

УДК 551.321.7:551.342:551.578.465



Геворкян С.Г.

Значения критических коэффициентов интенсивности напряжений мёрзлых грунтов естественного сложения

Геворкян Сергей Георгиевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ОАО «Фундаментпроект»
E-mail: Sergev99@yandex.ru

В настоящей статье приводятся результаты впервые выполненных экспериментальных определений величин критических коэффициентов интенсивности напряжений K_{Ic} для мёрзлых грунтов естественного сложения при различной влажности¹ и при различных отрицательных температурах.

Ключевые слова: разрушение, морозобойные трещины, мёрзлые грунты, естественное сложение, коэффициент интенсивности напряжений.

Введение

Морозобойное, или криогенное, растрескивание массивов мёрзлых грунтов и обусловленные им полигональные формы рельефа широко развиты как в области распространения многолетнемёрзлых пород, так и в районах глубокого сезонного промерзания грунтовых толщ. Этот процесс, вызванный температурным сокращением массива мёрзлого грунта² вследствие его охлаждения, зачастую является причиной повреждения фундаментов зданий, подземных хранилищ, полотна автомобильных дорог, откосов железнодорожных выемок и насыпей, земляных дамб и плотин, аэродромных покрытий, трубопроводов, кабелей связи и других линейных сооружений.

Морозобойные трещины часто предопределяют основные черты развития форм рельефа, благоприятствуют эрозионным и оползневым явлениям, способствуют глубокому промерзанию грунта и неравномерному распределению влаги в нём, изменяя гидротермический режим почв. Повторножильные льды, формирующиеся в морозобойных трещинах, при последующем их протаивании могут привести к активному термокарсту, либо к образованию оврагов, угрожающим устойчивости различных сооружений.

Таким образом, необходимость изучения закономерностей морозобойного растрескивания грунтов тесно связана как с воздействием этого процесса на различные инженерные сооружения, так и с той важной рельефообразующей функцией, которую он выполняет в природе.

Особенно интенсивно морозобойное растрескивание проявляется в климатических условиях Крайнего Севера. Здесь глубина криогенных трещин составляет от 1 до 12 м, расстояние между ними (ширина полигонов) – от 3 до 40 м, ширина раскрытия поверху – от 0,2 до 5 см.

Причиной образования морозобойных трещин являются механические напряжения, которые развиваются в массиве мёрзлого грунта при «температурном ударе», то есть при резком понижении температуры на дневной поверхности³. Трещинообразование в первоначально сплошном (без трещин) массиве происходит, когда напряжения в нём достигают предела прочности мёрзлого грунта на разрыв⁴. Дальнейший рост морозобойной трещины вглубь мёрзлой толщи определяется величиной концентрации напряжений в вершине трещины.

¹ Следует различать влажность и льдистость мёрзлого грунта. Суммарную влажность мёрзлого грунта определяют отношением массы всех видов содержащихся в нём воды и льда (в прослойках и порах) к массе высушенного грунта. Относительная льдистость мерзлого грунта равна отношению массы содержащегося в нём льда к массе всей воды, содержащейся в мёрзлом грунте (вся вода в порах мёрзлого грунта не замерзает, в них всегда содержится строго определённое, зависящее как от температуры мёрзлого грунта, так и от его вида, количество незамёрзшей воды). (См.: Цытович Н.А. Механика мёрзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 446 с.).

² По определению, мёрзлый грунт – это грунт, который находится при отрицательной температуре и содержит лёд. (См.: Цытович Н.А. Указ. соч.).

³ Как известно, «тела при охлаждении сжимаются» (т.е. сокращаются в объёме). Мёрзлые грунты не являются здесь исключением. Поэтому, физической основой образования и роста морозобойных трещин являются температурные деформации и напряжения, развивающиеся в мёрзлом грунте при резком понижении его температуры и приводящие, в конечном счёте, к образованию разрывов в первоначально сплошном массиве. Разумеется, всё это имеет место только в диапазоне отрицательных температур.

⁴ Гречищев С.Е., Чистотин Л.В., Шур Ю.Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. М.: Недра, 1980. 384 с.; Григорян С.С., Красс М.С., Гусева Е.В., Геворкян С.Г. Количественная теория геокриологического прогноза. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. 268 с.

Одной из важнейших характеристик напряжённого состояния в окрестности вершины трещины является коэффициент интенсивности напряжений (КИН). Если у двух тел с трещинами одинаковые значения коэффициента интенсивности напряжений, то напряжённые состояния в окрестностях вершин трещин будут в обоих случаях одинаковыми. Согласно критерию Гриффитса-Ирвина, развитие трещины начнётся, если коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины достигнет некоторой критической величины¹. Эта величина является физической константой материала и называется критическим коэффициентом интенсивности напряжений или же коэффициентом вязкости разрушения. Для трещин отрыва критический КИН принято обозначать символом K_{IC} .

В связи с активным хозяйственным освоением Крайнего Севера, важное значение приобретает количественный прогноз основных параметров процесса морозобойного трещинообразования: мест возникновения трещин, расстояния между ними, глубины их проникновения в мёрзлую толщу. Однако без определения прочностных характеристик мёрзлого грунта, в частности, не зная величину K_{IC} , выполнить такой прогноз будет невозможно.

С.Е. Гречищевым совместно с В.И. Аксёновым и Ю.Б. Шешиним были выполнены определения критического КИН K_{IC} на искусственно приготовленных образцах мёрзлого грунта (оттаявший грунт размещивался до получения однородной массы, помещался в специальные формы и там замораживался)². В.П. Епифановым получены значения критического КИН K_{IC} для льда и для снега³. Однако значения критического КИН K_{IC} для мёрзлых грунтов естественного сложения до настоящего времени не определялись.

Нами в результате предпринятого экспериментального исследования были впервые определены значения критического КИН K_{IC} для мёрзлых грунтов естественного сложения. При этом было проведено 79 опытов, и получено 65 значений критического КИН K_{IC} для мёрзлых грунтов естественного сложения при различной температуре и различной влажности. Эти значения приводятся ниже в табл. 1. Определения проводились для песков, супесей, суглинков, глин при температурах, равных минус 1, минус 1,3; минус 3,5; минус 7,5 и минус 12,5°C.

Методика изготовления образцов

Монолиты (керны) мёрзлого грунта доставлялись с Севера в мёрзлом состоянии в специальных теплозащитных контейнерах и сразу, по получении, помещались в морозильные лари. Монолиты имеют форму цилиндра диаметром 150 мм и высотой от 200 до 300 мм. В специально оборудованной морозильной камере монолиты распиливались на диски высотой от 30 до 50 мм, для последующего изготовления образцов и проведения испытаний. При этом оторцованные⁴ монолиты обмерялись и взвешивались для определения их плотности, и, кроме того, от каждого монолита производился специальный отбор проб для лабораторных определений физических свойств грунтов.



Рис. 1. Образец мёрзлого грунта, подготовленный для опытов по определению критического коэффициента интенсивности напряжений.

большой, глубиной в несколько миллиметров, пропилен, составлявший от 0,1 до 0,4 высоты параллелепипеда (см. рис.

Для определения критического коэффициента интенсивности напряжений (коэффициента вязкости разрушения) мёрзлого грунта мы использовали метод изгиба двухопорной балки с надрезом. Поэтому, для экспериментальных определений критических коэффициентов интенсивности напряжений нами из мёрзлых грунтовых дисков вырезались балочки (параллелепипеды). При этом балочки из мёрзлого грунта выпиливались тонким ножовочным полотном, после чего, для обеспечения параллельности граней и правильности геометрической формы полученных параллелепипедов, с помощью угольника и тонкого ножа выполнялась «доводка» этих балочек. После этого поперёк одной из длинных граней параллелепипеда делался не-

¹ Брок Д. Основы механики разрушения / Пер. с англ. М.: Высшая школа, 1980. С.368; Григорян С.С., Красс М.С., Гусева Е.В., Геворкян С.Г. Указ. соч.

² Гречищев С.Е., Казарновский В.Д., Кретов В.А., Аксёнов В.И., Шешин Ю.Б. Термореологические и контракционные свойства для мёрзлокомковатых грунтов // Криосфера Земли. 2000. Т. IV. № 3. С. 74–78; Гречищев С.Е., Шешин Ю.Б. Исследования температурных деформаций мёрзлых супесчаных грунтов Центральной Якутии // Труды ВСЕГИНГЕО. Вып. 42. Вопросы геокриологии. М.: ВСЕГИНГЕО, 1971. С. 19–25; Гречищев С.Е., Шешин Ю.Б. Экспериментальное исследование температурных напряжений в образцах мёрзлых грунтов // Труды ВСЕГИНГЕО. Вып. 70. Физико-геологические процессы в промерзающих и протаивающих породах. М.: ВСЕГИНГЕО, 1974. С. 68–74; Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Указ. соч.; Шешин Ю.Б. Некоторые экспериментальные данные о прочности на разрыв и коэффициентах температурного расширения мёрзлого торфа // Труды ВСЕГИНГЕО. Вып. 70. Физико-геологические процессы в промерзающих и протаивающих породах. М.: ВСЕГИНГЕО, 1974. С. 75–78; Шешин Ю.Б. Некоторые данные природных и лабораторных исследований прочностных и деформативных свойств мёрзлого торфа Западной Сибири // Труды ВСЕГИНГЕО. Вып. 87. Геокриологические исследования. М.: ВСЕГИНГЕО, 1975. С. 118–122.

³ Епифанов В.П. Хрупкое разрушение пресного льда // Материалы гляциологических исследований. Вып.100. М.: ИГ РАН, 2006. С. 128–140; Епифанов В.П., Осокин Н.И. Пластическое течение и разрыв снежного покрова на горных склонах острова Шпицберген // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 2. С. 82–93; Епифанов В.П., Осокин Н.И. Исследование прочностных свойств снега на горном склоне архипелага Шпицберген // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV. № 1. С. 81–91; Епифанов В.П., Юрьев Р.В. Вязкость разрушения льда // Докл. РАН. 2006. Т. 406. № 2. С. 187–191.

⁴ Торцевание – отпиливание торцов у кернов.

1).

Все работы по изготовлению образцов проводились в морозильных камерах при отрицательной температуре. Изготовленные подобным способом образцы не менее суток выдерживались при той отрицательной температуре, при которой предстояло провести намеченные испытания. Тем самым, температура образца приходила в соответствие с температурой в морозильной камере.

Методика проведения экспериментов

Как уже было сказано выше, для определения значений КИН K_{IC} нами применялся метод изгиба двухопорной балки с надрезом. Сущность метода заключается в измерении значения усилия, вызывающего разрушение образца при его изгибе.

В качестве испытательной машины была применена установка АНС конструкции Д.Н. Кривова¹. На этой установке силовое воздействие производится пневматической системой, управление которой осуществляется компьютером, оснащенный программным пакетом KrioLab. Технические возможности установки АНС и алгоритмы управления нагрузками позволяют задавать и поддерживать постоянными усилия в диапазоне от 4 до 650 кг (точность установки нагрузки составляет 0,15 кг). Установка позволяет вести наблюдения за деформациями образца, нагрузкой и температурой в режиме реального времени (точность измерения деформации – $\pm 0,002$ мм, нагрузки – $\pm 0,1$ кг, температуры – $\pm 0,05^\circ\text{C}$). Вся информация об опыте сохраняется в электронном виде.

Перед испытаниями установка АНС помещалась в морозильную камеру и не менее суток выдерживались там при той отрицательной температуре, при которой должны были проводиться опыты.

При проведении опытов образцы (балочки) укладывались на две опоры². Нагрузка на образец передавалась через металлический валик диаметром 11 мм, приложенный по всей ширине образца на равном расстоянии от опор. К нагруженному валику подводится шток пневматической системы, и производится плавное увеличение нагрузки вплоть до разрушения образца (см. рис. 2, 3).

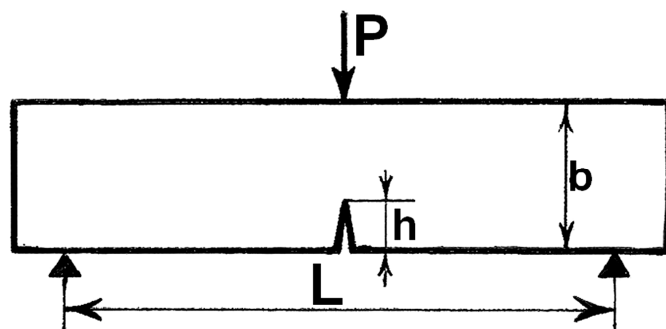


Рис. 2. Схема нагружения образца.

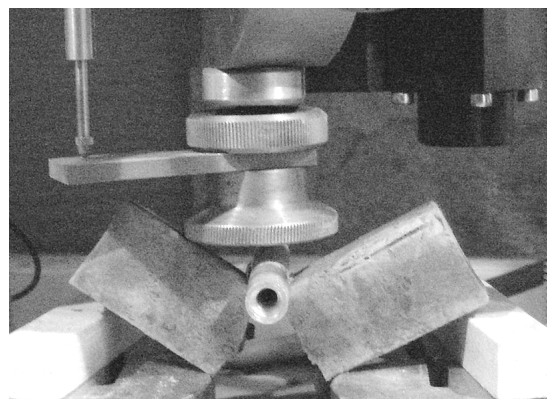


Рис. 3. Разрушение образца.

Все испытания проводились в морозильной камере при отрицательной температуре (см. табл. 1).

После испытаний обломки образцов (балочек) взвешивались и помещались в сушильный шкаф, для определения той суммарной влажности грунта W_c , при которой производилось соответствующее испытание.

По результатам выполненных испытаний определялся критический КИН K_{IC} , значение которого вычислялось по следующей формуле³:

$$K_I = \frac{PL}{ab^{1,5}} \cdot \left[2,9 \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^{0,5} - 4,6 \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^{1,5} + 21,8 \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^{2,5} - 37,6 \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^{3,5} + 38,7 \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^{4,5} \right],$$

где P – разрушающее усилие, L – расстояние между осями опор, a – ширина образца (балочки), b – высота образца, h – первоначальная глубина пропила (надреза).

Результаты экспериментов и их обсуждение

Результаты выполненных нами определений критического КИН K_{IC} для мерзлых грунтов естественного сложения представлены в табл. 1. Здесь⁴ в колонке 2 приводится наименование грунта, образец которого подвергался испытанию. В колонке 3 дана суммарная влажность грунта. В колонке 4 дана температура в морозильной камере, при которой производились соответствующие испытания. В колонке 5 представлены значения нагрузок, при которых произошло разрушение испытываемых образцов. В колонках 6 и 7 даны полученные нами значения критических коэффициентов интенсивности разрушения K_{IC} в единицах измерения СИ и МКГСС соответственно.

¹ Кривов Д.Н. Закономерности деформирования и разрушения мерзлых засоленных грунтов района Большеземельской тундры. Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2009. 25 с.

² Опоры были двух видов: металлические, круглого сечения, диаметром 12 мм, и деревянные, прямоугольного сечения, шириной 14 мм (последние показаны на рис.3).

³ Броек Д. Указ. соч.

⁴ Объем настоящей статьи не позволяет привести здесь полностью все результаты лабораторных определений физических свойств испытанных нами грунтов.

Таблица 1.

Значения КИН K_{IC} мёрзлых грунтов естественного сложения

№ Пп.	Наименование грунта	W_C , %	T , °C	P , кгс	КИН K_{IC} , МПа*м ^{1/2}	КИН K_{IC} , кгс/см ^{3/2}
1	2	3	4	5	6	7
1	Песок мелкий	22,5	-1,0	54,9	0,32	32,2
2	Песок мелкий	19,6	-1,3	57,7	0,264	26,35
3	Песок мелкий	22,9	-3,5	69,1	0,30	29,8
4	Песок мелкий	22,9	-3,5	58,8	0,36	36,0
5	Песок мелкий	23,5	-3,5	18,4	0,17	16,5
6	Песок мелкий	23,5	-3,5	87,8	0,84	83,7
7	Песок пылеватый	22,9	-1,3	131,8	0,372	37,19
8	Песок пылеватый	16,4	-3,5	182,4	0,20	20,4
9	Песок пылеватый	16,4	-3,5	195,7	0,21	21,4
10	Песок пылеватый	17,3	-3,5	21,0	0,10	10,4
11	Песок пылеватый	17,3	-3,5	162,7	0,32	31,9
12	Песок пылеватый	20,7	-3,5	52,0	0,34	33,7
13	Песок пылеватый	20,7	-3,5	204,1	0,34	34,2
14	Песок пылеватый	20,7	-3,5	253,7	0,45	45,1
15	Песок пылеватый	20,7	-3,5	251,3	0,71	70,5
16	Песок пылеватый	21,2	-3,5	178,3	0,20	19,7
17	Песок пылеватый	16,4	-7,5	51,4	0,24	23,5
18	Песок пылеватый	17,3	-7,5	41,1	0,26	25,6
19	Песок пылеватый	20,7	-7,5	112,5	0,32	32,2
20	Песок пылеватый	21,2	-12,5	167,7	0,58	58,2
21	Песок средней крупности	21,6	-1,3	176,5	0,556	55,58
22	Песок средней крупности	21,6	-1,3	69,3	0,532	53,18
23	Супесь	27,0	-3,5	56,1	0,24	24,0
24	Супесь	27,0	-3,5	196,4	0,25	24,8
25	Супесь	27,0	-3,5	183,8	0,24	23,7
26	Супесь	27,0	-7,5	38,0	0,23	23,0
27	Супесь	27,0	-7,5	217,3	0,38	38,3
28	Суглинок лёгкий	16,9	-1,0	19,2	0,03	2,9
29	Суглинок лёгкий	19,4	-1,0	16,8	0,07	6,9
30	Суглинок лёгкий	31,0	-1,0	28,5	0,08	7,8
31	Суглинок лёгкий	31,7	-1,0	4,8	0,04	4,2
32	Суглинок лёгкий	31,7	-1,0	5,6	0,05	4,9
33	Суглинок лёгкий	31,7	-1,0	28,8	0,13	12,6
34	Суглинок лёгкий	31,7	-1,0	49,7	0,13	12,9
35	Суглинок лёгкий	32,9	-1,0	34,3	0,11	10,7
36	Суглинок лёгкий	37,0	-1,0	12,5	0,05	5,2
37	Суглинок лёгкий	41,7	-1,0	14,6	0,08	8,4
38	Суглинок лёгкий	41,7	-1,0	6,5	0,04	4,2
39	Суглинок лёгкий*	0,0	-1,3	0,2	0,001	0,08
40	Суглинок лёгкий*	0,0	-1,3	0,4	0,0008	0,08
41	Суглинок лёгкий	17,2	-1,3	6,3	0,013	1,32
42	Суглинок лёгкий	30,8	-1,3	5,3	0,034	3,37
43	Суглинок лёгкий	25,6	-3,5	17,2	0,15	14,6
44	Суглинок лёгкий	25,6	-3,5	20,01	0,13	13,0
45	Суглинок лёгкий	25,6	-3,5	34,8	0,16	16,3
46	Суглинок лёгкий	25,6	-3,5	86,4	0,26	26,5
47	Суглинок лёгкий	30,6	-3,5	19,5	0,14	14,3
48	Суглинок лёгкий	30,6	-3,5	67,8	0,15	14,9
49	Суглинок лёгкий	44,7	-3,5	26,3	0,08	8,1
50	Суглинок лёгкий	44,7	-3,5	58,2	0,16	15,7
51	Суглинок лёгкий	30,6	-7,5	54,0	0,26	25,9
52	Суглинок лёгкий	30,6	-12,5	109,6	0,45	44,7
53	Суглинок тяжёлый	36,9	-1,0	34,7	0,08	7,7
54	Суглинок тяжёлый	35,2	-1,3	6,3	0,027	2,69
55	Суглинок тяжёлый	54,5	-3,5	16,0	0,08	8,0
56	Суглинок тяжёлый	54,5	-3,5	67,4	0,10	10,3
57	Суглинок тяжёлый	54,5	-3,5	58,9	0,08	7,5
58	Суглинок тяжёлый	54,5	-7,5	49,9	0,21	20,5
59	Суглинок тяжёлый	54,5	-12,5	83,3	0,37	37,3
60	Глина лёгкая	63,2	-1,0	17,2	0,05	5,5
61	Глина лёгкая	32,0	-1,3	10,9	0,067	6,68
62	Глина лёгкая	35,1	-1,3	5,0	0,033	3,26
63	Глина тяжёлая	108,0	-1,0	9,0	0,03	3,1
64	Глина тяжёлая	134,2	-1,3	6,7	0,020	1,95
65	Глина тяжёлая	134,2	-1,3	13,5	0,035	3,51

* Указанные образцы перед испытаниями были предварительно высушены.

В целом, оценивая результаты выполненных нами экспериментов, можно сделать следующие предварительные выводы.

1. При прочих равных условиях наибольшим значением критического КИН K_{IC} обладают мёрзлые пески, а наименьшим значением критического КИН K_{IC} обладают мёрзлые глины.

2. С понижением температуры величина критического КИН K_{IC} у всех грунтов растёт пропорционально корню 4-й степени из абсолютного значения температуры мёрзлого грунта:

$$K_{IC} = C_0 \cdot \sqrt[4]{|T - T_{bf}|} \quad , \quad C_0 = const.$$

Здесь T – температура грунта; T_{bf} – температура начала замерзания грунта (определяется экспериментально¹); константа C_0 зависит от разновидности грунта и его влажности W_c .

Указанная зависимость прослеживается у песков и супесей, по крайней мере, до температуры $T = -12,5^\circ C$. У суглинков же подобная зависимость наблюдается до значений температуры $T = -2,0^\circ C$, а при дальнейшем её понижении значение K_{IC} растёт почти по линейному закону (рис. 4, 5).

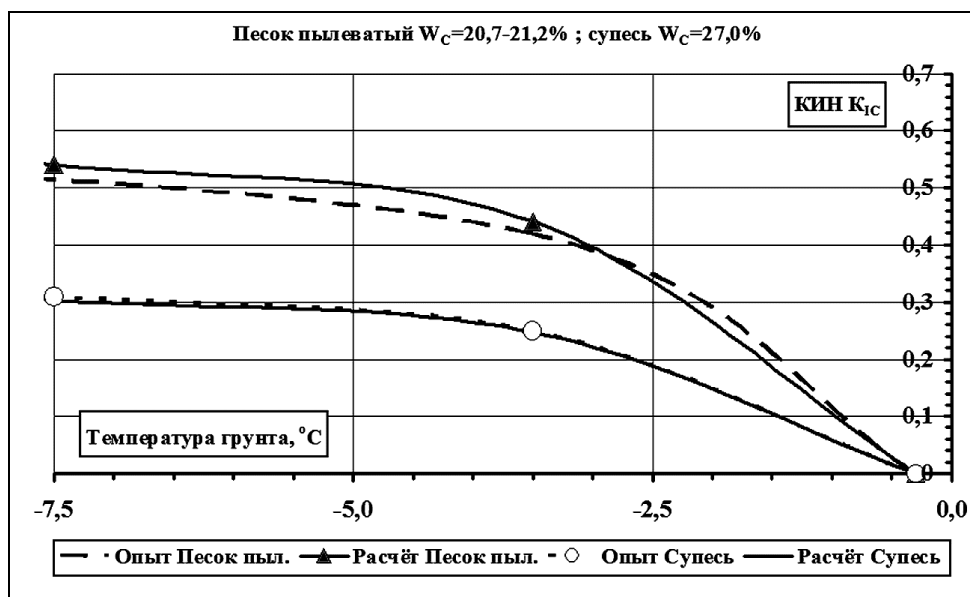


Рис. 4. Зависимость от температуры КИН K_{IC} пылеватого песка и супеси.

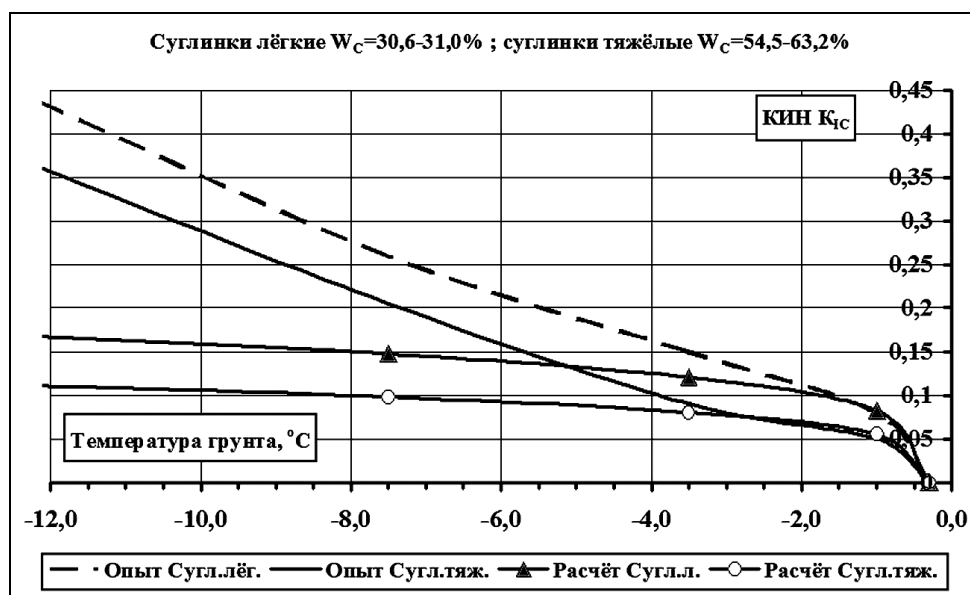


Рис. 5. Зависимость от температуры КИН K_{IC} лёгких и тяжёлых суглинков.

¹ Боженова А.П. Инструктивные указания по лабораторному методу определения температуры переохлаждения и начала замерзания грунтов // Материалы по лабораторным исследованиям мёрзлых грунтов. Сборник 2. Инструктивные указания. М.: Изд.-во АН СССР, 1954. С. 16–31; Лабораторные методы исследования мёрзлых пород. Изд.-во МГУ, 1985. 350 с.

Заметим, что по данным С.Е. Гречищева и Ю.Б. Шешина, полученным на искусственно приготовленных образцах, величина критического КИН K_{IC} с понижением температуры растёт пропорционально корню квадратному из абсолютного значения температуры мёрзлого грунта, т.е. имеет место следующая зависимость¹:

$$K_{IC} = K_0 \cdot \sqrt{|T|}, \quad K_0 = const,$$

где константа K_0 определяется свойствами грунта.

3. Величина КИН K_{IC} у всех мёрзлых грунтов существенно зависит от суммарной влажности W_C . При прочих равных условиях, чем меньше влажность грунта, тем меньше у этого грунта значение критического КИН K_{IC} . Иначе говоря, при стремлении W_C к нулю, КИН K_{IC} также стремится к нулю (см. табл. 1, строки 39 и 40). В зависимости от температуры и от вида грунта всегда существует определённое значение суммарной влажности W_C (ок. 30–40 %), при которой КИН K_{IC} мёрзлого грунта имеет наибольшую при данной температуре величину. При дальнейшем увеличении суммарной влажности величина K_{IC} постепенно убывает, в конечном счёте достигая значения, равного критическому КИН для льда.

4. Для сравнения укажем, что, по данным В.П. Епифанова², критический КИН пресного речного льда при температуре $T = -15^\circ\text{C}$ составляет ок. 0,104–0,105 МПа·м^{1/2}, при $T = -17^\circ\text{C}$ КИН $K_{IC} = 0,109$ МПа·м^{1/2}, а при $T = -24^\circ\text{C}$ КИН K_{IC} равен 0,145 МПа·м^{1/2}. По результатам исследований С.Е. Гречищева³ для монолитной супеси $K_{IC} = 0,6$ МПа·м^{1/2} при $T = -3^\circ\text{C}$, и $K_{IC} = 0,9$ МПа·м^{1/2} при $T = -8^\circ\text{C}$. В данном случае завышенные значения коэффициента K_{IC} можно объяснить тем, что С.Е. Гречищев проводил определения K_{IC} на искусственно приготовленных образцах (так называемых «пастах»).

5. Результаты наших опытов позволяют также заключить, что величина КИН K_{IC} мёрзлых грунтов зависит ещё и от таких показателей, как коэффициент пористости мёрзлого грунта (e_f) и степень заполнения объема пор мёрзлого грунта льдом и незамерзшей водой (S_f). Вид этой зависимости является предметом отдельного рассмотрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боженова А.П. Инструктивные указания по лабораторному методу определения температуры переохлаждения и начала замерзания грунтов // Материалы по лабораторным исследованиям мёрзлых грунтов. Сборник 2. Инструктивные указания. М.: Изд.-во АН СССР, 1954. С. 16–31.
2. Брок Д. Основы механики разрушения / Пер. с англ. М.: Высшая школа, 1980. 368 с.
3. Гречищев С.Е., Казарновский В.Д., Кретов В.А., Аксёнов В.И., Шешин Ю.Б. Термореологические и контракционные свойства для мёрзлокомковатых грунтов // Криосфера Земли. 2000. Т. IV. № 3. С. 74–78.
4. Гречищев С.Е., Шешин Ю.Б. Исследования температурных деформаций мёрзлых супесчаных грунтов Центральной Якутии // Труды ВСЕГИНГЕО. Вып. 42. Вопросы геокриологии. М.: ВСЕГИНГЕО, 1971. С. 19–25.
5. Гречищев С.Е., Шешин Ю.Б. Экспериментальное исследование температурных напряжений в образцах мёрзлых грунтов // Труды ВСЕГИНГЕО. Вып. 70. Физико-геологические процессы в промерзающих и протаивающих породах. М.: ВСЕГИНГЕО, 1974. С. 68–74.
6. Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. М.: Недра, 1980. 384 с.
7. Григорян С.С., Красс М.С., Гусева Е.В., Геворкян С.Г. Количественная теория геокриологического прогноза. М.: Изд.-во Моск. ун-та, 1987. 268 с.
8. Епифанов В.П. Хрупкое разрушение пресного льда // Материалы гляциологических исследований. Вып. 100. М.: ИГ РАН, 2006. С. 128–140.
9. Епифанов В.П., Осокин Н.И. Пластическое течение и разрыв снежного покрова на горных склонах острова Шпицберген // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 2. С. 82–93.
10. Епифанов В.П., Осокин Н.И. Исследование прочностных свойств снега на горном склоне архипелага Шпицберген // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV. № 1. С. 81–91.
11. Епифанов В.П., Юрьев Р.В. Вязкость разрушения льда // Докл. РАН. 2006. Т. 406. № 2. С. 187–191.
12. Кривов Д.Н. Закономерности деформирования и разрушения мёрзлых засоленных грунтов района Большеземельской тундры. Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2009. 25 с.
13. Лабораторные методы исследования мёрзлых пород. Изд.-во МГУ, 1985. 350 с.
14. Цытович Н.А. Механика мёрзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 446 с.
15. Шешин Ю.Б. Некоторые экспериментальные данные о прочности на разрыв и коэффициентах температурного расширения мёрзлого торфа // Труды ВСЕГИНГЕО. Вып. 70. Физико-геологические процессы в промерзающих и протаивающих породах. М.: ВСЕГИНГЕО, 1974. С. 75–78.
16. Шешин Ю.Б. Некоторые данные натуральных и лабораторных исследований прочностных и деформативных свойств мёрзлого торфа Западной Сибири // Труды ВСЕГИНГЕО. Вып. 87. Геокриологические исследования. М.: ВСЕГИНГЕО, 1975. С. 118–122.

¹ Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Указ. соч.

² Епифанов В.П. Хрупкое разрушение пресного льда...

³ Гречищев С.Е., Казарновский В.Д., Кретов В.А., Аксёнов В.И., Шешин Ю.Б. Указ. соч.