

*Л.Т. Роман, д. г-м. н., профессор
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия*

МОДЕЛЬ ПОЛЗУЧЕСТИ И ПРОЧНОСТИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

На основе экспериментальных и теоретических исследований деформации и разрушения мерзлых грунтов с позиций кинетической теории прочности твердых тел установлена взаимосвязь между скоростью ползучести и снижением прочности во времени мерзлых грунтов. Разработана модель, учитывающая совместное проявление указанных процессов. Получены уравнения длительной деформации и прочности, энергии активации, параметры этих уравнений, позволяющие прогнозировать несущую способность мерзлых грунтов как оснований сооружений.

Ключевые слова: *реологические свойства мерзлых грунтов, кинетика ползучести и разрушения, энергия активации.*

*Л.Т. Роман, д. г-м. н., профессор
Московський державний університет імені М.В. Ломоносова, Росія*

МОДЕЛЬ ПОВЗУЧОСТІ І МІЦНОСТІ МЕРЗЛИХ ҐРУНТІВ

На основі експериментальних і теоретичних досліджень деформації і руйнування мерзлих ґрунтів із позицій кінетичної теорії міцності твердих тіл встановлено взаємозв'язок між швидкістю повзучості і зниженням міцності у часі мерзлих ґрунтів. Розроблено модель, що враховує сумісне проявлення вказаних процесів. Отримано рівняння довготривалої деформації та міцності, енергії активації, параметри цих рівнянь, що дозволяють прогнозувати несучу здатність мерзлих ґрунтів як основ споруд.

Ключові слова: *реологічні властивості мерзлих ґрунтів, кінетика повзучості і руйнування, енергія активації.*

*L.T. Roman, Prof., DrSc.
Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Russia*

MODEL OF CREEP AND STRENGTH OF FROZEN SOILS

Based on experimental and theoretical studies of deformation and failure of frozen soil from the standpoint of the kinetic theory of the strength of solids revealed a relationship between creep rate and decrease the strength in time of frozen soils. Developed a model that includes the simultaneous manifestation of these processes. Equations are obtained long-term deformation and strength of the activation energy, the parameters of these equations to predict the bearing capacity of frozen soils as base structures.

Keywords: *rheological properties of frozen soils, kinetics of creep and failure, activation energy.*

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными практическими заданиями. Замерзание грунтовой влаги цементирует дисперсные частицы, увеличивая прочность мерзлого грунта по сравнению с талым. Однако, вместе с тем, лед как идеальное реологическое тело обуславливает проявление реологических свойств мерзлыми грунтами таких, как ползучесть, снижение прочности и релаксация напряжений во времени. Поэтому важной практической задачей является разработка достоверных методов, позволяющих по опытным данным, получаемым за небольшой период времени (от нескольких часов до нескольких суток), определять долговечность многолетнемерзлых грунтов на срок эксплуатации сооружений. Усовершенствование прогнозных методов возможно на основе познания природы прочности мерзлых грунтов как многокомпонентной динамической системы. Одним из направлений, позволяющих

углубить наши представления о процессе разрушения, является рассмотрение этого процесса с позиций кинетики, учитывающей термофлуктуацию.

Анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение проблемы. Методы прогноза деформации и прочности мерзлых грунтов. Реологическое направление в механике грунтов, созданное в конце 50-х годов XIX века под руководством С.С. Вялова [1, 2, 3], стало общепризнанным в мире. Накопленные результаты экспериментальных и теоретических исследований позволили получить ряд уравнений длительной деформации и прочности. При этом они базировались на классических теориях упругости, пластичности, ползучести, упруго-вязкого течения. За основу принимались теории, уравнения которых доведены до параметрического вида. Разработан ряд феноменологических уравнений. Вывод уравнений и способы обработки опытных данных для получения параметров приведены в работах [2, 3, 4]. Также разработаны способы применения методов температурно-, напряженно-, засолено- временных аналогий для прогноза длительной деформации и прочности мерзлых грунтов, основанные на закономерностях увеличения деформации и снижения прочности при повышении температуры, напряжения и увеличения концентрации порового раствора [4]. Кроме механического подхода к прогнозу деформации и прочности мерзлых грунтов, некоторыми исследователями рассматривалось влияние микропроцессов, происходящих при ползучести и разрушении в зависимости от внешней нагрузки и температуры. В ряде этих работ [5, 6, 7 и др.] оценивалась энергия активации по скорости ползучести на основе теории скорости процессов. При этом отмечается большой разброс и непомерно высокие ее значения по сравнению с твердыми однородными материалами. В работах С.С. Вялова [1, 2, 3], А.М. Фиша [8] параметры феноменологического уравнения длительной прочности выражались функцией энергии активации в предположении, что разрушение активируется внешней нагрузкой.

Предпосылки применения кинетической теории прочности для мерзлых грунтов. В данной работе показана возможность и разработаны предпосылки применения к мерзлым грунтам теории прочности твердых тел, разработанной С.Н. Журковым [9], и подтвержденной большим числом опытных данных, анализ которых изложен в работе В.Р. Регеля, А.И. Слущера, Э.Е. Томашевского [10]. В ее основе лежит атомно-молекулярный подход к объяснению процесса разрушения.

Этот процесс рассматривается как термофлуктуационный, учитывающий тепловое движение атомов. Внешняя нагрузка взаимодействует не со статической, а с подвижной системой атомов. Часть атомов в каждый момент времени проявляет энергетические флуктуации, т.е. энергетические всплески, – отклонения колебаний от средних значений. Внешняя нагрузка препятствует восстановлению нарушенных флуктуацией межатомных связей. Со временем количество разорванных межатомных связей накапливается даже при постоянной нагрузке, что и приводит к разрушению. Такой подход четко раскрывает роль времени в развитии ползучести и потере прочности, т.е. объясняет проявление твердыми телами реологических свойств.

Феноменологическое уравнение долговечности, полученное в соответствии с этой теорией, имеет вид

$$t = t_0 \exp \frac{U_0 - \gamma \sigma}{kT}, \quad (1)$$

где t – период от начала приложения внешней нагрузки до разрушения, с; t_0 – период свободного колебания атомов, равный $10^{-12} - 10^{-13}$ с; U_0 – начальная энергия активации, ккал/моль; γ – коэффициент концентрации напряжений, ккал·мм²/(моль·кг); σ – напряжение от внешней нагрузки, кг/мм²; k – постоянная Больцмана, равная $3,29 \cdot 10^{-24}$ ккал/К; T – абсолютная температура, К.

Согласованность уравнения (1) с экспериментом требует соблюдения двух условий, выявляемых графической обработкой опытных данных:

1) зависимости $\sigma - \lg t$ – линейны и при различной температуре образуют пучок прямых с единым полюсом, имеющим временную координату, равную $\lg t_0$;

2) зависимости $\lg t - 1/T$ при заданном в опытах напряжении линейны и также сходятся в едином полюсе, имеющем координаты $\lg t_0 - \sigma_0$.

Начало исследований, направленных на установление возможности использования кинетической теории применительно к мерзлым грунтам относится к 1975 году [11].

В дальнейшем в работах А.А. Коновалова основное внимание уделяется теоретическим подходам [12].

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается статья. В наше время не разработаны способы прогноза длительной прочности и деформации мерзлых грунтов.

Цель наших исследований – получить способы прогноза длительной прочности и деформации мерзлых грунтов по опытным данным для определения их несущей способности как оснований сооружений.

Анализ экспериментальных определений времени до разрушения различных видов мерзлых грунтов при различных видах испытаний показали, что закономерности $\sigma - \lg t$ и $\lg t - 1/T$ для них нелинейные (рис. 1, 2).

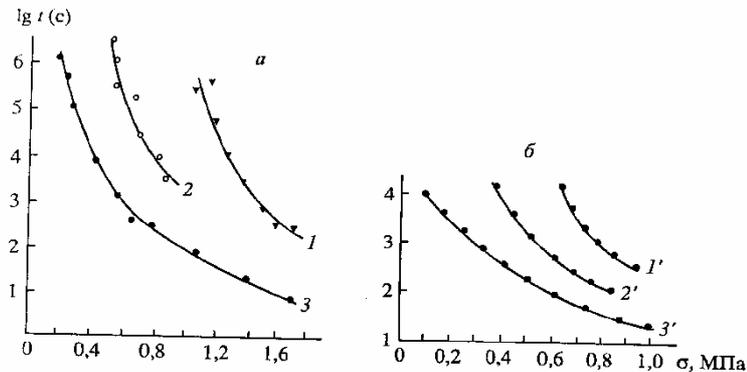


Рисунок 1 – Зависимости $\sigma - \lg t$ для: а – мерзлого торфа, 1 – разрыв, $\theta = -8^\circ\text{C}$; 2 – сдвиг по поверхности смерзания, $\theta = 5^\circ\text{C}$; 3 – вдавливание сферического штампа, $\theta = -5^\circ\text{C}$; б – засоленного суглинка при $D_{sal}, \%$: 1' – 0,0; 2' – 0,5; 3' – 1,0 (вдавливание сферического штампа)

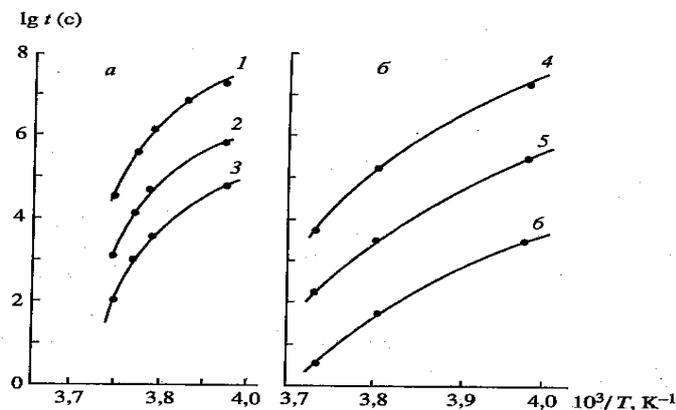


Рисунок 2 – Характер зависимости долговечности мерзлых грунтов от температуры: а) мерзлый торф (растяжение) при напряжении σ , МПа: 1 – 1,0; 2 – 1,99; 3 – 3,16; б) супесь (одноосное сжатие) при напряжении σ , МПа: 4 – 3,15; 5 – 5,66; 6 – 10,0

Основная причина нелинейности обусловлена изменением структуры и фазовыми переходами влаги в мерзлых грунтах в процессе воздействия внешних нагрузок и колебания отрицательной температуры: меняется соотношение между содержанием незамерзшей воды и льда, происходит уплотнение и разрушение агрегатов грунта, меняются физико-химические потенциалы между компонентами. Кроме того, как и во всех однородных твердых телах, в области малых напряжений от внешней нагрузки происходит восстановление межатомных связей, нарушенных в процессе термофлуктуационного распада. Уравнение (1) не учитывает такого восстановления.

Кинетическая модель ползучести и прочности мерзлых грунтов.

Анализ результатов исследований длительной прочности (σ) и ползучести (ϵ) мерзлых грунтов в условиях различных видов испытаний (одноосного и 3-осного сжатия, сдвига, вдавливания сферического штампа, растяжения) показывает, что в процессе ползучести накапливается количество разорванных связей. Разрушение и деформирование – не автономные процессы. Схема элемента разрушения может быть представлена в виде набора гибких нерастяжимых нитей различной длины, закрепленных между двумя параллельными пластинами (рис. 3).

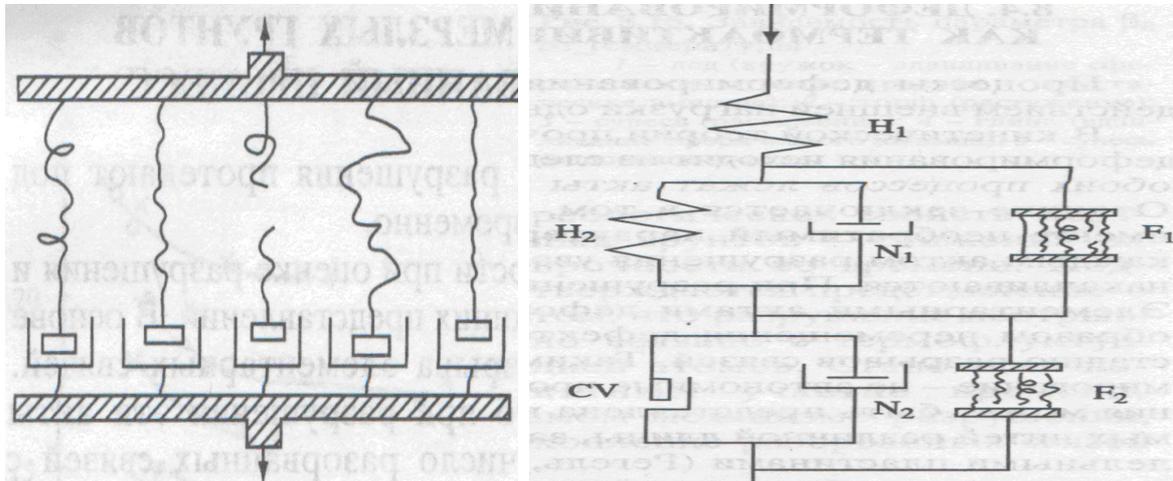


Рисунок 3 – Модель ползучести мерзлого грунта с добавлением элемента разрушения с гибкими и вязкими связями

Деформирование такого элемента не требует усилий до тех пор, пока не натянется какая-либо из нитей. Дальнейшее деформирование невозможно до разрыва натянутой нити. Распределение нитей по длинам и по прочностям может быть самым различным. Прочность нитей определяет не только критическое напряжение, позволяет учитывать временную зависимость прочности. Если добавить в элемент разрушения вязкие элементы, то можно моделировать элемент упрочнения при деформировании, объяснить увеличение хрупкости при понижении температуры и при увеличении скорости деформирования. Включение описанной модели разрушения в реологическую модель С.С. Вялова [15], отображающую сдвиговую ползучесть мерзлых грунтов, качественно изменяет ее (рис. 3). Процесс разрушения лимитирует процессы деформирования в зависимости от вида функции распределения нитей в элементе разрушения и их относительной прочности по отношению к свойствам вязкого элемента. Если в исходном состоянии нити не натянуты и значительно расслаблены, то процессы разрушения не оказывают влияния на деформирование в начальной стадии (неустановившегося течения). Только после натяжения нитей их разрушение будет определять условия ползучести. Рассмотренная модель выявляет определяющий процесс при деформировании и разрушении. Предположим, что деформирование является ведущим процессом, т. к. пластическое деформирование приводит к натяжению нитей и этим подготавливает их разрыв. Но такой вариант не единственно возможный. Можно предположить, что ведущим процессом

является разрушение, т. к. в натянутом состоянии нити препятствуют деформированию. Пока не произойдет разрыв, деформирование невозможно. В соответствии с кинетической концепцией ведущим является процесс, развитие которого занимает основной период по отношению к общей долговечности образца под нагрузкой. Основное время может тратиться на деформирование вязкого элемента, если сопротивление перемещению поршня в нем значительно больше, чем прочность нитей в элементе разрушения, и наоборот, основное время может тратиться на разрыв нитей в элементе разрушения, если они достаточно прочны. Таким образом, возможны различные случаи, определяющие роль процессов деформирования и разрушения в зависимости от условий испытания (видов напряженного состояния, температуры и т. д.). Ключевым же является то обстоятельство, что в основе обоих процессов лежит термофлуктуационный механизм.

Опытные закономерности. Прогнозные уравнения. Экспериментально установлено, что для различных видов мерзлых грунтов при различных видах испытаний (одноосное сжатие, растяжение, сдвиг, вдавливание шарикового штампа, трехосное сжатие) зависимость скорости установившейся ползучести ($\dot{\epsilon}$) от напряжения (σ) при данной температуре (θ) в логарифмическом масштабе является зеркальным отражением соответствующей зависимости для долговечности (t) (времени от начала приложения нагрузки до разрушения). Пример указанных графиков приведен на рисунках 4 и 5.

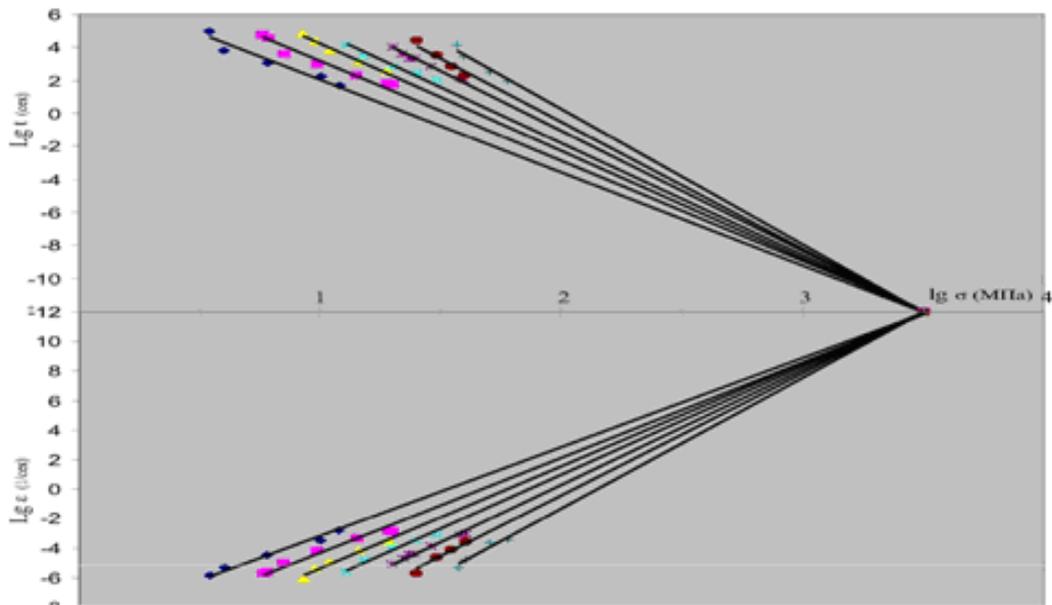


Рисунок 4 – Зависимости $lgt - lg \sigma$, $lg \dot{\epsilon} - lg \sigma$ для мерзлого ила при различной температуре (от -0.5 до $-10^{\circ}C$)

Таким образом, первое требование – линейность зависимости времени до разрушения от напряжения – для мерзлых грунтов достигается при обработке опытных данных в логарифмических координатах. Зависимость же энергии процесса разрушения от внешнего напряжения и температуры, как показано нами ранее [2], выражается в координатах: $lgt - 10^2 / T\beta_{\theta}$ (рис. 6). Представленные закономерности (рис. 4, 5, 6) позволяют получить уравнения длительной прочности, скорости ползучести и энергии активации (2).

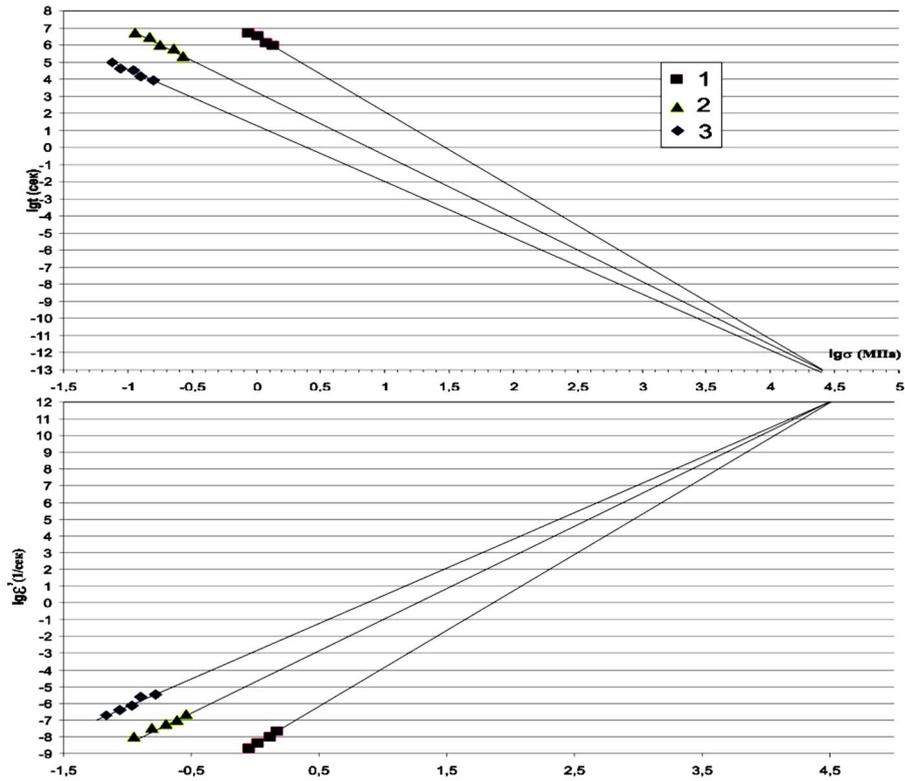


Рисунок 5 – Зависимость $\lg t - \lg \sigma_e$ и $\lg \dot{\epsilon} - \lg \sigma_e$ мерзлого засоленного суглинка с концентрацией порового раствора: 1 - 0,0042; 2 - 0,0005; 3 - 0,0003 (одноосное сжатие, $\theta = -3^0\text{C}$)

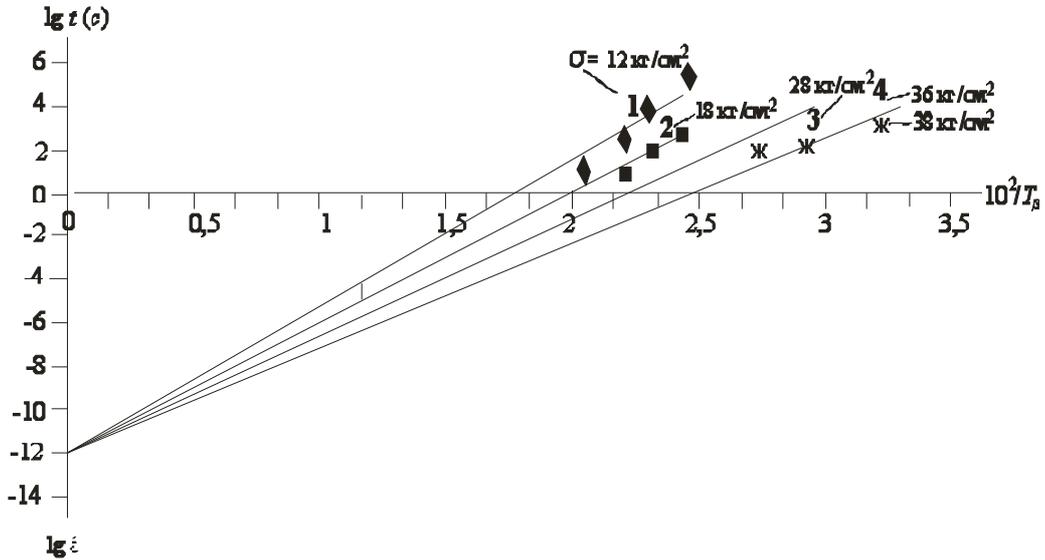


Рисунок 6 – Зависимость $\lg t - 10^2 / T \beta_\theta$ для мерзлого ила (одноосное сжатие при напряжении, (МПа))

Прогнозные уравнения длительной прочности (σ_t), долговечности (t), скорости ползучести ($\dot{\epsilon}$), энергии активации (U_σ , U_ϵ) приведены ниже

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \frac{\sigma_0}{(t/t_0)^\beta} ; & \sigma_t &= \frac{\sigma_0}{(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^\beta} ; \\ t &= t_0 \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_t} \right)^{1/\beta} ; & \dot{\epsilon} &= \dot{\epsilon}_0 \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_t} \right)^\beta ; \end{aligned} \quad (2)$$

$$U_\sigma = 2.3RT\beta(\lg t - \lg t_0) , \quad U_\epsilon = 2.3RT\beta(\lg \dot{\epsilon} - \lg \dot{\epsilon}_0)$$

где σ_0 – напряжение, соответствующее абсциссе полюса пучка прямых; t_0 – период свободного колебания атомов, равный 10^{-12} с; $\dot{\epsilon}_0$ – скорость ползучести, равная 10^{-12} с⁻¹; β – наклон опытных прямых; T – абсолютная температура, К; R – универсальная газовая постоянная = $2 \cdot 10^{-3}$ ккал/моль*К.

Величины $t_0 = 10^{-12}$ с и $\dot{\epsilon}_0 = 10^{-12}$ проверены экспериментально. Отклонения прогнозных значений длительной прочности не превышают точности опытов [17].

Накопленные опытные данные длительной ползучести и прочности мерзлых грунтов и льда позволили определить параметры полученных уравнений (табл. 1, рис. 7, 8) и энергию активации (рис. 9).

Начальная энергия активации U_0 , полученная экстраполяцией зависимости $U_\sigma - \sigma$ к оси U_σ , для незасоленных грунтов находится в пределах 3,55 – 6,0 ккал/моль, что сопоставимо с энергией водородных связей во льду, равной 4,0 – 4,5 ккал/моль, и с начальной энергией активации воды (по Эйрингу ≈ 5 ккал/моль). В засоленных грунтах значение U_0 уменьшается примерно до 1,8 – 2,5 ккал/моль [16, 17]. Очевидно, это связано с тем, что растворенные соли связывают молекулы воды, подтверждением чему служит понижение температуры замерзания растворов.

Таблица 1 – Опытные значения параметров долговечности мерзлых грунтов

Характеристики грунта, вид испытания, диапазон температуры (°С)	$\lg \sigma_0$, (10^5 Па)	U_0 , ккал/моль	Авторы опытных данных
Торф пушицево-сфагновый, $\rho = 0,88$ г/см ³ ; $W_{tot} = 4,25$ θ, °С: – 4,5 ÷ –20; $\rho_s = 1,57$ г/см ³ (растяжение)	4,32	4,8	Л.Т. Роман [4]
Лед речной; –2,6; –3,8 °С	5,1	5,8	Е.И. Гайдаенко [13]
Лед (эмиссионная акустика)	–	5,75	Ю.К. Зарецкий, Б.Д. Чумичев [14]
Супесь, $\rho = 1,99$ г/см ³ ; $W_{tot} = 0,26$; $\rho_s = 2,66$ г/см ³ θ, °С: –5 ÷ –20 (одноосное сжатие)	3,8	3,6	С.С. Вялов, Ю.К. Зарецкий, С.Э. Городецкий [15]
То же (растяжение)	3,8	4,8	
Глина, $\rho = 1,95$ г/см ³ ; $W_{tot} = 0,4$; $\rho_s = 2,71$ г/см ³ (вдавливание сферическим штампом) (θ, °С: –5 ÷ –20)	3,65	3,5	
Ил, $\rho = 1,20$ г/см ³ ; $W_{tot} = 0,405$; $\rho_s = 2,68$ г/см ³ (одноосное сжатие) (θ, °С: –0,5 ÷ –10)	3,5	3,45	Yu Zhu, D. Carbee [7]

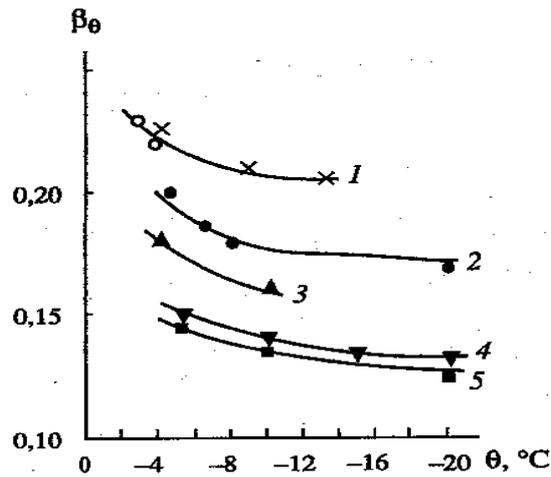


Рисунок 7 – Зависимость параметра β_{θ} от температуры:
 1 – лед (кружок – вдавливание сферического штампа, крестик – акустическая эмиссия); 2 – торф (растяжение); 3 – супесь (растяжение);
 4 – глина (вдавливание сферического штампа); 5 – супесь (одноосное сжатие)

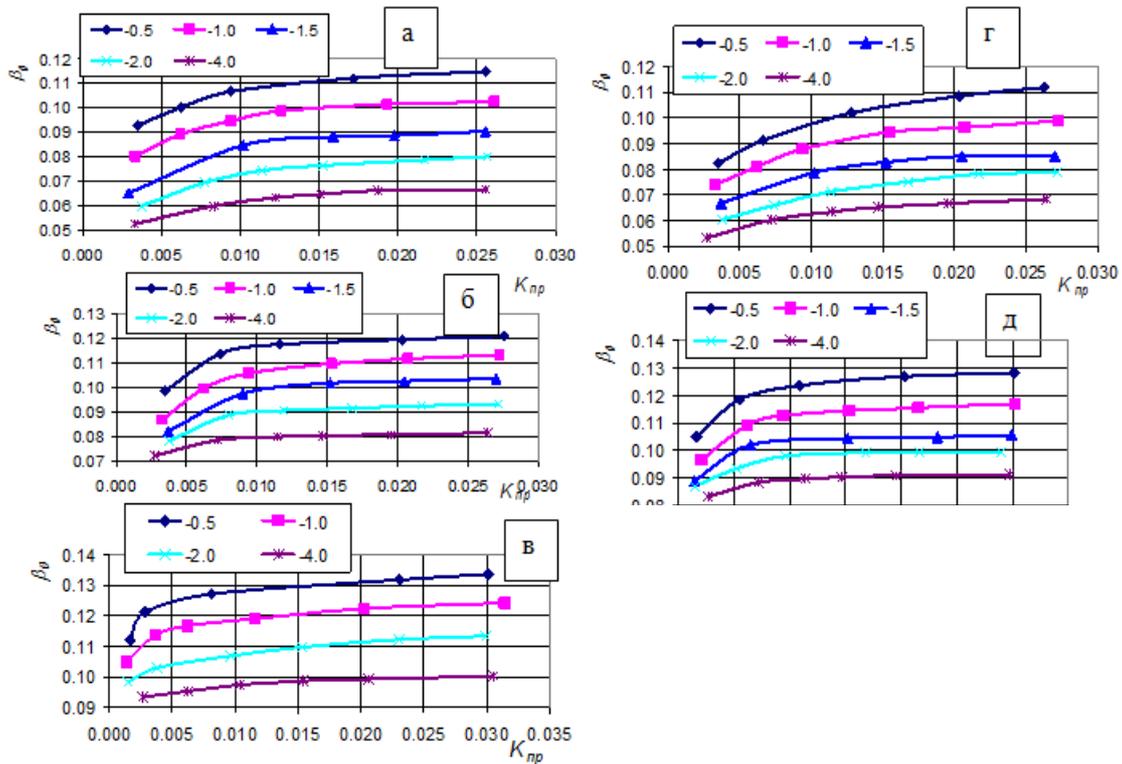


Рисунок 8 – Зависимость параметра β_{θ} от концентрации порового раствора ($K_{пр}$) и температуры: а – мелкий песок; б – пылеватый песок; в – супесь; г – легкий суглинок; д – тяжелый суглинок

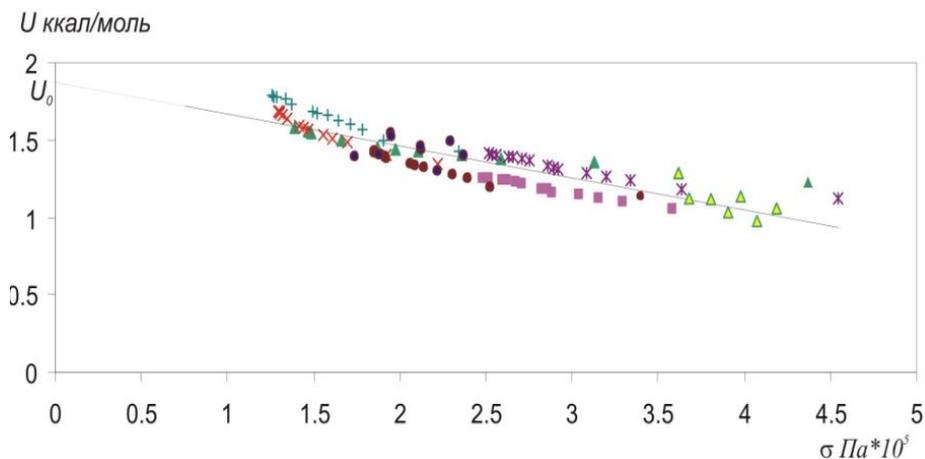
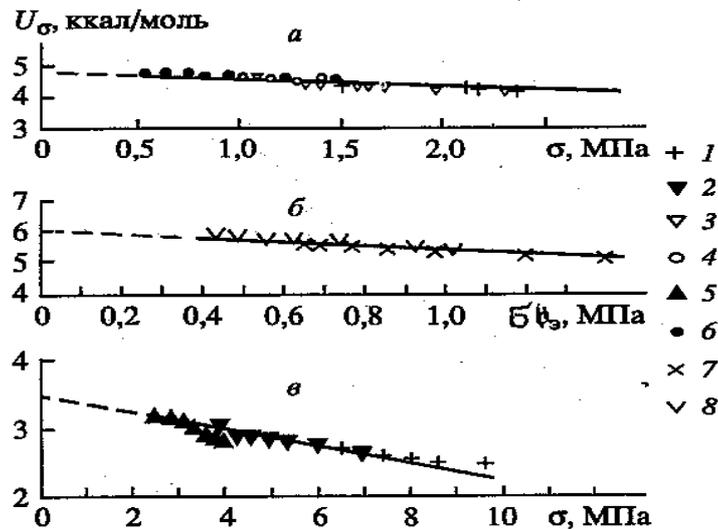


Рисунок 9 – Зависимость U_0 от σ : для: А – незасоленных: а – торфа, б – льда, в – супеси, при $\theta, ^\circ\text{C}$: 1 – -20; 2 – -10; 3 – -8; Б – засоленного суглинка при $\theta, ^\circ\text{C}$: -1 ÷ -4

Выводы. Приведенные данные позволяют предположить, что разрушение мерзлых грунтов происходит по контакту льда с жидкой пленкой воды.

Зависимости параметра β_θ от температуры показывают, что полученные кривые подобные. Это дает основание считать, что разрушается один и тот же компонент грунта. Однако темп разрушения, определяемый абсолютными значениями β_θ , различен: более высокий для льда, торфа и засоленных грунтов. Для менее прочных грунтов характерно более высокое значение σ_0 . Возможно это вызвано тем, что в минеральных грунтах большую часть нагрузки воспринимают минеральные частицы, концентрация напряжений, приходящаяся на пленку воды, меньше, что и обуславливает для них более низкое значение σ_0 .

Литература

1. Вялов, С.С. Реологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов / С.С. Вялов. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 188 с.
2. Вялов, С.С. Реологические основы механики грунтов / С.С. Вялов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
3. Вялов, С.С. Реология мерзлых грунтов / С.С. Вялов. – М.: Стройиздат, 2000. – 463 с.

4. Роман, Л.Т. *Механика мерзлых грунтов* / Л.Т. Роман. – М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2002. – 426 с.
5. Andersland, O. *Stress effect on creep rates of a frozen clay soil* / O. Andersland, Akili // *Geotechnique*. – London, 1967. – Vol. 17. – P. 27–39.
6. Mitchell, Ja. *Soil creep as a rate process* / Ja Mitchell., R. Campanella, A. Singh // *Soil mechanics and foundations division*. – USA: Jannary, 1968. – P. 231–253.
7. Zhu, J. *Creep and strength behavior of frozen silt in uniaxial compression* / J. Zhu, D.L. Carbee // USA: CRREL, 1987. – № 1. – P. 67–77.
8. Fish, A.M. *Determination of the failure activation energy of frozen soils* / A.M. Fish // *Proc. 2-nd Intern. Symp. Ground Freezing*. – Frondheim, Norway, 1980. – P. 95–108
9. Журков, С.Н. *Реология грунтов. Вестник АН СССР* / С.Н. Журков, 1957. – Т. XIII. – 78 с.
10. Регель, В.Р. *Кинетическая природа прочности твердых тел* / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
11. Коновалов, А.А. *Определение параметров в уравнении длительной прочности вечномерзлых грунтов* / А.А. Коновалов, Л.Т. Роман // *Тр. научн.-техн. совещ. по основаниям и фундаментам*. – М.: НИИОСП, 1975. – С. 87–89.
12. Коновалов, А.А. *К теории прочности мерзлого грунта* / А.А. Коновалов // *Криосфера Земли*, 2009. – № 1. – Т. XIII. – С. 31–39.
13. Гайдаенко, Е.И. *Исследование льдов в качестве основания сооружений* / Е.И. Гайдаенко. – Новосибирск: Наука, 1978. – 81 с.
14. Зарецкий, Ю.К. *Кратковременная ползучесть льда* / Ю.К. Зарецкий, Б.Д. Чумичев. – Новосибирск: Наука, 1986. – 184 с.
15. Вялов, С.С. *Расчеты на прочность и ползучесть при искусственном замораживании грунтов* / С.С. Вялов, Ю.К. Зарецкий, С.Э. Городецкий. – Л.: Стройиздат, 1981. – 199 с.
16. Роман, Л.Т. *Влияние засоленности на разрушение мерзлых грунтов* / Л.Т. Роман, Д.Н. Кривов // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 2007. – № 5. – С. 27–29.
17. Кривов, Д.Н. *Закономерности деформирования и разрушения грунтов района Большеземельской тундры: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. геол.-минер. наук: 25.00.08* / Д.Н. Кривов. – М.: МГУ, 2009. – 25 с.

Надійшла до редакції 01.10.2012

© Л.Т. Роман