0,0—50,0 мм
6	Пределы допускаемой приведенной погрешности измерения перемещения	$\pm 0,004$ мм
7	Способ задания нагрузки	пневматический

Испытания проводились с учетом увеличения площади сечения образца. Компенсация нагрузки при увеличении площади сечения образца задавалась по достижении приращения площади сечения образца на каждые 3%.

Процедура обработки результатов испытаний также максимально автоматизирована и позволяет получать паспорта испытаний в соответствии с требованиями ASTM 5520 и ГОСТ 12248-2010.

Аксёнов В.И., Иоспа А.В., Кривов Д.Н., Озерицкий К.В., Дорошин В.В. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ ПРИ СТУПЕНЧАТОЙ И ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКАХ

### 3. Результаты испытаний мёрзлых грунтов на одноосное сжатие

#### 3.1. Определение длительной прочности по результатам построения реологических кривых

Характерной особенностью мерзлых грунтов является снижение их прочности во времени, происходящее от условно-мгновенного  $\sigma_0$  до предельно-длительного  $\sigma_{дл}$ , при котором не возникает прогрессирующее течение и не наступает разрушение.

Представляет практический интерес по данным испытаний средней продолжительности дать прогноз длительной прочности и деформации мёрзлых грунтов на периоды времени, сопоставимые со сроком службы сооружений.

Закономерность изменения прочности мерзлого грунта в зависимости от времени воздействия постоянной нагрузки описывается известным уравнением [Вялов 1959]

$$\sigma(t) = \beta / \ln(t/B), \quad (1)$$

где  $\beta$  (МПа) и  $B$  (час) — определяемые из опыта параметры, зависящие от типа грунта и его температуры;  $t$  — время до разрушения; в практических расчетах часто принимают  $t = 50$  лет ( $4,38 \times 10^{-5}$  час) [ГОСТ 12248-2010 2011]. Интенсивность снижения длительной прочности при увеличении времени действия нагрузки оценивается параметром  $B$ .

Выражение (1) широко используется в практике инженерного мерзлотоведения для определения прочностных показателей мёрзлых грунтов (сопротивление сжатию, сдвигу, растяжению, эквивалентного сцепления).

Для определения параметров  $\beta$  и  $B$  строится диаграмма ( $1/\sigma$  —  $\ln t$ ) (рис. 2). Для твердомёрзлых грунтов такие диаграммы линейны. Котангенс угла наклона полученных прямых равен параметру  $\beta$ , а отрезок, отсекаемый на оси абсцисс, равен  $\ln B$  [Методы определения... 1995].

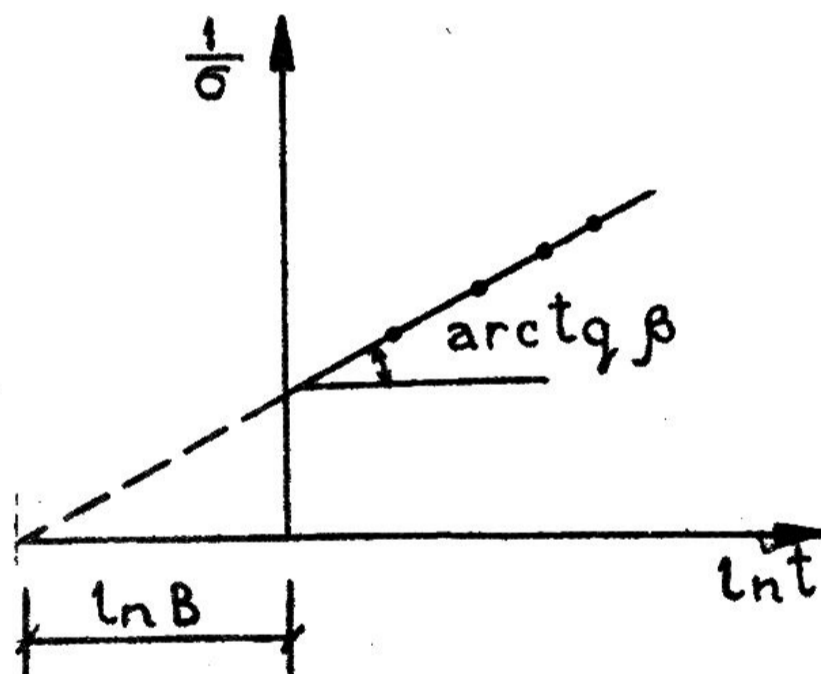


Рис. 2. Обработка опытных данных для определения параметров уравнения длительной прочности

По результатам испытаний образца мерзлого грунта на ползучесть (ступенчатое нагружение) предельно-длительное значение предела прочности на одноосное сжатие определяют по формуле

$$\sigma_{он} = K_t \times \sigma_{он}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{он}$  — напряжение в образце на ступени предшествующей переходу в стадию незатухающей ползучести,  $K_t$  — безразмерный коэффициент, зависящий от продолжительности ступени.

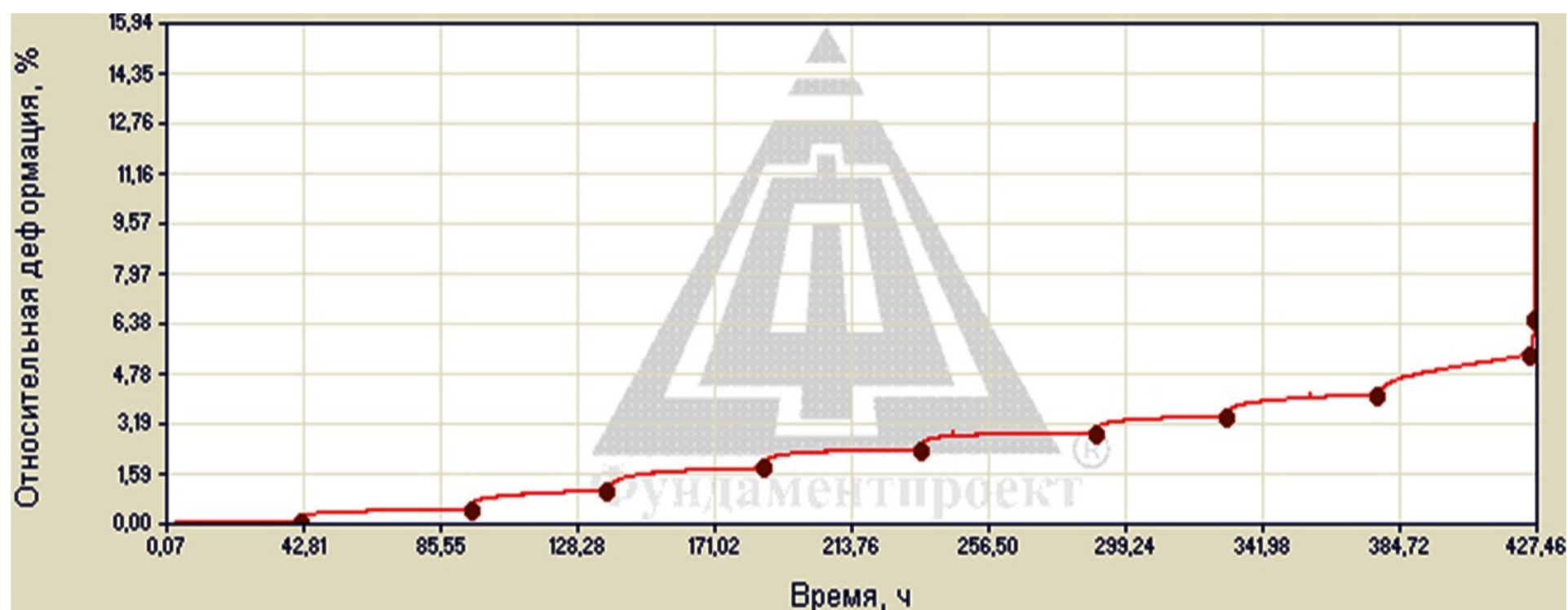
Некоторые исследователи увязывают этот коэффициент  $K_t$  с параметром  $B$ . Так, по данным А. С. Герасимова, параметр  $B$  для разных грунтов колеблется от 0,3 час до  $10^{-8}$  час и характеризует интенсивность снижения прочности при возрастании длительности действия нагрузки [Герасимов 1978]. Показателем этого снижения может служить отношение значений прочности для различных значений времени, например, для отношения 50-летней прочности к 24-часовой. Параметр  $B$  зависит от вида грунта, плотности, его состава, температуры. Наиболее заметно на величину  $B$  влияет льдистость грунта и его вязкопластические свойства, с повышением которых происходит увеличение  $B$  и уменьшение  $\sigma_{дл}$ . Наибольшей интенсивностью снижения прочности обладают льды, сильнольдистые и засоленные мёрзлые грунты, характеризующиеся заметными вязкопластическими свойствами. Наименьшая интенсивность наблюдается у мало льдистых и плотных грунтов, реологические свойства которых выражены слабо. Эта интенсивность практически не зависит от вида напряжённого состояния [Вялов и др. 1981].

**Аксёнов В.И., Иоспа А.В., Кривов Д.Н., Озерицкий К.В., Дорошин В.В. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ ПРИ СТУПЕНЧАТОЙ И ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКАХ**

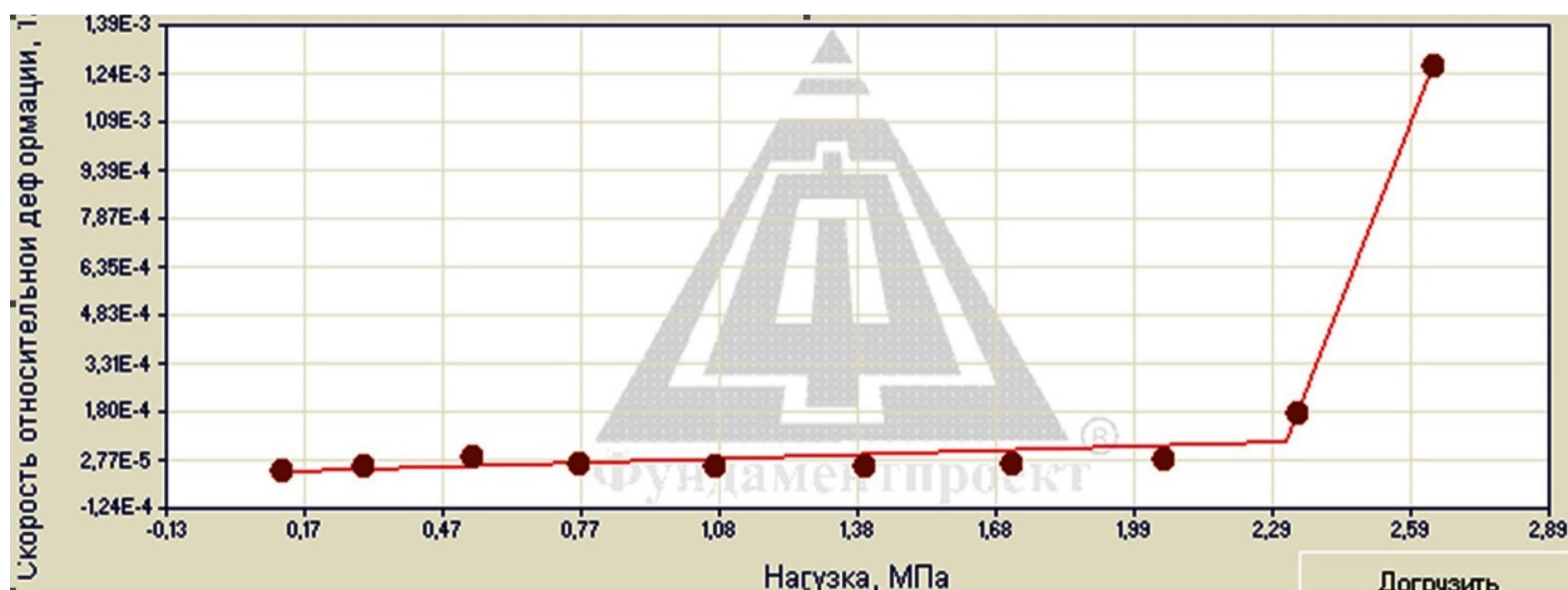
При расчете предельно-длительного значения предела прочности на одноосное сжатие нормативы рекомендуют вводить коэффициент 0,6, что может соответствовать длительности ступени 24 часа [ГОСТ 12248-2010 2011]. Делались и другие предложения по величине этого коэффициента. Так, при продолжительности ступени, равной 48 часам рекомендовалось принимать  $K_t = 0,65$ , а продолжительности ступени, равной 72 часам — вводить  $K_t = 0,7$ . Однако в научной литературе отсутствуют какие-либо обоснования для их назначения.

В настоящей работе нами предпринята попытка определить величину коэффициента  $K_t$  для различных видов мёрзлых грунтов при фиксированной температуре; в данном случае — при температуре минус 4°C. С этой целью нами сопоставлены величины предельно длительной прочности  $\sigma_{дл}$ , вычисленных по формуле (1) из опытов с постоянной нагрузкой, с опытными величинами  $\sigma_{оп}$ , полученными из испытаний со ступенчатым нагружением для грунтов одного и того же инженерно-геологического элемента (при длительности ступени равной двум суткам).

Обработка результатов, полученных при испытаниях грунта ступенчатым нагружением, представлена диаграммах ( $\sigma - t$ ) и ( $\epsilon - t$ ) на **рис. 3**. Там же, на **рис. 3б** показана ломаная кривая зависимости скорости относительной деформации от нагрузки, по которой и определялась из опыта величина прочности  $\sigma_{оп}$ . Предельно-длительная прочность определяется в соответствии с рекомендациями ГОСТ 12248-2010 путём умножения опытной прочности на коэффициент 0,6 (при продолжительности 24 час, либо 0,65, как в нашем случае при продолжительности ступени 48 час.).



а – кривая ползучести

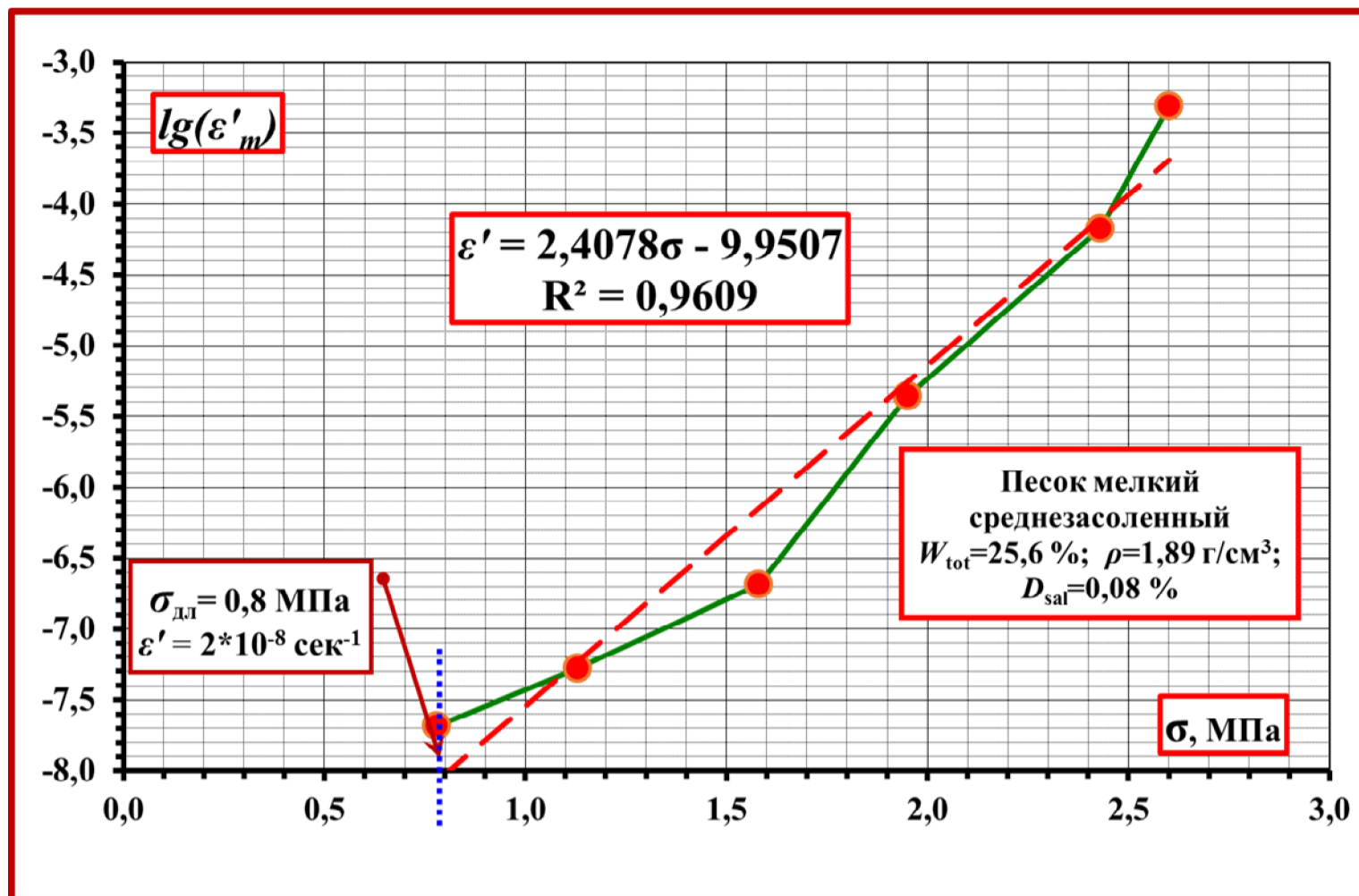


б – реологическая кривая

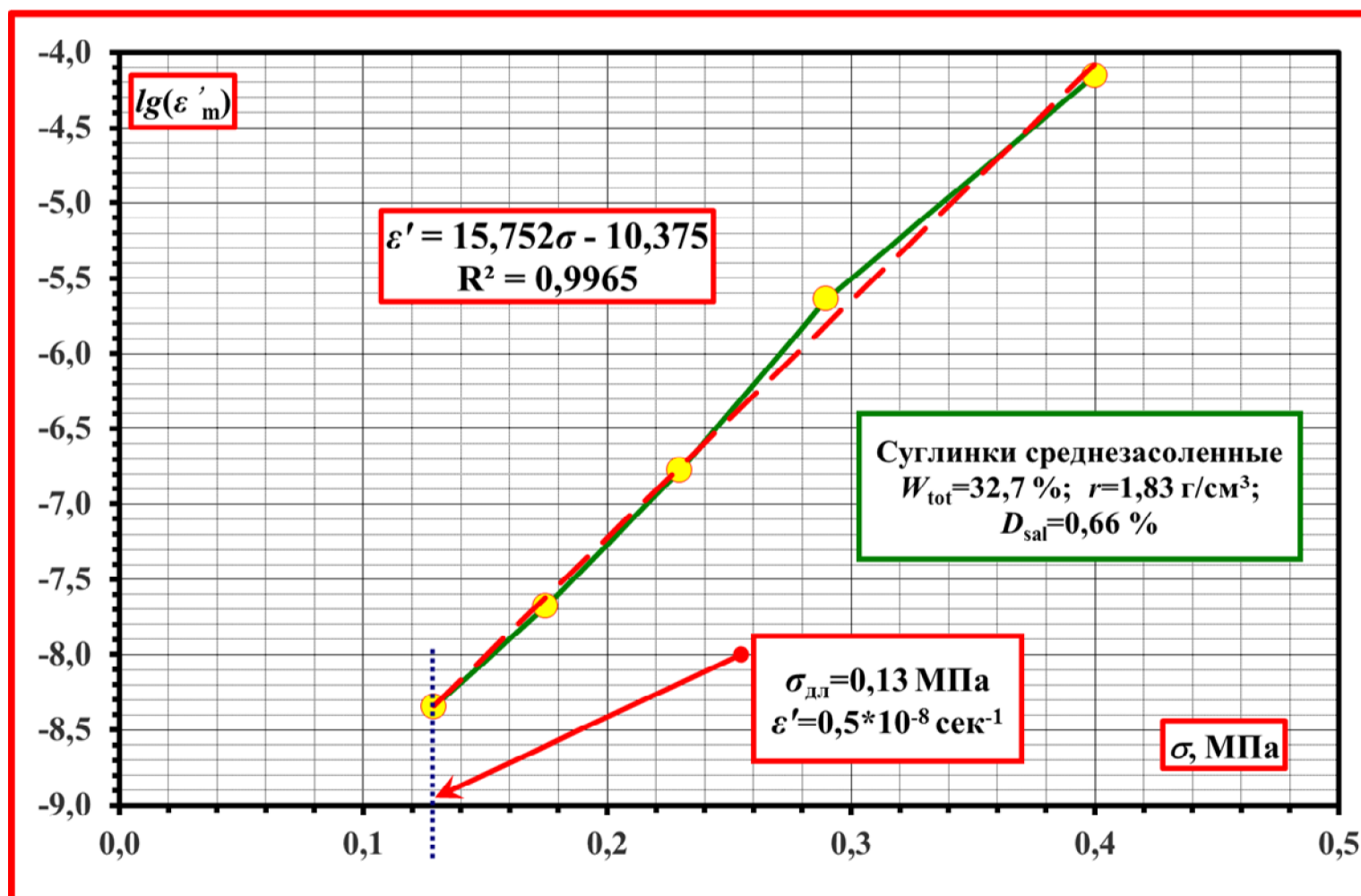
**Рис. 3.** Одноосное сжатие со ступенчатым нагружением. Супесь слабозасоленная  $W = 12,5\%$ ;  $\rho = 2,17\text{г/см}^3$ ;  $D_{sal} = 0,26\%$ ;  $T = -4\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\sigma_{оп} = 2,32\text{ МПа}$ ,  $\sigma_{дл} = 1,508\text{ МПа}$

Данные испытаний с постоянной нагрузкой позволяют также построить зависимость скорости относительной деформации от нагрузки (**рис. 4**) и по ней определить величину длительной прочности  $\sigma_{дл}$ . (при скоростях деформации  $\dot{\epsilon}$  в пределах от  $n \times 10^{-7}$  до  $n \times 10^{-9}\text{ сек}^{-1}$ ).

Аксёнов В.И., Иоспа А.В., Кривов Д.Н., Озерицкий К.В., Дорошин В.В. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ ПРИ СТУПЕНЧАТОЙ И ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКАХ



а



б

Рис. 4. Определение величины длительной прочности  $\sigma_{дл}$  по кривой зависимости скорости относительной деформации  $\dot{\epsilon}$  от нагрузки

Результаты обработки данных испытаний мёрзлых грунтов на одноосное сжатие двумя методами сведены в **табл. 4**. Сопоставление величин  $\sigma_{дл}/\sigma_{оп}$  предполагает получение некоторого коэффициента. Здесь  $\sigma_{оп}$  определена из испытаний ступенчатым нагружением и к ней не введён понижающий коэффициент, а  $\sigma_{дл}$  получена из опытов с постоянной нагрузкой. Предельно длительная величина прочности  $\sigma_{дл}$  определена как наибольшее напряжение, при котором еще не возникает прогрессирующее течение и не наступает разрушение.



Аксёнов В.И., Иоспа А.В., Кривов Д.Н., Озерицкий К.В., Дорошин В.В. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ  
НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ ПРИ СТУПЕНЧАТОЙ И ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКАХ

Таблица 4

Сопоставление результатов испытаний мёрзлых образцов  
на одноосное сжатие двумя методами

Наименование грунта	Влажность, W%	Плотность, $\rho$ г/см <sup>3</sup>	Засоленность $D_{sal}$ , %	Содержание орг. в-ва, %	Прочность из опыта $\sigma_{оп}$ ( $\dot{\epsilon} - \sigma$ ), МПа	Прочность длительная $\sigma_{дл}$ , МПа ( $K=0,65$ )	Прочность, длительная $\sigma_{дл}$ , МПа ( $\sigma_{оп} - t$ )	$\sigma_{дл}$ МПа ( $1/\sigma - \ln t$ )	$K_t$ при $t_{lim} = 50$ лет $\sigma_{дл}/\sigma_{оп}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Опыты со ступенчатым нагружением</b>									
Песок мелкий	<u>25,7–29,8</u> 27,6(4)	<u>1,83–1,93</u> 1,89(4)	<u>0,02–0,04</u> 0,03(4)	0,2	<u>0,84–1,92</u> 1,43(4)	<u>0,54–1,25</u> 0,93(4)	–	–	–
<b>Опыты с постоянной нагрузкой</b>									
Песок мелкий	<u>23,6–28,3</u> 25,4(24)	<u>1,82–1,92</u> 1,90(24)	<u>0,01–0,05</u> 0,03(24)	0,2	1,1 $\dot{\epsilon} \sim n \times 10^{-8}$	$K_t = \sigma_{оп} / \sigma_m$ $= 1,1 / 1,43 = 0,77$	1,90	1,28	0,89
<b>Опыты со ступенчатым нагружением</b>									
Пески мелкие (пылеватые) слабозасоленные	<u>22,2–28,6</u> 25,0(4)	<u>1,83–1,94</u> 1,91(4)	<u>0,03–0,15</u> 0,10(4)	0,6	<u>0,49–1,0</u> 0,84(4)	<u>0,32–0,65</u> 0,52(4)	–	–	–
<b>Опыты с постоянной нагрузкой</b>									
Пески мелкие (пылеватые) слабозасоленные	<u>22,9–29,6</u> 25,6(16)	<u>1,82–1,94</u> 1,89(16)	<u>0,04–0,15</u> 0,08(16)	0,4	0,7 $\dot{\epsilon} \sim n \times 10^{-8}$	$K_t = \sigma_{оп} / \sigma_m$ $= 0,70 / 0,84 = 0,83$	0,75	0,78	0,92
<b>Опыты со ступенчатым нагружением</b>									
Супеси слабозасоленные	<u>15,7–21,6</u> 18,7(2)	<u>1,99–2,12</u> 2,06(2)	<u>0,18–0,24</u> 0,21(2)	1,5	<u>0,92–1,50</u> 1,21	<u>0,6–0,98</u> 0,79(2)	–	–	–
<b>Опыты с постоянной нагрузкой</b>									
Супеси слабозасоленные	<u>19,5–24,9</u> 22,2(7)	<u>1,91–2,14</u> 2,0(7)	<u>0,2–0,27</u> 0,22(7)	2,0	0,8 $\dot{\epsilon} \sim n \times 10^{-8}$	$K_t = \sigma_{оп} / \sigma_m$ $= 0,8 / 1,21 = 0,66$	0,6	0,55	0,45
<b>Опыты со ступенчатым нагружением</b>									
Суглинки нелидистые среднезасоленные	<u>13,1–16,6</u> 14,7(12)	<u>1,99–2,23</u> 2,11(12)	<u>0,3–0,73</u> 0,43(12)	2,5	<u>0,3–0,75</u> 0,56(12)	<u>0,21–0,49</u> 0,44(12)	–	–	–
<b>Опыты с постоянной нагрузкой</b>									
Суглинки нелидистые среднезасоленные	<u>12,3–22,8</u> 14,8(13)	<u>1,85–2,18</u> 2,06(13)	<u>0,35–0,65</u> 0,48(13)	2,2	0,2 $\dot{\epsilon} \sim n \times 10^{-7}$	$K_t = \sigma_{оп} / \sigma_m$ $= 0,2 / 0,56 = 0,36$	0,43	0,08	0,46
<b>Опыты со ступенчатым нагружением</b>									
Суглинки сильнозасоленные с органич.в-вом	<u>28,5–57,0</u> 38,0(5)	<u>1,51–1,92</u> 1,76(5)	<u>0,48–2,10</u> 1,26(5)	5,0	<u>0,1–0,24</u> 0,14(5)	<u>0,05–0,16</u> 0,09	–	–	–
<b>Опыты с постоянной нагрузкой</b>									
Суглинки сильнозасоленные с органич.в-вом	<u>31,5–63,3</u> 47,7(10)	<u>1,43–1,88</u> 1,69(10)	<u>1,09–1,50</u> 1,22(10)	6,5	0,02 $\dot{\epsilon} \sim n \times 10^{-9}$	$K_t = \sigma_{оп} / \sigma_m$ $= 0,02 / 0,14 = 0,14$	0,07	0,19	–
<b>Опыты со ступенчатым нагружением</b>									
Суглинки (супеси) сильнольдистые	120,8	1,22	0,19	7,8	0,62	0,40	–	–	–
<b>Опыты с постоянной нагрузкой</b>									
Суглинки (супеси) сильнольдистые	<u>75–178,2</u> 121,7(14)	<u>0,88–1,41</u> 1,22(14)	<u>0,06–0,27</u> 0,13(14)	4,4	0,18 $\dot{\epsilon} \sim n \times 10^{-8}$	$K_t = \sigma_{оп} / \sigma_m$ $= 0,18 / 0,62 = 0,29$	0,27	0,27	0,44
<b>Опыты со ступенчатым нагружением</b>									
Суглинки среднезасоленные	<u>28,5–28,7</u> 28,6(2)	<u>1,85–1,92</u> 1,89(2)	<u>0,71–0,93</u> 0,82(2)	3,0	<u>0,16–0,28</u> 0,22(2)	<u>0,10–0,6</u> 0,08(2)	–	–	–
<b>Опыты с постоянной нагрузкой</b>									
Суглинки среднезасоленные	<u>27,5–42,1</u> 32,7(16)	<u>1,70–1,92</u> 1,83(16)	<u>0,47–0,89</u> 0,66(16)	2,8	0,095 $\dot{\epsilon} \sim n \times 10^{-8}$	$K_t = \sigma_{оп} / \sigma_m$ $= 0,095 / 0,22 = 0,43$	0,15	0,15	0,68
<b>Опыты со ступенчатым нагружением</b>									
Суглинки незасоленные с органич.в-вом	<u>30,3–44,8</u> 39,1(3)	<u>1,64–1,70</u> 1,67(3)	<u>0,07–0,10</u> 0,08(3)	3,5	<u>0,90–2,17</u> 1,47(3)	<u>0,59–1,41</u> 0,96(3)	–	–	–
<b>Опыты с постоянной нагрузкой</b>									
Суглинки незасоленные с органич.в-вом	<u>38,3–41,0</u> 40,0(11)	<u>1,74–1,77</u> 1,75(11)	0	0,0	0,95 $\dot{\epsilon} \sim n \times 10^{-7}$	$K_t = \sigma_{оп} / \sigma_m$ $= 0,95 / 1,47 = 0,65$	0,95	1,15	0,78

**Аксёнов В.И., Иоспа А.В., Кривов Д.Н., Озерицкий К.В., Дорошин В.В. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ ПРИ СТУПЕНЧАТОЙ И ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКАХ**

Ещё один способ обработки опытных данных позволяет по результатам испытаний средней продолжительности прогнозировать длительную прочность (с привлечением соотношения (1) и опытных данных по схеме, показанной на рис. 2). Обработка опытных данных тремя способами позволила получить средние относительные величины, которые, по нашему мнению, можно считать коэффициентом  $K_t$ . В табл. 5 приведены коэффициенты перехода от кратковременной к длительной прочности мёрзлых грунтов по результатам испытаний, нормированные и прогнозные, при температуре минус 4 °С.

**Таблица 5**

**Коэффициенты перехода от кратковременной к длительной прочности мёрзлых грунтов при температуре минус 4°С**

№ Пп.	Наименование грунта	$\sigma_{оп}$ МПа	$\sigma_{дл} (K_t^1)$ МПа ( $\sigma_{оп} - t$ )	$\sigma_{оп} (K_t^2)$ МПа $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$	$\sigma_{оп} (K_t^3)$ МПа ( $1/\dot{\epsilon} - \ln t$ )	$K_t^1$ опытный	$K_t^2$	$K_t^3$ прогнозный	$K_t$ средний рекомендуемый	$K_t$ нормируемый
1	Пески мелкие	1,43	1,9	0,93	1,1	—	0,77	0,89	0,83	0,65
2	Пески мелкие (пылеватые) слабозасолённые	0,84	0,75	0,7	0,7	0,89	0,83	0,92	0,88	0,65
3	Супеси слабозасолённые	1,21	0,6	0,8	0,8	0,5	0,66	0,45	0,54	0,65
4	Суглинки нельдистые средnezасолённые	0,56	0,43	0,2	0,2	0,77	0,36	0,14	0,42	0,65
5	Суглинки сильнозасолённые с органич. в-вом	0,14	0,07	0,02	0,02	0,5	0,14	0,034	0,29	0,65
6	Суглинки (супеси) сильнольдистые	0,62	0,27	0,18	0,18	0,44	0,29	0,44	0,39	0,65
7	Суглинки средnezасолённые	0,22	0,15	0,095	0,095	0,68	0,43	0,68	0,6	0,65
8	Суглинки незасолённые с органич. в-вом	1,47	0,95	0,95	0,95	0,64	0,64	0,78	0,69	0,65

Так, для мелких песков величина коэффициента  $K_t$  составляет около 0,8; для супесей слабо засолённых коэффициент  $K_t$  принимает значение 0,54; для суглинков влажных не засолённых  $K_t = 0,69$ ; для суглинков средне- и сильнозасолённых — от 0,29 до 0,60; для сильнольдистых глинистых грунтов  $K_t = 0,39$ .

В особую группу выделяются специфические нельдистые плотные средне засолённые глинистые грунты («сухари»). Длительная прочность у этих грунтов определяется приблизительно, а коэффициент  $K_t = 0,42$ . Вероятно для обработки результатов испытаний таких грунтов следует подбирать другие уравнения длительной прочности.

Все приведенные результаты получены для наиболее распространённых мёрзлых грунтов п-ова Ямал при температуре минус 4 °С. Дальнейшие исследования в этом направлении позволят получить коэффициенты перехода и для других температур.

**3.2. Определение длительной прочности мерзлых грунтов по кривым ползучести**

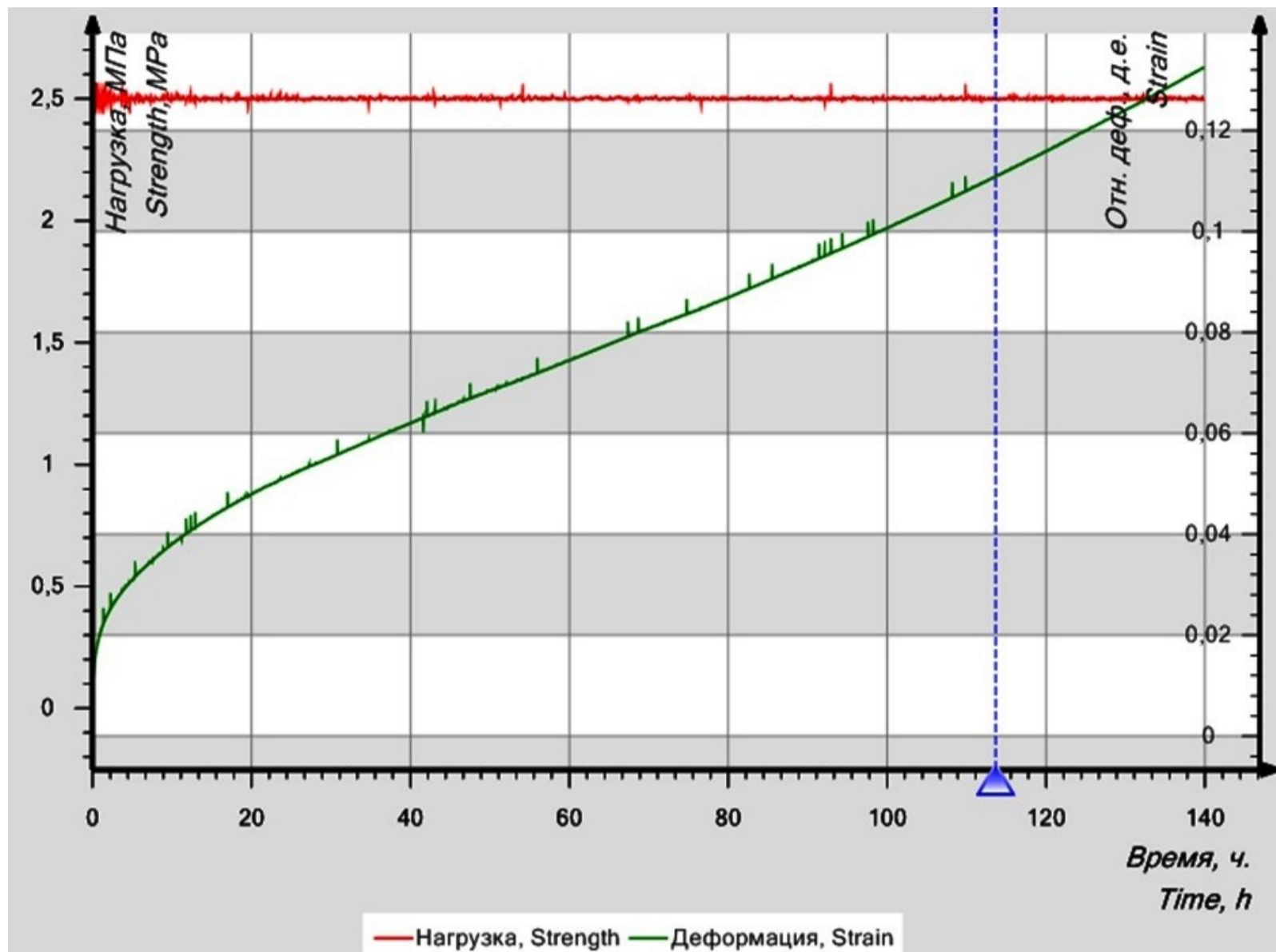
Обработка результатов испытаний мерзлых грунтов по кривым ползучести выполнялась в соответствии с методикой, составленной в Секторе испытаний мёрзлых грунтов ОАО «Фундаментпроект». В этой методике были актуализированы рекомендации ASTM D5520-94 и установлено соответствие с программным комплексом измерительной электронной системы Kriolab.

Трёхшаговая схема обработки позволяла на первом шаге получить информацию об испытании, включающую кривые нагрузки и деформации (кривые ползучести), данные о свойствах грунта. При этом кривая нагрузок строилась с учетом поправок на увеличения площади образца.

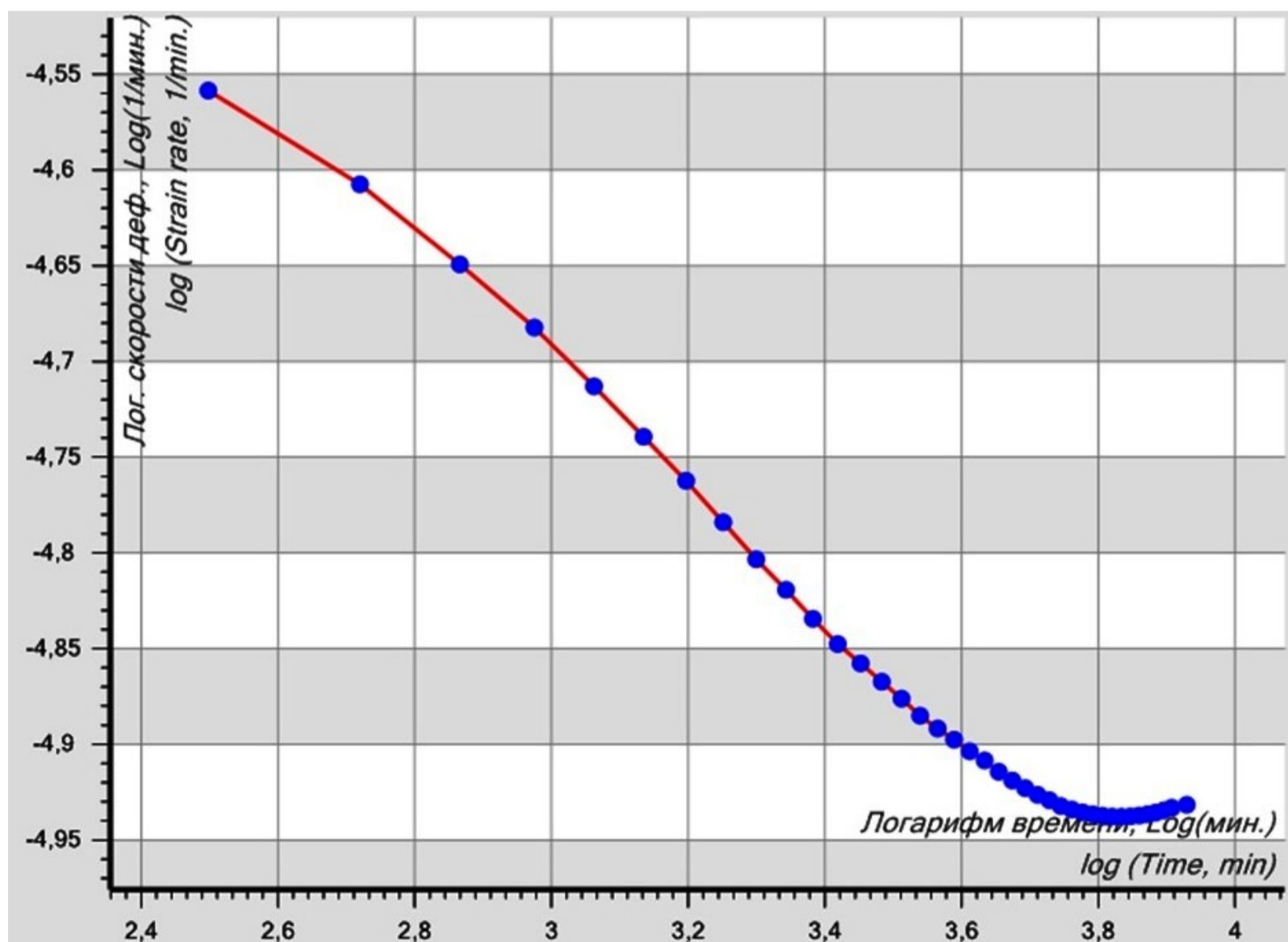
На шаге 2 реализовалась возможность корректировки испытания (обрезка, склейка и т.п.).

Шаг 3 иллюстрирует кривую изменения скорости во времени в логарифмических координатах, что позволяет определить  $t_{min}$  (мин); минимальную скорость  $m$  (1/мин),  $\sigma_{оп}$  (МПа) (рис. 5)

Аксёнов В.И., Иоспа А.В., Кривов Д.Н., Озерицкий К.В., Дорошин В.В. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ ПРИ СТУПЕНЧАТОЙ И ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКАХ



а — кривая ползучести



б — минимальная скорость деформации

Рис. 5. Одноосное сжатие с постоянной нагрузкой. Песок мелкий.  
 $W=24,5\%$ ;  $\rho=1,91\text{ г/см}^3$ ;  $D_{sal}=0,01\%$ ;  $T=-4\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\sigma=2,50\text{ МПа}$ ;  $m=1,15\cdot 10^{-5}\text{ мин}^{-1}$ ;  $t_{min}=6820,15\text{ мин}$ .

Аксёнов В.И., Иоспа А.В., Кривов Д.Н., Озерицкий К.В., Дорошин В.В. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ ПРИ СТУПЕНЧАТОЙ И ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКАХ

По результатам обработки единичных опытов строится кривая длительной прочности, с которой снимается величина  $\sigma_{дл}$  (рис. 6).

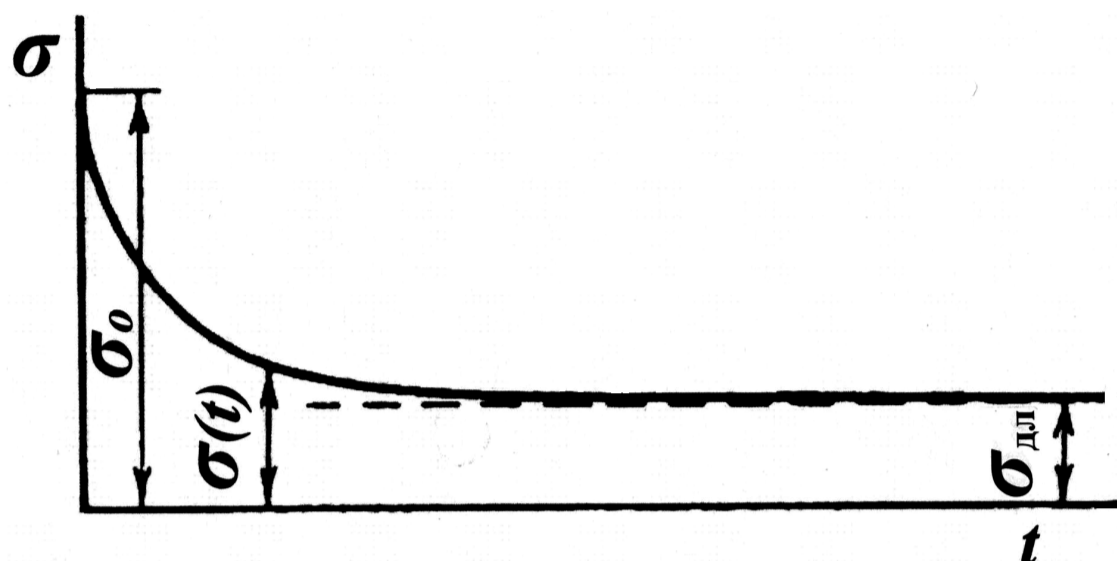


Рис. 6. Кривая длительной прочности, построенная по результатам обработки единичных опытов.

Совокупность кривых изменения скорости деформации во времени позволяет построить кривые ползучести в логарифмических координатах, где для каждой нагрузки  $\sigma_{оп}$  (МПа) отмечается минимальная скорость  $m$  ( $\text{мин}^{-1}$ ).

На стадии установившегося пластично-вязкого течения связь напряжения и скорости деформации мёрзлого грунта в большинстве случаев описывается степенной зависимостью [Вялов и др. 1962]:

$$\dot{\epsilon} = k\sigma^n.$$

В 60-х — 70-х гг. XX в. некоторые канадские и американские исследователи [Odqvist 1966; Nixon, McRoberts 1976] предложили свою формулу для описания закономерности деформирования мёрзлого грунта, где вместо параметра « $k$ » (под которым С.С. Вялов понимал коэффициент вязкости мёрзлых грунтов, изменяющийся с изменением напряжения) вводится параметр « $B$ », характеризующий свойства мёрзлого грунта, зависящие от влажности, засоленности, температуры:

$$\dot{\epsilon} = B\sigma^n,$$

где  $n$  — реологический показатель.

Модификация этого выражения позволила зарубежным авторам предложить свою формулу для расчета скорости деформации (осадки) свай [Cavanagh et al. 2012]

$$\dot{\epsilon}_{pile} = 3^{\left(\frac{n+1}{2}\right)} \cdot \frac{a \cdot B \cdot \sigma^n}{n-1}, \quad (3)$$

где  $\dot{\epsilon}_{pile}$  — скорость осадки свай, м/год;  $a$  — радиус свай, м. Параметры « $B$ » и « $n$ » определяются из опытов на одноосное сжатие.

Выполненные нами испытания мёрзлых грунтов на ползучесть позволяют на основании полученных данных построить диаграммы зависимости нагрузки  $\sigma$  в логарифмических координатах от минимальной скорости относительной деформации,  $m$  ( $\text{сек}^{-1}$ ) и определить по ним параметры « $B$ » и « $n$ ». Результаты определения этих параметров для некоторых исследованных нами видов грунтов представлены в табл.6. В эту же таблицу внесены данные, представленные в упомянутой выше работе П.Каванага и его соавторов [Cavanagh et al. 2012].

Таблица 6

Параметры « $B$ » и « $n$ », полученные из опытов на одноосное сжатие при температуре минус 4 °С

Авторы	Грунты		
P. Cavanagh et al. (2012)	Пески мелкие	Илистые(п/пыл)	Суглинистые
	$B=1 \times 10^{-1}$ , кПа <sup>n</sup> /год $n = 4,0$	$B=5 \times 10^{-7}$ , кПа <sup>n</sup> /год $n = 4,0$	$B=3 \times 10^{-8}$ , кПа <sup>n</sup> /год $n = 2,0(2,3)$
Аксёнов В.И. и др. (2014)	Пески мелкие слабозасоленные	Суглинки сильнозасоленные	Суглинки тяжелые сильнольдистые
	$B = (0,3-2,4) \times 10^{-10}$ , кПа <sup>n</sup> /год $n = 1,8$	$B = 0,7 \times 10^{-2}$ , кПа <sup>n</sup> /год $n = 3,0$	$B = (0,6-1,8) \times 10^{-4}$ , кПа <sup>n</sup> /год $n = 3,6-4,0$

Как показывает табл. 6, величины параметров « $B$ » и « $n$ », определенные для мёрзлых грунтов одной территории (п-ов Ямал) из испытаний на одноосное сжатие с постоянной нагрузкой, имеют существенный разброс. Реологический па-

**Аксёнов В.И., Иоспа А.В., Кривов Д.Н., Озерицкий К.В., Дорошин В.В. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ  
НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ ПРИ СТУПЕНЧАТОЙ И ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКАХ**

раметр « $n$ » по двум источниками изменяется примерно от 2 до 5, другой параметр « $B$ », зависящий от свойств грунтов (влажности, засоленности, плотности) изменяет свой показатель степени от 2 до 11.

Наши эксперименты показали, что нельзя не принимать в расчёт силы смерзания грунта с боковой поверхностью сваи, устанавливаемой в мерзлой толще, — как это предлагают иностранные специалисты [Nixon, McRoberts 1976]. Такой подход является недостаточным и неверным, поскольку силы смерзания по боковой поверхности сваи составляют до 80% от несущей способности сваи. Замена несущей способности сваи (состоящей из сопротивления грунта под торцом сваи и смерзания по её боковой поверхности) на параметры из испытаний образцов на одноосное сжатие также недопустима, поскольку схемы работы грунта под действием нормальной нагрузки (одноосное сжатие) и сдвиговой (смерзание) различны.

### Заключение

Сопоставление результатов испытания мёрзлых грунтов на одноосное сжатие двумя методами показало следующее.

1. Метод испытания образцов с постоянной, но разной для каждого образца нагрузкой является наиболее достоверным и информативным. Данный метод позволяет, помимо мгновенной длительной прочности, определить также параметры для расчёта прогнозной прочности (до 50 лет), деформационных характеристик, при длительности опытов от нескольких часов до 10 и более суток. Однако этот метод обладает существенным недостатком — он требует большого количества однотипных образцов естественного сложения. Такое требование на практике трудно осуществить, поскольку часто не удаётся подобрать даже два идентичных образца.

Второй метод предусматривает испытание на одном образце при ступенчато возрастающей нагрузке, постоянной на каждой ступени. Кривые ползучести строятся методом суперпозиции. Метод экономичен и дешёв. Он также позволяет определить полный набор характеристик прочности, деформируемости, вязкости грунта (принят в РФ в качестве основного [ГОСТ 12248-2010 2011]).

2. Выбранные для сопоставления мёрзлые грунты достаточно близки по основным своим физическим свойствам. Так, например, у мелких незасоленных песков влажность у сопоставляемых грунтов находится в пределах 25,4—27,5%; плотность 1,89—1,90 г/см<sup>3</sup>; засоленность 0,03—0,04%. Также в узком диапазоне изменений находятся физические свойства и у сопоставляемых глинистых грунтов влажность находится в пределах 28,6—32,7%; плотность 1,83—1,89 г/см<sup>3</sup>; засоленность 0,66—0,82%. Такие малые изменения физических свойств мёрзлых грунтов предполагают получение достаточно достоверных величин прочности.

3. По результатам сопоставления величин прочности испытанных мёрзлых грунтов определены коэффициенты перехода для расчёта длительной прочности по результатам более коротких испытаний (**табл. 5**).

4. Из испытаний образцов на одноосное сжатие с постоянной нагрузкой определены параметры « $B$ » и « $n$ » используемые в формуле (3) для расчёта скорости деформации (осадки) сваи. В настоящей статье мы приводим сводную таблицу, в которой представлены эти параметры (**табл. 6**). Результаты наших экспериментов показывают, что использование реологического параметров « $n$ » и « $B$ » для расчёта осадки сваи (а, следовательно, и несущей способности сваи), как это предлагают иностранные специалисты, является недостаточным и неверным. Причина этого в том, что несущая способность основания вертикально нагруженной одиночной сваи состоит из расчётного сопротивления под торцом сваи и расчётного сопротивления мёрзлого грунта сдвигу по боковой поверхности смерзания сваи [см., например, Свод правил СП 25.13330.2012 2012], которое может составлять до 80% от суммарной несущей способности сваи. Схемы работы грунта под действием нормальной нагрузки (одноосное сжатие) и сдвиговой (смерзание) различаются между собой. Поэтому и скорости деформирования мёрзлого грунта, а значит, и осадки сваи в обоих указанных случаях также будут существенно различаться.

### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 12248-2010. Межгосударственный стандарт. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: Стандартинформ, 2011. 78 с.
2. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2013. 36 с.
3. СП 25.13330.2012. Свод правил. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: Минрегион России, 2012. 118 с.
4. Аксёнов В.И., Геворкян С.Г., Иоспа А.В., Кривов Д.Н., Шмелёв И.В., Спиридонов С.И. Особенности работы винтовых свай в мёрзлых грунтах // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2014. № 4. С. 25—30.
5. Вялов С.С. Реологические свойства и несущая способность мёрзлых грунтов. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 191 с.
6. Вялов С.С., Городецкий С.Э., Ермаков В.Ф. и др. Методика определения характеристик ползучести, длительной прочности и сжимаемости мёрзлых грунтов. М.: Наука, 1966. 131 с.

**Аксёнов В.И., Иоспа А.В., Кривов Д.Н., Озерицкий К.В., Дорошин В.В. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ ПРИ СТУПЕНЧАТОЙ И ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКАХ**

7. Вялов С.С., Гмошинский В.Г., Городецкий С.Э. и др. Прочность и ползучесть мёрзлых грунтов и расчёты ледогрунтовых ограждений. М: Изд-во АН СССР, 1962. 254 с.
8. Вялов С.С., Зарецкий Ю.К., Городецкий С.Э. Расчёты на прочность и ползучесть при искусственном замораживании грунтов. Л.: Стройиздат, 1981. 200 с.
9. Герасимов А.С. Некоторые особенности определения длительной прочности мёрзлых грунтов по данным кратковременных испытаний // Основания и фундаменты жилых и общественных зданий на вечномёрзлых грунтах. Сборник научных трудов. Л.: ЛенЗНИИЭП, 1978. С. 22 – 27.
10. Методы определения механических свойств мёрзлых грунтов. М.: Изд-во МГУ, 1995. 170 с.
11. Aksenov V.I., Afonin A.P. "Determination of the Saline Creep Parameters in Yamal Peninsula." *Proceeding of the Sixth International Offshore and Engineering Conference (Los Angeles, California, USA, May 26 – 31, 1996)*. Golden, Colorado: ISOPE Publisher, 1996, volume 1, pp. 444 – 449.
12. ASTM D5520-94. Standard Test Method for Laboratory Determination of Creep Properties of Frozen Soil Samples by Uniaxial Compression. Philadelphia: ASTM International Publisher, 2006. 9 p.
13. Cavanagh P., Spencer K., Tchekhovski A., Aksenov V. "Influence of Physical Properties on Frozen Soil Creep Parameters and Foundation Design." *Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost (Salekhard, Yamal-Nenets Autonomous, Russia, June 25 – 29, 2012)*. Volume 1: International Contributions. Salekhard: Northern Publisher, 2012, pp. 67 – 72.
14. Nixon J.F., McRoberts E.C. "A Design Approach for Pile Foundations in Permafrost." *Canadian Geotechnical Journal* 13.1 (1976): 40 – 57.
15. Odqvist F.K.G. *Mathematical Theory of Creep and Creep Rupture*. Oxford Mathematical Monographs. Oxford: Clarendon Press. 1966. 210 p.

Цитирование по ГОСТ Р 7.0.11–2011:

Аксёнов, В. И., Иоспа, А. В., Кривов, Д. Н., Озерицкий, К. В., Дорошин, В. В. Сопоставление результатов испытаний мёрзлых грунтов на одноосное сжатие при ступенчатой и постоянной нагрузках [Электронный ресурс] / В.И. Аксёнов, А.В. Иоспа, Д.Н. Кривов, К.В. Озерицкий, В.В. Дорошин // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. — 2016. — Т. 11. — Вып. 1: Система планета Земля. — Стационарный сетевой адрес: 2227-9490e-aprov\_e-ast11-1.2016.44.

## **COMPARISON OF RESULTS OF FROZEN SOILS TESTS IN UNIAXIAL COMPRESSION WITH STEP AND WITH CONSTANT LOADS**

Viktor I. Aksenov, Sc.D. (Engineering), Senior Researcher, Chief Specialist at FOUNDAMENTPROJEKT OJSC (Moscow)  
E-mail: simg@fundamentroekt.ru, viktor-i-aksenov@j-spacetime.com

Andrey V. Iospa, M.Eng., Head of Frozen Soils Tests Sector at FOUNDAMENTPROJEKT OJSC (Moscow)  
E-mail: simg@fundamentroekt.ru, andrey-v-iospa@j-spacetime.com

Denis N. Krivov, M.Eng., Sc.D (Geology and Mineralogy), Head of Group at Frozen Soils Tests Sector, FOUNDAMENTPROJEKT OJSC (Moscow)  
E-mail: simg@fundamentroekt.ru, denis-n-krivov@j-spacetime.com

Konstantin V. Ozeritsky, M.Eng., Engineer at FOUNDAMENTPROJEKT OJSC (Moscow)  
E-mail: simg@fundamentroekt.ru, konstantin-v-ozेरitsky@j-spacetime.com

Vladimir V. Doroshin, M.Eng., Engineer at FOUNDAMENTPROJEKT OJSC (Moscow)  
E-mail: simg@fundamentroekt.ru, vladimir-v-doroshin@j-spacetime.com

One of the methods for determining the strength of frozen soils is the testing of samples on uniaxial compression.

When a series of similar samples of frozen soil is subjected to compression at different, but constant for each sample voltages exceeding the long-term strength, the process inevitably results in the emergence of a progressive course and subse-

**АКСЁНОВ В.И., ИОСПА А.В., КРИВОВ Д.Н., ОЗЕРИЦКИЙ К.В., ДОРОШИН В.В. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ  
НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ ПРИ СТУПЕНЧАТОЙ И ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКАХ**

quent brittle or viscous destruction of the sample.

The aim of our work is to compare the results of tests on samples of frozen soils on uniaxial compression. We examine and compare results of uniaxial tests frozen soils of different methods involving calculation formulas of long-term strength and decrease with the increase of time.

We carried out tests in freezing chambers, maintaining temperature with high accuracy of  $\pm 0.25^\circ\text{C}$  at a temperature of minus  $4^\circ\text{C}$ . We determined physical properties of the soils for the 99 monoliths that are soil samples. In laboratory conditions, we carried out determination of dry density of soil density of soil particles, organic matter content, values of the salinity and chemical composition of water-soluble salts.

Monoliths of frozen soils from Yamal Peninsula were collected in the depth interval of 1.0—30.0 m, which is predominantly shallow and silty sands, light and heavy loam (with a predominance of light loam and sandy loam, which met throughout the section of the survey sites.

By granulometric composition, sands are small and homogeneous; among silty sands the heterogeneous varieties are dominated.

In general, ice-rich varieties are dominated in the sands, and not-icy and slightly icy are dominated in the clay soils.

We investigated characteristic feature of frozen soils in the presence of saline samples varied between weakly and strongly saline. Salinity of the sands does not exceed 0.49%, and it dominated in the values of 0.05—0.15%; sandy clay has maximum salinity of 0.29%, the principal value range 0.20—0.29%; salinity of the light loam reaches values of 1.5%, salinity of the loamy clay reaches values of 1.8%, the prevailing values of salinity of the loams are 0.20—0.70%.

Organic matter in soils is present, usually in the upper layer of soil massif in the form of an admixture of peat in the amount to 31.3%, also in the context of the present interlayers and lenses of peat.

Processing of results enabled to obtain the coefficients of the transition from short-term to long-term strength of frozen soils ( $K_t$ ). For fine sands, value factor  $K_t$  is about 0.8; for weakly saline, loam factor  $K_t$  takes the value of 0.54; for non-wet saline, loam  $K_t = 0.69$ ; for loam medium and strongly saline, this characteristic vary from 0.29 to 0.60; for selenologist clay soils,  $K_t = 0.39$ . For non-icy dense medium saline clay soils, factor  $K_t = 0.42$ .

We obtained all the results for the most common frozen soils from Yamal Peninsula at minus  $4^\circ\text{C}$ . Further research in this direction will allow calculating the transfer factors for other temperatures.

Our experiments have shown it is necessary to take into account the forces of the soil freezing with the lateral surface of the pile, set in the frozen thicker, since the strength of freezing on the side of the pile up to 80% of the bearing capacity of the pile. Replacement of the bearing capacity of piles (consisting of ground resistance under the end of the piles and freezing on its side surface) on the parameters of test samples for uniaxial compression is also invalid, because the schema of the soil under the action of a normal load (uniaxial compression) and shear (freezing) different.

**Keywords:** frozen soils, uniaxial compression, the forces of freezing, the coefficients of the transition, construction in the permafrost zone.

**References:**

1. Aksenov V.I., Afonin A.P. "Determination of the Saline Creep Parameters in Yamal Peninsula." *Proceeding of the Sixth International Offshore and Engineering Conference (Los Angeles, California, USA, May 26 – 31, 1996)*. Golden, Colorado: ISOPE Publisher, 1996, volume 1, pp. 444 – 449.
2. Aksenov V.I., Gevorkyan S.G., Iospa A.V., Krivov D.N., Shmelev I.V., Spiridonov S.I. "Features of Work of Screw Piles into Frozen Soils." *Soil Mechanics and Foundation Engineering* 4 (2014): 25 – 30. (In Russian).
3. *ASTM D5520-94. Standart Test Method for Laboratory Determination of Creep Properties of Frozen Soil Samples by Uniaxial Compression*. Philadelphia: ASTM International Publisher, 2006, 9 p.
4. Cavanagh P., Spencer K., Tchekhovski A., et al. "Influence of Physical Properties on Frozen Soil Creep Parameters and Foundation Design." *Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost (Salekhard, Yamal-Nenets Autonomous, Russia, June 25-29, 2012)*. Volume 1: International Contributions. Salekhard: Northern Publisher, 2012, pp. 67 – 72.
5. Gerasimov A.S. "Some Features of Definition of Long-Term Strength of Frozen Soils According to Short-Term Tests." *Bases and Foundations of Residential and Public Buildings on Permafrost*. Collection of scientific works. Leningrad: LenZNIIEP Publisher, 1978, pp.22 – 27. (In Russian).
6. *Methods of Determination of Mechanical Properties of Frozen Soils* Moscow: Moscow University Publishing House, 1995. 170 p. (In Russian).
7. Nixon J.F., McRoberts E.C. "A Design Approach for Pile Foundations in Permafrost." *Canadian Geotechnical Journal* 13.1 (1976): 40 – 57.

**АКСЁНОВ В.И., ИОСПА А.В., КРИВОВ Д.Н., ОЗЕРИЦКИЙ К.В., ДОРОШИН В.В. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ  
НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ ПРИ СТУПЕНЧАТОЙ И ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКАХ**

8. Odqvist F.K.G. *Mathematical Theory of Creep and Creep Rupture*. Oxford Mathematical Monographs. Oxford: Clarendon Press, 1966. 210 p.
9. *Set of Rules SP 25.13330.2012. Bases and Foundations on Permafrost*. Moscow: Ministry Of Regional Development Publisher, 2012. 118 p. (In Russian).
10. *State Standard GOST 12248-2010. Interstate Standard. The Soils. Laboratory Methods for Determining the Strength and Deformability*. Moscow: Standartinform Publisher, 2011, 78 p. (In Russian).
11. *State Standard GOST 25100-2011. The Soils. Classification*. Moscow: Standartinform Publisher, 2013. 36 p. (In Russian).
12. Vyalov S.S. *Rheological Properties and Load-Carrying Capacity of Frozen Soils*. Moscow: USSR Academy of Sciences Publisher, 1959, 191 p. (In Russian).
13. Vyalov S.S., Gmshinskiy V.G., Gorodetskiy S.E. *Strength and Creep of Frozen Ground and the Calculations of the Ladgroove Fences*. Moscow: USSR Academy of Sciences Publisher, 1962, 254 p. (In Russian).
14. Vyalov S.S., Gorodetskiy S.E., Ermakov V.F. *Methods of Determining Characteristics of Creep, Long-Term Strength and Compressibility of Frozen Soils*. Moscow: Nauka Publisher, 1966, 131 p. (In Russian).
15. Vyalov S.S., Zaretsky Yu.K., Gorodetskiy S.E. *Calculations on Strength and Creep under Artificial Freezing of Soils*. Leningrad: Stroyizdat Publisher, 1981, 200 p. (In Russian).

**Cite MLA 7:**

Aksenov, V. I., A. V. Iospa, D. N. Krivov, K. V. Ozeritsky, and V. V. Doroshin. "Comparison of Results of Frozen Soils Tests in Uniaxial Compression with Step and with Constant Loads." *Electronic Scientific Edition Almanac Space and Time:* 11.1 ('The Earth Planet System') (2016). Web. <2227-9490e-aprov\_r\_e-ast11-1.2016.44>. (In Russian).