

О ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

А. А. Коновалов

Институт проблем освоения Севера СО РАН, 625003, Тюмень, а/я 2774, Россия

Анализируется поведение нагруженных мерзлых грунтов. Показано, что на стадии стационарной ползучести процесс деформирования энергетически эквивалентен плавлению. С учетом этого и кинетической концепции прочности для мерзлого грунта получена формула, связывающая долговечность, деформацию, нагрузку и температуру. На многочисленных примерах показана хорошая сходимость вычислений по этой формуле с фактическими данными.

Прочность, деформация, долговечность, ползучесть, разрушение

ABOUT DEFORMATION AND DESTRUCTION OF FROZEN GROUND

A. A. Konowalov

Institute of North Development Problem, SB RAS, 625003, Tyumen, 2774, Russia

The behaviour of loaded frozen grounds is analyzed. The cyclic nature of deformation, including the stage of hardening and unhardening is shown. The stage of unhardening within the limits of stationary creep is equivalent in energy to melting. With regard for it and the kinetic concept of strength for frozen ground, the expression is derived, binding durability, deformation, load and temperature.

Strength, deformation, durability, creep, destruction

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Мерзлые грунты, как и другие твердые тела, при постоянных температуре $T(K)$ и давлении P постепенно разрушаются, проходя три стадии деформации: с убывающей (1), примерно постоянной (2) и возрастающей скоростью (3) [Вялов, 1978, 2000; и др.]. Схематизированные графики хода относительной деформации $j(\tau)$ и ее составляющих — упругой (обратимой) j_y и остаточной j_{oc} при одноосном сжатии приведены на рис. 1 и 2. Величина $j(\tau)$ равна $(h_n - h)/(h_n - h_s)$, где h_n и h — начальная и текущая высота образца, h_s —

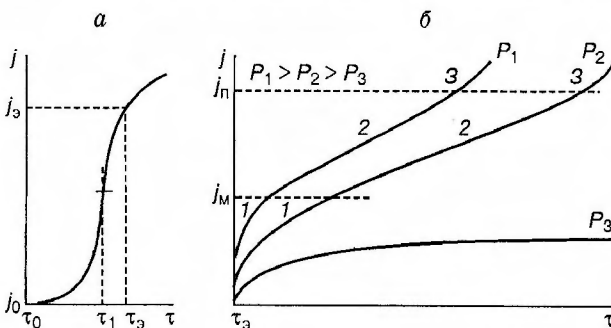


Рис. 1. Ход относительной деформации мерзлых грунтов j во времени τ при разных давлениях P и $T = const$.

a — скрытый период и b — наблюдаемый. 1—3 — номера стадий деформации, τ_1 — начало стадии.

диаметр элементарной (неделимой) частицы грунта („атома“). В инженерных задачах принимают $h_s = 0$. Шкала времени τ на экспериментальных графиках начинается с момента τ_s — элементарного (минимального) отрезка времени, за который удастся замерить элементарную, условно мгновенную деформацию j_s . Недоступный (скрытый) для наблюдения участок, левее τ_s , сокращается по мере развития науки и техники до некоторого минимума τ_0 , за которым корректное измерение одновременно времени и прост-

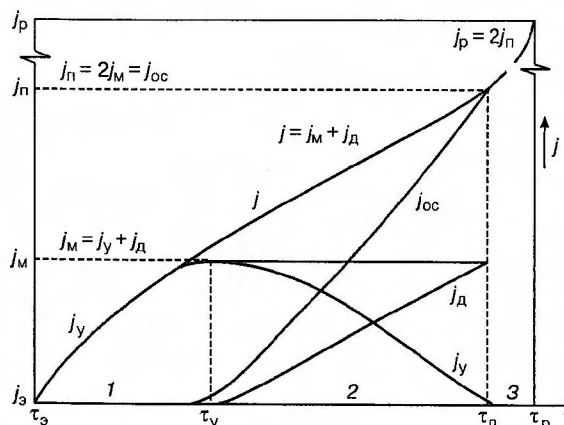


Рис. 2. Временной ход общей j , остаточной j_{oc} и упругой j_y деформаций.

1—3 — номера стадий.

ранства (деформации) невозможно (принцип неопределенности Гейзенберга) [Яворский, Детлаф, 1965]. Очевидно, что из-за поверхностного натяжения, инерции, скорость деформации v изменяется от 0; т. е. на скрытом участке должен быть еще один излом кривых, на котором меняется знак Δv , примерно как на рис. 1, а.

Функция $v(\tau)$, за исключением концевых участков, симметрична относительно центра 2-й стадии [Вялов, 1978, 2000]. Кроме того, из сравнения рис. 1, а и б видно, что форма кривых на скрытом участке повторяется в конце 3-й стадии. Это свидетельствует о замкнутости деформационного цикла. Строго говоря, он проходит в две стадии — стабилизации и дестабилизации. Выделение стационарной стадии — переходной — вызвано ограниченной точностью измерения, из-за чего излом кривых „размазан“ по временному отрезку, на котором изменение скорости деформации не прослеживается, или им можно пренебречь.

Все виды деформации (см. рис. 2) имеют энергетические эквиваленты, и их можно интерпретировать и как относительные (деленные на PV , V — объем) величины: потенциальной (внутренней) энергии упругой деформации — j_m , энергии ее диссипации — j_d , работы силы упругости — j_p , свободной — j_f и связанной (энтропийной) — j_{oc} энергии. Общий ресурс энергии Y_0 в относительном выражении равен 1. В области применимости закона Гука работа силы упругости вдвое больше потенциальной энергии упругой деформации, т. е. $j_m \approx 0,5j_p$. Установлено [Вялов, 1978], что j_p мерзлых грунтов мало зависит от P , T (несколько возрастает при их повышении), вида грунта и близка к изменению объема при плавлении порового льда $j_p \approx j_{пл} \approx 0,09...0,1$. Поэтому $j_m \approx 0,5j_{пл}$.

Упругая деформация и ее потенциальная энергия на 1-й стадии растут до максимума j_m , на 2-й — убывают ($j_m - j_y = j_d$) почти до 0 на фоне роста общей и остаточной. К 3-й стадии пластическая деформация (упругая — пренебрежимо мала) приобретает ускорение (теряет устойчивость) и продолжается до момента τ_p , когда $j = j_p \approx 0,2...0,3$ [Вялов, 2000]. С этого момента преобладают разрывные деформации, и тело быстро, почти скачкообразно, разваливается на части по поверхностям, проходящим через участки с ослабленными (перенапряженными) из-за различных дефектов структуры связями. Деформация этих связей в момент разрыва $j_p = 1$, что намного выше, чем в среднем по объему. С уменьшением P или T увеличивается τ_p , деформационные кривые спрямляются — функция $j(\tau)$ линеаризуется ($j \approx v\tau$) по всему циклу. Причем величина v стремится к некоторому,

близкому к 0, минимуму $v_s \neq 0$, достигаемому при $P = 0$, когда тело с исчезающе малой скоростью деформируется под своим весом. Из-за недостаточной точности измерения значения v , близкие к 0, наблюдаются и при $P > 0$, поэтому на графиках деформирования появляется несколько равновесных (параллельных оси τ) кривых, соответствующих малым значениям P , при которых $v \approx 0$. За предел длительной прочности принимают максимальное из них.

Кривые деформации спрямляются и при увеличении P или T , но при этом долговечность уменьшается, а v стремится к некоторому максимуму v_{max} , достигаемому при максимальном давлении P_{max} , вызывающем мгновенное разрушение.

Величину j_p можно трактовать и как относительную энергию общей деформации, которая обращается в энергию разрывов $j_p - j_p$, производя работу $j_p \approx 2j_p$, и как общее количество потерянной при разрушении энергии. В момент τ_p тело распадается на отдельные, давление скачком возвращается на нулевую отметку, через некоторое время восстанавливается и начальная температура. Образование на месте разрушенного тела его уменьшенных генетических копий („детей“) с суммарным ресурсом энергии, уменьшенным по сравнению с начальным на величину энтропии ($Y_1 = 1 - j_p$), можно интерпретировать как частичную обратимость энергии разрушения, завершение деформационного цикла.

О КИНЕТИЧЕСКОЙ КОНЦЕПЦИИ ПРОЧНОСТИ

Согласно этой концепции, разрушение твердого тела — это процесс постепенного накопления деформаций и разрывов связей атомов в результате их тепловых колебаний и флуктуаций [Регель и др., 1974]. Время полного разрушения — долговечность определяется формулой Журкова:

$$\tau_{п} = \tau_0 \exp(U - \gamma P)/RT, \quad (1)$$

где $U \approx Q_c$ — энергия активации разрушения, отнесенная к молю вещества, Q_c — энергия сублимации, $\gamma = \phi V_0 = \text{const}$ — термофлуктуационный объем атома, V_0 — объем атома, ϕ — коэффициент перенапряжения ослабленных связей, R — газовая постоянная.

Средние амплитуды тепловых колебаний атомов малы. Даже при температуре плавления $T_{пл}$ они меньше 10 % межатомного расстояния, т. е. в процентном отношении примерно равны $j_{пл}$. На макроуровне амплитуды выражены упругой деформацией.

Таблица Сравнение энергетических показателей разрушения мерзлого грунта и плавления разных веществ

Вещество	$j_{пл}$	$Q_{пл}/Q_c$	$RT_0/Q_c, \%$	$RT_0/Q_c j_{пл}$	Вещество	$j_{пл}$	$Q_{пл}/Q_c$	$RT_0/Q_c, \%$	$RT_0/Q_c j_{пл}$
Лед	-8,3	12,7	4,6	0,55	Алюминий	6,6	4,4	3,0	0,46
Цинк	6,7	5,1	3,9	0,57	Серебро	5,0	3,6	3,7	0,74
Медь	4,5	3,9	3,3	0,73	Олово	2,6	2,0	1,2	0,46
Висмут	-3,3	5,4	2,2	0,65	Свинец	3,6	2,6	2,3	0,64

Формула (1), устанавливающая взаимосвязь факторов разрушения, получена путем анализа опытов по разрушению разных материалов растягивающей нагрузкой и придания должного физического смысла параметрам эмпирической формулы экспоненциального вида. При этом фактически принимается, что максимальная температура твердого тела (а она равна температуре плавления $T_{пл}$) стремится к бесконечности. Это допущение правомерно для материалов с высокими $T_{пл}$, до 1000 К и выше. Мерзлые грунты к ним не относятся.

ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Мерзлый грунт представляет собой совокупность органо-минеральных частиц с включениями незамерзшей воды (растворов) и газов, сцементированных (связанных) замерзшей поровой влагой (льдом). В обычных условиях, особенно при температурах, близких к 0 °С, поровый лед начинает оттаивать при любом малом повышении P или T , в результате чего мерзлый грунт теряет устойчивость. То есть цельность (сплошность) мерзлого грунта поддерживается в основном связями льда—цемента [Вялов, 1978]. Ни в одном твердом теле температурно-временная зависимость прочности не проявляется так четко, как в мерзлом грунте, но формула (1) с $\gamma = \text{const}$, судя по экспериментальным данным [Вялов, 1978, 2000], не подходит для ее описания — обнаруживается зависимость γ от T . Видимо, это связано с разными условиями опытов — вблизи (мерзлые грунты) или вдали (другие тела) от $T_{пл}$ и особенностями разрушения в этих условиях.

Большинство веществ при плавлении уплотняется, а их $T_{пл}$ повышается с увеличением P . Эти („нормальные“) вещества при изотермическом сжатии „уходят“ от жидкого состояния, а при растяжении приближаются к нему. Разрывы связей начинаются при значениях P и T более низких, чем в точке плавления. Поэтому при значениях T , намного ниже $T_{пл}$, тело разрушается в твердой фазе, не достигая $T_{пл}$. Аномальные вещества — мерзлые грунты, лед, висмут и др., наоборот, при плавлении уплотняются, а температура плавления понижается с увеличением давления. Причем реальные T и P , при которых существуют мерзлые грунты и лед, мало

отличаются от таковых в точке плавления. И, наверное, поэтому температурный фактор разрушения в этом случае проявляется не сублимацией—разрывом связей, а их „плавлением“—деформацией, близкой к $j_{пл}$. Скорость такого разрушения увеличивается с повышением P (см. рис. 1) или T , достигая максимума при $\tau_n = \tau_0$, когда поровый лед скачкообразно переходит в структуру с плотностью жидкой фазы при определенном (законом Клапейрона—Клаузиуса) сочетании T и P .

При простом (одномерном) напряжении плавление происходит при сжатии аномальных веществ и при растяжении нормальных. Но каждая частица имеет множество разносторонних связей, и при неравномерно распределенной нагрузке удлинение связей в одном направлении сопровождается их сокращением в других. Поэтому „плавильный“ механизм разрушения так или иначе проявляется при температурах, близких к $T_{пл}$, и при сжатии нормальных веществ, и при растяжении (отрицательном сжатии) аномальных.

Таким образом, можно говорить о двух механизмах разрушения твердых тел — посредством разрыва упругих связей (квазиплавления) при T , близких к $T_{пл}$, или разрыва всех связей (сублимации) при T , далеких от $T_{пл}$.

По аналогии с материалами с высокими $T_{пл}$, разрушение которых энергетически эквивалентно сублимации, можно предположить, что разрушение мерзлого грунта энергетически эквивалентно плавлению. Это подтверждается табл. 1, в которой приведены отношения: 1) деформации плавления (оттаивания) и распада ($j_p \approx 1$, тогда $j_{пл}/j_p \approx j_{пл}$) льда и других материалов; 2) затрат на их плавление и сублимацию ($Q_{пл}/Q_c$); а также 3) RT_0/Q_c и 4) $RT_0/Q_c j_{пл}$. Таблица показывает, что для разных веществ с 5... 30 % погрешностью $j_n \approx |j_{пл}| \approx Q_{пл}/Q_c \approx 2RT_0/Q_c$, откуда: $RT_0/Q_c \approx j_n/2 \approx |j_{пл}|/2$, а $RT_0 \approx Q_{пл}/2$. Кроме того, появляются варианты выражения U через удельные (отнесенные к деформации, объему или массе) энергии:

$$U \approx Q_c/j_p \approx Q_{пл}/j_{пл} \approx (Q_c - Q_{пл})/(1 - j_{пл}) \approx Q_i/j_i,$$

где j_i и Q_i — любые значения относительной деформации и ее энергии.

Из полученных соотношений следует:

1) деформация разрушения мерзлого грунта, т. е. деформация на конец 2-й стационарной стадии, близка к деформации его плавления (оттаивания);

2) работа по разрушению мерзлого грунта примерно равна энергии оттаивания;

3) энергия сопротивления разрушению (энергия тепловых колебаний атомов при данных P и T_0 — внутренняя энергия тела) примерно равна половине энергии плавления;

4) удельная энергия активации разрушения (Q_i/j_i) не зависит от принятой величины разрушающей деформации.

5) приближенное равенство $2RT_0/Q_c \approx j_n$ (см. табл. 1) подтверждает и теоретически обосновывает наблюдаемое в опытах примерное постоянство предельной деформации $j_n \approx j_{пл}$ для данного материала.

При разрушении твердомерзлых грунтов в процессе ползучести (при постоянных T и P) вода визуально не наблюдается. Это можно объяснить тем, что микропрослойки льда, связывающего частицы грунта в мерзлое тело, при разрушении в один и тот же момент ($\tau = \tau_0$) оттаивают, переходя в свободное состояние, и, поскольку давление при этом падает и текущая температура оказывается выше равновесной, снова замерзают (появлением на мгновение такой „невидимой“ жидкой пленки объясняют, например [Базаров, 1991], потерю трения при скольжении по льду). Жидкая фаза не замерзает и может накапливаться только при подтоке энергии.

Частицы льда, замерзшие в свободном состоянии, теряют связи (притяжение, сцепление) друг с другом и с грунтовыми частицами. Поскольку связи увеличивают, „оттягивают“ силой притяжения поверхность частиц и тем самым разуплотняют их, плотность „развязанных“ частиц увеличивается; уплотняется и все мерзлое тело, судя по предельным деформациям, которые близки к $j_{пл}$, примерно до плотности воды. В таком состоянии, с уровнем взаимодействия, близким к идеальному газу, эти частицы приобретают сыпучесть (шелушение). Они, их масса, особенно у поверхности, уже как бы и не принадлежат телу. Их полному отторжению препятствует лишь внутреннее трение, преодолеваемое на 3-й стадии деформирования.

При наличии незамерзшей воды деформация инициирует появление внутреннего давления, в результате которого $T_{пл}$ понижается и оттаивает „сверхравновесная“ порция льда. Но при этом появляется свободный объем — давление падает, а $T_{пл}$ повышается и избыточная влага вновь замерзает. По-видимому, эти процессы компенсируют друг друга, иначе бы не

выполнялся закон равновесия между T , P и содержанием незамерзшей воды [Цытович, 1983]. То есть в процессе деформации при постоянных T и P количество незамерзшей воды остается примерно постоянным.

ФОРМУЛА ДОЛГОВЕЧНОСТИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Существующие методы расчета долговечности мерзлых грунтов базируются на предложенных С. С. Вяловым эмпирических формулах. Развитие расчетных методов идет в направлении физического истолкования этих формул с позиций кинетической концепции [Вялов, 2000; Коновалов, 1974, 1991; Роман, 1987; и др.]. Но привести эти формулы к виду (1) до сих пор не удавалось.

Мерзлые грунты вблизи $T_{пл}$ (при высокой скорости деформации) проявляют свойства вязкой жидкости и деформируются примерно по тем же законам, что и идеальные газы [Вялов, 1978].

Поэтому ниже в промежуточных выкладках часто используется модель идеального газа и принято равенство относительных линейной и объемной тепловых деформаций, что характерно для сплошного массива льдонасыщенного грунта, где нет условий для бокового расширения.

При независимых T и P энтропия $S = R \ln (V/V_0)$, где $V/V_0 = M$ — количество атомов в молярном объеме V [Базаров, 1991]. Каждый атом скреплен с соседними множеством связей, образующих вокруг него нечто вроде упругой оболочки. Число разрывов таких групповых связей при развале тела меньше M на 1. Расход времени на один разрыв — τ_0 , а на все — в $(M-1)$ раз больше. Тогда τ_n и S равны:

$$\tau_n = \tau_0 [V/V_0 - 1], \quad (2)$$

$$S = R \ln [(\tau_n/\tau_0) + 1]. \quad (3)$$

Энергию сублимации можно рассматривать как энтальпию моля вещества. Энтальпия складывается из свободной энергии, которая при постоянной T равна $G = P\gamma$, и связанной $Q_s = TS$. Выразим S из последнего равенства, согласно (2), учтем также $Q_s = Q_c - G = Q_c - P\gamma$; после преобразования получаем:

$$(\tau_n/\tau_0) + 1 = \exp (Q_c - \gamma P)/RT. \quad (1)'$$

На макроуровне (когда $\tau_n > \tau_0$) единицей в левой части (1)' можно пренебречь. Тогда полученная формула идентична (1). Придадим произведению $P\phi$ в этих формулах смысл эквивалентного давления P_3 , учитывающего тепловую „нагрузку“ и поэтому увеличенного по сравнению с $P = (P_1 - P_0)$ в ϕ раз.

Работа по разрушению мерзлого грунта A_p , согласно следствию 2 из табл. 1, примерно равна $Q_{пл}$. Тогда, с учетом закона Клайперона—Клаузиуса, $A_p = P_3(V_T - V_ж)$, где $P_3 = PT_0/t$. Имея в виду также закон Гей-Люссака: $(V_3 - V_ж)/V_T = (t/T_0)$, находим выражение ϕ :

$$\phi = T_0/t = 1/j, \quad (4)$$

где V_T и $V_ж$ — объемы твердой и жидкой (текущий объем) фаз; $t = T_0 - T$; j — деформация мерзлого грунта, изменяющаяся от 0 до $j_{пл}$ при изменении температуры плавления от T_0 до температуры тела T .

Подставив в (1) $\tau_{II} = \tau_0$, находим выражение максимальной прочности $P_{max} = Q_c/\gamma = Q_c/\phi V_0$, которое с учетом (3) и $Q_c \approx Q_{пл}/j_{II}$ (см. табл. 1) превращается в линейную модификацию уравнения Клайперона—Клаузиуса для определения давления, развиваемого при плавлении P_{max} как функции температуры, или температуры плавления $t_{пл}$ как функции давления:

$$P_{max} = Q_c t/T_0 V_0 = Q_{пл} t/T_0 (V_T - V_ж) = t/b, \quad (5)$$

$$t_{max} = t_{пл} = (2T_3 - T_{пл}) = bP, \quad (5)'$$

где $V_ж$ — объем атома жидкой фазы, $V_T = V_0$ — твердой фазы; $b = T_0(V_T - V_ж)/Q_{пл} \approx 0,08... 0,1$ °С/МПа.

Учет незамерзшей воды осуществляется с помощью *обобщенного уравнения фазового равновесия*, которое записывается как (5)', но при $b = T_0(V_T - V_ж P_{пор}/P)/Q_{пл}$, где $P_{пор}$ — поровое давление, определяемое по эмпирической формуле [Коновалов, 1997]: $P_{пор} = P [1 - (j_\phi/j_{пл})^4]$, где j_ϕ — деформация уплотнения, не связанная с фазовыми переходами, примерно (в пределе) равная пористости.

Выразим γ в (1) через P_{max} или $t_{пл}$, и учитывая $RT/Q_c \approx j_{II}/2$ (см. табл. 1), получим:

$$\tau_{II} = \tau_0 \exp(2AQ_c/RT) \approx \tau_0 \exp(AT_0/j_{II}T), \quad (6)$$

где $A = 2(1 - bP/t)$.

По наблюдениям [Вялов, 1978, 2000], длительная прочность меньше „мгновенной“ в 3... 10 раз. В этих пределах, с погрешностью 0... 28 %, $A = \ln(P_{max}/P)$. Например, при P_{max}/P , равных 3; 5; 10, получаются следующие соотношения $2(1 - P/P_{max})$ — числитель и $\ln(P_{max}/P)$ — знаменатель: 1,3/1,1; 1,6/1,6; 1,8/2,3. Кроме того, реальные температуры мерзлых грунтов близки к T_0 ; примем $T \approx T_0$. Тогда (6) упрощается:

$$P = (t/b) (\tau_0/\tau_{II})_{II}. \quad (7)$$

Взяв в (7) производную j_{II} по τ_{II} , находим скорость деформации:

$$v = dj_{II}/d\tau_{II} = -j_{II}^2/[\tau \ln(t/bP)]. \quad (8)$$

Минус перед правой частью (8) означает уменьшение скорости деформации на отрезке времени $\tau_{II} - \tau_0$. Деформацию и время целесообразно отсчитывать от реальных, поддающихся измерению, минимумов этих величин — j_3 и τ_3 . На 2-й стадии $v \approx (j_{II} - j_3)/(\tau_{II} - \tau_3)$. Интегрируя (8) в пределах $\tau - \tau_3$ после преобразования с учетом (7), получаем выражение хода деформации на отрезке времени $\tau_{II} - \tau_3$:

$$(j - j_3)/(j_{II} - j_3) = (j_{II} - j_3) [\ln(\tau/\tau_3)/\ln(t/bP)] = \ln(\tau/\tau_3)/\ln(\tau_{II}/\tau_3). \quad (9)$$

Формула (9) является универсальным выражением связи P , T , τ , j_{II} и j . Она описывает плавление, деформирование и разрушение мерзлого грунта, а также смещение его фазового равновесия во времени.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФОРМУЛ ВИДА (1) ВБЛИЗИ И ВДАЛИ ОТ ТОЧКИ ПЛАВЛЕНИЯ

Из соотношений, вытекающих из табл. 1 и формулы (5), следует:

$$Q_c/V_T = Q_{пл}/(V_T - V_ж). \quad (10)$$

Равенство (10) показывает, что энергия активации плавильного и сублиминационного механизмов разрушения, отнесенная к объему термофлуктуации, одинакова. Но при реализации первого механизма термофлуктуирует не весь объем твердой фазы — V_T , а только его часть $(V_T - V_ж)$, соответственно преодолевается и меньший потенциальный барьер, равный не Q_c , а $Q_{пл}$. То есть энергия активации разрушения около точки плавления близка к энергии плавления, а на удалении от нее — к энергии сублимации. Это следует из выражения (5), согласно которому работа по преодолению малого барьера равна $P_{max}(V_T - V_ж) t/T_0 = Q_{пл}$, а большего — $P_{max} V_T t/T_0 = Q_{пл}/j_{II}$.

Формулы (6)—(9) описывают плавильный механизм разрушения мерзлых грунтов. Величину t_c (или T_c) ниже температуры плавления, при которой этот механизм сменяется сублиминационным, найдем из совместного решения (4) и (4)', а также (10) при $t = t_c$ (тогда $T = T_c$) и $j = j_{II}$:

$$t_c \approx T_0 j_{II}, \quad (11)$$

$$t_c \approx T_0 Q_{пл}/Q_c, \quad (12)$$

$$T_c \approx T_0 V_ж/V_T. \quad (13)$$

Для льда по формулам (11) и (12) получается: $t_c = -22,7$ и $t_c = -34$ °С. Обе температуры находятся в области (начинающейся с $t = -22$ °С и ниже), в которой давление плавления льда при понижении температуры уменьшается, как у „нормальных“ веществ.

Судя по опытам [Регель и др., 1974], коэффициент перенапряжения ϕ при $T < T_c$, как и при $T = T_c$, не зависит от температуры, но выше в K_1 раз. Тогда с учетом (12):

$$\phi \approx K_1 T_0 / (T_0 - T_c) \approx K_1 V_{ж} / V_{т} \approx K_1 Q_c / Q_{пл}. \quad (14)$$

$1/T_0$ — аналог коэффициента теплового расширения вязкой жидкости, величина которого одинакова в одно- и трехмерной (объемной) задачах. Сходство с вязкой жидкостью утрачивается с понижением температуры. В твердом теле вдали от точки плавления деформация одномерного сжатия или растяжения определяется линейным коэффициентом расширения, составляющим примерно 1/3 объемного [Яворский, Детлаф, 1965]. Следовательно, $K_1 \approx 3$.

Фактических данных для анализа температурно-временной зависимости прочности мерзлых грунтов при $T < T_c$ недостаточно (так же, как и других материалов при $T > T_c$). У металлов же, например, у цинка, серебра, меди, никеля и платины, отношения значений ϕ , найденных по результатам испытаний на прочность [Регель и др., 1974] и вычисленных по формуле (14) при $K_1 = 3$, составляют (в порядке перечисления): 80/60, 74/73, 72/77, 88/89, 230/81 — оба значения, за исключением ϕ платины, отличаются не очень сильно.

Коэффициент перенапряжения ϕ в области разрывов можно также найти, предполагая их квантовый характер и приравнивая энергию разрыва связей атома кванту энергии — $\hbar\nu$ (\hbar — постоянная Планка; $\nu \approx 1/\tau_0 \approx 10^{13}$ с⁻¹). Если допустить, что повышение коэффициента ϕ в области $T < T_c$ относительно его величины при $T = T_c$ (т. е. относительно $Q_c/Q_{пл}$) пропорционально количеству квантов в энергии колебаний атома kT_0 , то K_1 в (14) равен $kT_0/\hbar\nu$. У тех же металлов величина K_1 в этом случае изменяется в пределах 2,5... 4,3, а отношения значений ϕ , найденных по результатам испытаний и расчетов, составили: 80/50, 74/72, 72/74, 88/109, 230/116. Из анализа этих цифр и учитывая невысокую точность определения эталонных значений ϕ из-за осредненности τ_0 [Регель и др., 1974], точность расчетов по формуле (15) можно считать удовлетворительной.

Этих примеров, конечно, недостаточно для универсализации коэффициента ϕ , но они показывают, что параметр ϕ в формуле (1) опреде-

ляется по-разному при $T \geq T_c$ и $T < T_c$, отражая разный характер и механизм разрушения в этих областях.

ПРЕДЕЛЫ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ

При стремлении P и T к максимуму (точке плавления) или минимуму зависимость от них долговечности линеаризуется. Становится возможным примерно оценить пределы изменения τ_n и v с помощью (2). В одном моле — $6 \cdot 10^{23}$ атомов ($\approx 10^{24}$), минимальная деформация (межатомное расстояние) $h_0 = 10^{-8}$ см, минимальная долговечность $\tau_0 = 10^{-13}$ с. Подставив эти цифры в (2), определяем максимальную долговечность моля вещества: $\tau_{max} = 10^{-13} \cdot (10^{24} - 1) = 10^{11}$ с. Максимальная долговечность тела, состоящего из n молей, равна $n\tau_{max}$. Тогда минимальная скорость деформации $v_0 = h_0/\tau_{max} = 10^{-19}$ см/с, а максимальная — в 10^{24} раза больше: $v_{max} = 10^5$ см/с, что близко к скорости звука в воздухе. Человек слышит звук на частотах $17-2 \cdot 10^4$ Гц, т. е. разрушение „звучит“ при одновременном разрыве от $10^{13}/(2 \cdot 10^4) = 5 \cdot 10^8$ до $6 \cdot 10^{11}$ атомных связей. Из (2) следует постоянство „импульса (ресурса) долговечности“ — его независимость от T и P : $Y_d = \tau_0 \cdot 10^{24} = \tau_{max} \cdot 1$ и равенство v в начале и конце деформационного цикла (при его замыкании) $h/\tau_{max} = h_0/\tau_0 = v_{max} = 10^5$ см/с.

СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Сопоставление результатов расчетов прочности мерзлых грунтов по предлагаемой методике и опытов на ползучесть мерзлых грунтов разного состава при разных температурах и видах напряжения показало хорошую сходимость. Примеры сопоставления приведены на рис. 3 и в табл. 2. С. С. Вялов [1978] проводил опыты по сжатию супеси (расчетное значение $j_n = 0,115$) и сцеплению глины (расчетное значение $j_n = 0,083$) при температуре $-5, -10$ и -20 °С. А. П. Кардымон [1971] определял сопротивление мерзлого песка сдвигу по боковой поверхности металлических моделей свай прямоугольного и квадратного сечения (варианты 1 и 2, см. табл. 2) при $t = -1,3$ °С; Ю. Я. Велли с В. Н. Ивановым [1966] — то же для круглых металлических и бетонных моделей (см. варианты 3 и 4 в табл. 2), замороженных в суглинок при $t = -4,5$ °С. Вычисленные j_n в 1—4 вариантах составили: 0,1; 0,095; 0,127; 0,123.

Хорошая сходимость расчетов параметров длительной прочности по предлагаемым формулам с экспериментальными данными получается и при растягивающих нагрузках. Например, в

Таблица 2. Вычисленные (P , МПа) и фактические (p , МПа) сопротивления мерзлого грунта сдвигу для разной долговечности (τ_n , мин)

τ_n	P_1	p_1	P_2	p_2	τ_n	P_3	p_3	P_4	p_4
30	0,37	0,37	0,45	0,45	42	0,45	0,44	0,55	0,51
60	0,35	0,35	0,43	0,43	60	0,43	0,40	0,52	0,49
120	0,32	0,33	0,41	0,40	222	0,37	0,37	0,50	0,45
180	0,31	—	0,39	0,39	420	0,35	0,34	0,42	0,44
520	0,29	—	0,35	0,35	600	0,32	0,31	0,41	0,43

Таблица 3. Зависимость относительной деформации от времени при разных значениях давления

$j \cdot 10^3$	τ , ч			P , МПа	j_y
	2	4	8		
j_1	6,6/6,3	7/6,9	7,9/7,4	5,2	3
j_2	8/8,5	9,1/9	11/9,5	6	5,5
j_3	2,3/1,9	2,6/2,4	2,9/3	0,7	1,5
j_4	1,7/1,7	1,9/2,2	2,1/2,8	0,6	1

Примечание. Числитель — экспериментальные значения j , знаменатель — вычисленные.

опытах Л. Т. Роман [1987] по растяжению мерзлого торфа величины t/P ($^{\circ}\text{C}/\text{МПа}$) при t , равном -10 ; -8 и -6 $^{\circ}\text{C}$, составили: 4,4; 4; 4 для $\tau_n = 5$ мин и 6,6; 6,2; 7 для $\tau_n = 200$ ч. Подставив эти значения t/P в (7) при среднем значении $b = 0,08$, получаем: для $\tau_n = 5$ мин $j_n = 0,107$; для 200 ч $j_n = 0,102$. Подобное сопоставление с другими фактическими данными автор проводил и раньше [Коновалов, 1974, 1991] — результаты аналогичны.

Анализ показывает, что количественная связь долговечности и обобщенной нагрузки (P или T) такова, что изменение долговечности даже в десятки раз мало влияет на прочность, и наоборот — при незначительных изменениях

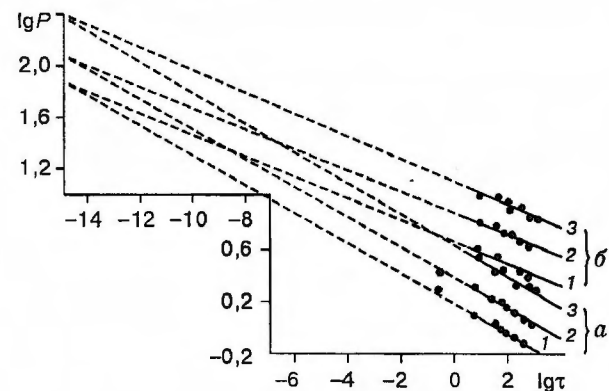


Рис. 3. Логарифмическая зависимость длительной прочности (P_n , МПа) от времени (τ , мин).

a — сжатие супеси, b — сцепление глины. Температура: 1 — -5 $^{\circ}\text{C}$, 2 — -10 $^{\circ}\text{C}$, 3 — -20 $^{\circ}\text{C}$.

нагрузки долговечность меняется во много раз. Поэтому в расчетах целесообразно задаваться долговечностью и определять P или T , а не наоборот.

Сравнение фактических и вычисленных деформаций также показывает их удовлетворительное совпадение. Например, в табл. 3 в числителях приведены величины относительной деформации сжатия супеси для двух значений P по экспериментальным данным С. Э. Городецкого, Е. П. Шушериной [Вялов, 1978] при $t = -20$ $^{\circ}\text{C}$; $\tau_n = 2$ мин; $j_n = 0,13$ — две верхние строки (j_1 и j_2) и Л. Т. Роман [1987] при $t = -4,5$ $^{\circ}\text{C}$; $\tau_n = 15$ мин; $j_n = 0,11$ — две нижние. В знаменателе приведены те же величины, вычисленные по формуле (9).

Количественные закономерности и константы, выявленные из опытов с постоянными T и P , проявляются и при зависимости их от времени τ . Покажем это на примере нагрузки, изменяющейся с постоянной скоростью v_p . Для бесконечно малой долговечности и зависимости P или T от τ допустимо подставлять эти величины в (8) как функции от τ . В нашем случае $P = v_p \tau$, тогда:

$$\Delta \tau = d\tau = \tau_0 (P_{\max}/v_p \tau)^{1/j_n}. \quad (15)$$

После интегрирования и несложного преобразования получаем выражения скоростной зависимости долговечности и прочности:

$$\tau_n = (\tau_0/z)^z (P_{\max}/v_p)^{z/j_n}, \quad (16)$$

$$P = (\tau_0 v_p/z)^z (P_{\max})^{z/j_n}, \quad (17)$$

где $z = j_n/(1 + j_n)$.

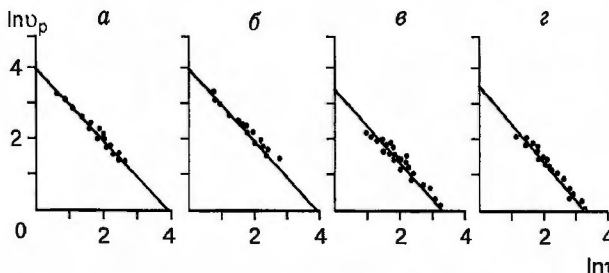


Рис. 4. Зависимость долговечности (τ_n , мин) от скорости загрузки (v_p , 0,1 МПа/мин).

a, b — супесь; v, z — армированный лед.

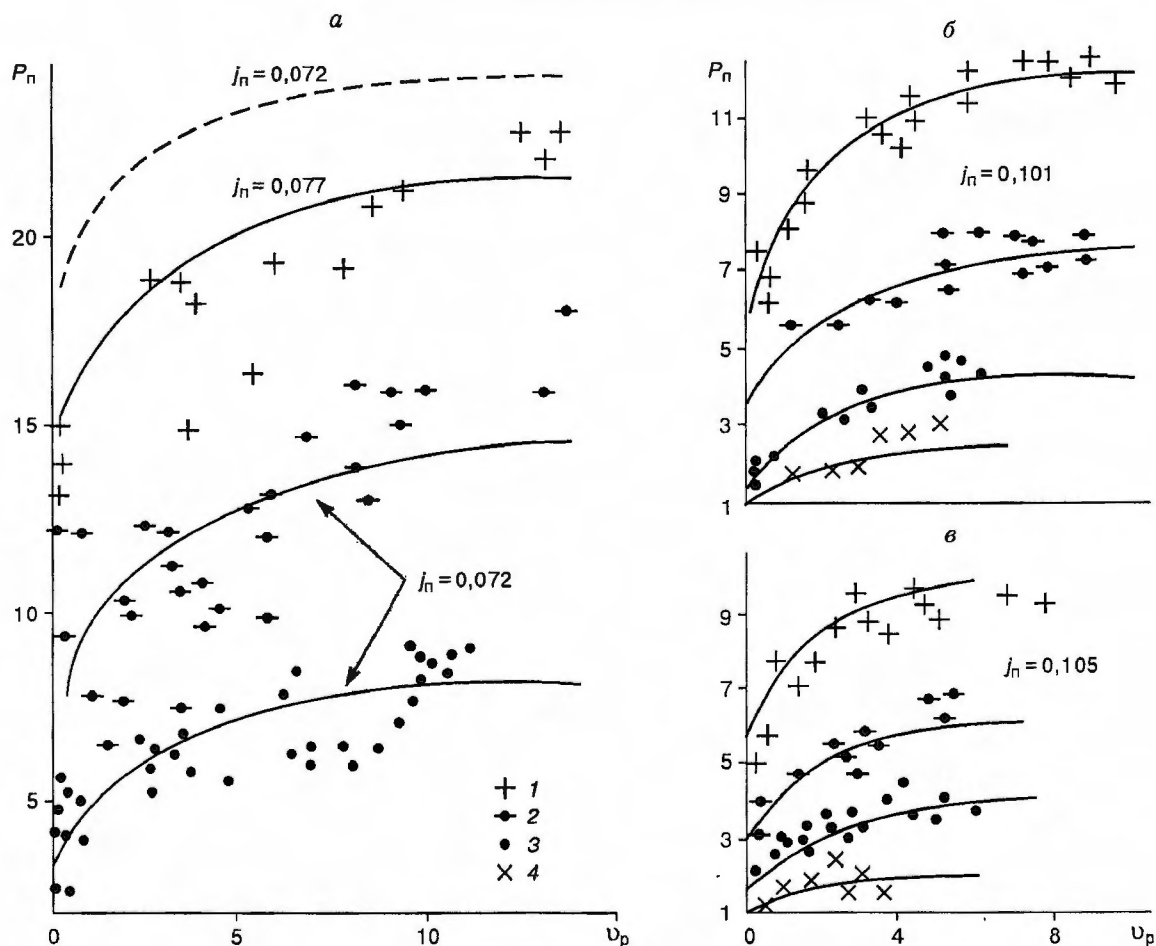


Рис. 5. Зависимость P_n (МПа) от скорости загрузки (v_p , МПа/с).

a — песок, b — супесь, v — суглинок. Температура: 1 — -15 , 2 — -8 , 3 — -4 , 4 — -2 °С.

ВЫВОДЫ

Автором совместно с С. М. Пахомовым проведены опыты по одноосному сжатию четырех партий образцов суглинка при температуре $-3,3$ (партия a) и $-3,9$ °С (партия b), а также льда в форме кубиков высотой 10 см, армированного прослоем дорнита на отметке 7 и 3 см при температуре $-3,4$ °С (партии v и z). Графический вид взаимосвязи долговечности и скорости загрузки в логарифмическом масштабе по данным этих опытов показан на рис. 4; линии соответствуют расчету по формуле (16) при $j_n = 0,07$ для суглинка и 0,075 для льда.

Обширное экспериментальное исследование скоростной зависимости прочности провел А. Г. Дерюгин [1981]. Его результаты приведены на рис. 5, $a-v$. Сплошные линии — расчет по формуле (17). Графики демонстрируют хорошее совпадение экспериментальных и теоретических результатов.

Резюмируя выводы по каждому разделу, можно выделить главные.

1) Деформация и разрушение — единый, затухающе циклический процесс, обусловленный внешним воздействием (тепловым, механическим и т. д.) и фактором времени.

2) Существуют два механизма разрушения — плавильный и сублимационный, действующие, соответственно, вблизи и в удалении от точки плавления. Получено универсальное выражение связи долговечности, температуры, давления и деформации, учитывающее различие этих механизмов.

3) Предлагаемая модель, судя по сравнению с фактическими данными, в общем, несмотря на определенную схематизацию, адекватна реальности, внутренне непротиворечива и согласуется с кинетической концепцией прочности и теорией фазовых превращений, фактически объединяя их в единое целое.

Литература

- Базаров И.П. Термодинамика. М., Высшая школа, 1991, 375 с.
- Велли Ю.Я., Иванов В.Н. Результаты полевых и лабораторных исследований сил смерзания мерзлых грунтов // Материалы 4-го совещания-семинара по обмену опытом строительства в суровых климатических условиях. Красноярск, КПСНИИП, 1966, с. 3—23.
- Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М., Высшая школа, 1978, 448 с.
- Вялов С.С. Реология мерзлых грунтов. М., Стройиздат, 2000, 464 с.
- Дерюгин А.Г. Исследование скоростной зависимости прочности мерзлых грунтов // Инженерные исследования мерзлых грунтов. Новосибирск, Наука, 1981, с. 53—79.
- Кардымон А.П. Условия лабораторного определения сопротивления мерзлого грунта сдвигу // Строительство в районах Сибири и Крайнего Севера. Красноярск, КПСНИИП, 1971, вып. 19, с. 111—122.
- Коновалов А.А. К учету изменения температуры вечномерзлого грунта во времени при определении его длительной прочности // Строительство в районах Сибири и Крайнего Севера. Красноярск, КПСНИИП, 1974, вып. 29, с. 139—151.
- Коновалов А.А. Прочностные свойства мерзлых грунтов при переменной температуре. Новосибирск, Наука, 1991, 93 с.
- Коновалов А.А. Параметры фазового равновесия // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли. Новосибирск, Наука, 1997, с. 234—240.
- Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М., Наука, 1974, 560 с.
- Роман Л.Т. Мерзлые торфяные грунты как основания инженерных сооружений. Новосибирск, Наука, 1987, 193 с.
- Цытович Н.А. Механика грунтов. М., Высшая школа, 1983, 287 с.
- Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М., Наука, 1965, 847 с.

*Поступила в редакцию
15 августа 2001 г.*