

УДК 539.383

**В. П. ЕПИФАНОВ**

## **ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЕ РЕОЛОГИЧЕСКОЕ СООТНОШЕНИЕ ДЛЯ ЛЬДА**

При решении задач инженерной гляциологии в узком интервале величин, характеризующих условия нагружения, можно применять известные определяющие модели механического поведения льда. Однако оценочные расчеты вне обозначенного интервала, как правило, показывают большие расхождения с реальными нагрузками и деформациями.

В публикуемой работе с помощью методов объемного зондирования и акустической эмиссии выявлены закономерности разрушения льда и изучены процессы, предшествующие разрушению. Получена обобщенная зависимость напряжений от температуры и скорости деформации для льда в интервалах от  $-60$  до  $0^\circ\text{C}$  и от  $10^{-14}$  до  $10\text{ с}^{-1}$  соответственно.

**1. Нелинейные свойства льда.** При оценке прочностных свойств льда по данным эксперимента возникает вопрос: насколько адекватно теоретические модели отражают реальные свойства льда?

Например, при испытании ледяных клавиш и балок на изгиб [1] слои в зависимости от удаленности их от нейтральной линии оказываются в сжатом или растянутом состоянии. Считают, что характеристики на сжатие и растяжение у льда различны [2, 3]. Уже одно это делает задачу об изгибе ледяных балок сложной.

Достоверность рассчитанных по линейной модели Бюргерса механических характеристик льда (модуля Юнга, коэффициента вязкости, времени релаксации и энергии активации) для разных условий деформирования, до четырехточечному нагружению [4] была проверена в экспериментах с консольным нагружением. Оказалось, что экспериментальный прогиб не совпадает с расчетным значением. К тому же выявлена зависимость деформационных свойств от величины нагрузки, что свойственно принципиально нелинейным телам. По результатам этих экспериментов был сделан вывод об ограниченной возможности использования линейных моделей.

Применение степенных соотношений с постоянными коэффициентами, например соотношения Глена, также не является решением проблемы, поскольку даже в двойных логарифмических координатах зависимости скорости деформации от напряжения оказываются нелинейными [5].

В законе Глена недостаточно учитываются внешние и внутренние факторы: температура и структура льда. Некоторые гляциологи считают правомочным применять это эмпирическое соотношение только для области развитой ползучести [2], принимая  $n=3, 2$ , но и в этом случае сохраняются трудности в интерпретации физического смысла коэффициентов, а также практического использования.

В реальных условиях каждому слою ледяного покрова соответствуют своя плотность, температура, структурные особенности и механические свойства [6]. Количественная оценка показала, что максимальное изменение предельных напряжений в диапазоне скоростей от  $10^{-7}$  до  $10^{-2}\text{ с}^{-1}$  составляет около 600% и расхождение экспериментальных величин с расчетными по теории упругости для консольной балки составляет до 700%. Это отражает несоответствие между реальным льдом и его моделью. К тому же необходимо отметить, что зависимость деформации от усилия

при испытании консольной балки часто оказывалась нелинейной, регистрировались сигналы акустической эмиссии [7]. Эти наблюдения подтверждаются лабораторными исследованиями [6].

Из рассмотренных экспериментальных фактов следует, что линейные модели не адекватно описывают механические свойства льда, их применение ограничено узкими интервалами температур, напряжений и другими условиями нагружения. Аппроксимация экспериментальных результатов соотношениями степенного вида также имеет ограничения, поскольку коэффициенты по существу являются функциями от многих факторов. Если считать, что нелинейность обусловлена процессами изменения структуры льда под нагрузкой [8], то, по-видимому, рассмотрение процессов, происходящих в деформируемом льде, могло бы способствовать выявлению более приемлемой модели.

**2. Процессы во льду при сжатии, точки подбоя, аппроксимирующие соотношения.** Для наблюдения за изменениями структуры льда в процессе нагружения был разработан метод испытания, основанный на объемном ультразвуковом зондировании образца и регистрации сигналов акустической эмиссии [9, 10]. Синхронно с записью деформационных кривых фиксировали изменения акустических величин (скорости и коэффициента ослабления), а также сигналы акустической эмиссии. При испытаниях на сжатие в режиме постоянных напряжений и квазипостоянных скоростей нагружения наблюдали изменение акустических характеристик. Большое изменение, например, коэффициента ослабления до двух порядков величины, свидетельствует о сложных процессах внутри льда, прежде всего о проявлении пластических свойств льда.

Корреляция между акустическими характеристиками и структурными изменениями была установлена экспериментально и проверена для других материалов [11–13]. Это позволило не только качественно, но и количественно охарактеризовать процессы, происходящие в любой момент нагружения.

Показано, что разрушению льда при сжатии предшествует образование многочисленных трещин, установлен закон накопления повреждений, оценено действительное сечение трещин, их ориентация, в частности показано, как изменяется сечение вновь образующихся трещин в процессе сжатия [14].

Деформационные зависимости обычно имеют вид гладких функций, по которым трудно получить представление о происходящих во льду процессах. По данным акустических измерений на деформационной кривой можно выделить характерные участки, в пределах которых акустические характеристики изменяются монотонно и линейно. Это может быть использовано для нахождения аппроксимирующих соотношений, а также точек подбоя при нагружении по однотипной схеме, но с разными граничными условиями.

Центральным вопросом всех методик испытаний льда является размер образца [15], подготовка его к испытаниям [16], а также отбраковка заведомо дефектных [17]. Разброс предельных напряжений, в том числе и при сжатии [2] обусловлен, по-видимому, в основном нарушением правил работы со льдом, неучетом его специфики, использованием непригодных для льда измерительных ячеек, а также испытанием заведомо разных по структуре и содержанию дефектов образцов.

В равной мере это относится и к натурному эксперименту. Пространственно-временную изменчивость льда и снега в естественных условиях можно определять [18] и учитывать. Современные физические методы допускают быстрое выполнение этих исходных оценок.

Основу льда любой структуры составляет чистый, свободный от примесей лед [19]. Влияние температуры, скорости деформации и других факторов, внешних и внутренних, целесообразно исследовать для чистого льда [20]. Тогда проще понять влияние различных включений и структурных особенностей морского льда и льдокомпозигов.

Учет особенностей льда и совершенствование методик изготовления образцов, их подготовки к испытаниям позволяет получать при измере-

ниях достоверные величины с хорошим воспроизведением от опыта к опыту [21, 22].

Применение метода объемного зондирования позволило исследовать процессы во льду [23, 24], а также выявить основные закономерности деформирования льда.

Ранее было показано [5, 25], что для простых режимов одноосного сжатия, например при постоянном напряжении, определяющее соотношение можно записать используя представления о минимальной скорости ползучести  $\dot{\epsilon}'_{min}$  и времени  $\tau_{min}$  достижения этой скорости после приложения нагрузки

$$\dot{\epsilon}' = \dot{\epsilon}'_{min} \exp[\delta f(\tau)] \quad (1)$$

$$0 \leq \delta \leq 1, f(\tau) = \tau/\tau_{min} - \ln(\tau/\tau_{min}) - 1$$

где  $\dot{\epsilon}'$  — скорость деформации в произвольный момент времени  $\tau$ . Аналогичная зависимость известна для деформирования при постоянной скорости деформации

$$\sigma = \sigma_{max} \exp[-\delta f(\tau)/m] \quad (2)$$

где  $\sigma_{max}$  — максимальные напряжения,  $m$  — коэффициент, характеризующий содержание дефектов в единице объема образца.

Обобщенное определяющее соотношение  $\sigma(\dot{\epsilon}')$  не может быть получено из совместного решения (1) и (2) поскольку спектры времен релаксации  $f(\tau)$  оказываются зависящими от условий деформирования.

На фиг. 1 показаны типичные зависимости приведенного напряжения  $\sigma/\sigma_*$  (1) и приведенной скорости деформации  $\dot{\epsilon}'/\dot{\epsilon}'_*$  (2) от приведенного времени  $\tau$ ;  $\dot{\epsilon}'_*$  — скорость деформации при максимальном напряжении  $\sigma_*$ .

Полное совпадение кривых 1 и 2 наблюдается лишь в точках  $\tau=1$  и  $\tau=0,6$ , которым соответствуют максимальное и пороговое напряжения. Выберем за точку подобия точку максимальных напряжений ( $\tau=1, \sigma=\sigma_*$ ). Скорость деформации в этой точке равна  $\dot{\epsilon}'_*$ .

Зависимость приведенного напряжения  $\sigma/\sigma_*$  от приведенной скорости деформации  $\dot{\epsilon}'/\dot{\epsilon}'_*$  показана на фиг. 2. Использованы результаты испытаний морского льда [5]. Экспериментальные данные представлены точками, линией — расчет по соотношению ( $m$  — коэффициент):

$$\sigma/\sigma_* = \exp[-f(\dot{\epsilon}'/\dot{\epsilon}'_*)/m] \quad (3)$$

$$f(\dot{\epsilon}'/\dot{\epsilon}'_*) = \dot{\epsilon}'/\dot{\epsilon}'_* - \ln(\dot{\epsilon}'/\dot{\epsilon}'_*) - 1$$

Форма соотношения (3) идентична (1) и (2).

Из сопоставления расчетных и экспериментальных результатов видно, что теоретическая зависимость в целом правильно отражает деформационные свойства льда. Наилучшее совпадение расчетной кривой с экспериментом наблюдается в интервале напряжений  $(0,2 \div 1,1)\sigma_*$ , при этом  $m=0,15$ . Для закритической области расчетное соотношение хотя и правильно передает тенденцию величины  $\sigma/\sigma_*$  к уменьшению, однако совпадение с экспериментом достигается при значении  $m=0,25$ . Этот факт еще раз подтверждает важность учета изменений структуры льда в процессе сжатия для построения обобщенной зависимости.

Перепишем (3) в виде

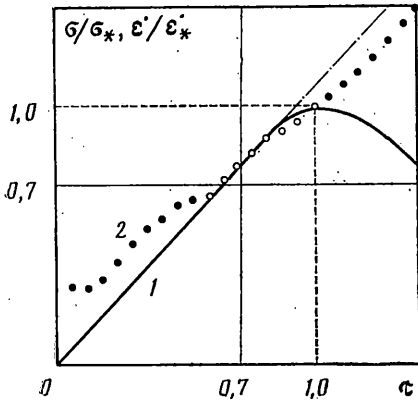
$$\dot{\epsilon}'/\dot{\epsilon}'_* = K(\sigma/\sigma_*)^m, \quad K = \exp[(\dot{\epsilon}'/\dot{\epsilon}'_* - 1)/m] \quad (4)$$

что по форме записи аналогично известному соотношению Глена.

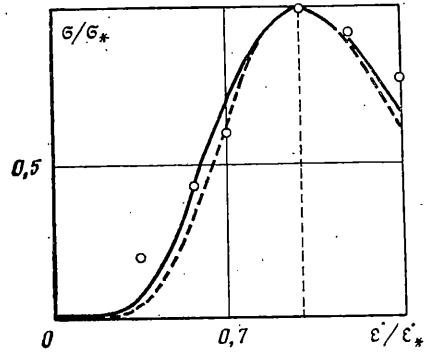
Подобно закону Глена соотношение (4) также является преимущественно эмпирическим, однако коэффициенты, входящие в (4), имеют определенный смысл и могут быть определены из ограниченных стандартных испытаний.

Отмеченные положительные свойства и, особенно удовлетворительное совпадение экспериментальных данных с рассчитанными, позволяют рассматривать соотношение (4) в качестве определяющего.

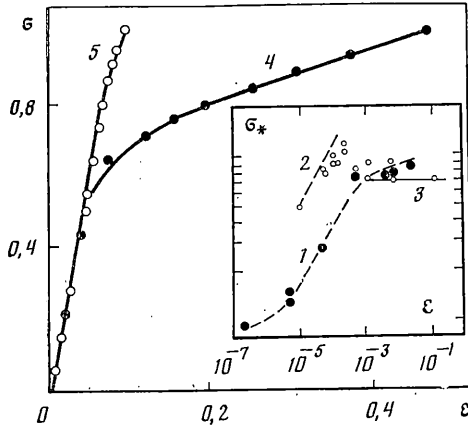
**3. Влияние скорости нагружения на реологические свойства льда.** Проявление льдом пластичности и вязкости должно находить отражение в:



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

сильной зависимости механических характеристик от скорости деформации.

На фиг. 3 показана экспериментальная зависимость предельных напряжений  $\sigma_*$  (МПа) от скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  ( $\text{с}^{-1}$ ) для льда типа А4 при  $-20^\circ\text{C}$  (линия 1). Аналогичного вида зависимости получены также для льда другой структуры при других условиях испытания [6]. В области малых скоростей деформации можно отметить согласованность линий 1 и 2: возрастание  $\sigma_*$  с увеличением  $\dot{\epsilon}$ . Количественное расхождение объясняется разной структурой льда и условиями нагружения.

По мнению некоторых исследователей [26] в области скоростей деформации  $10^{-3}$ – $10^{-4}$   $\text{с}^{-1}$  наблюдается максимум на зависимости  $\sigma_*(\dot{\epsilon})$ , а при дальнейшем возрастании  $\dot{\epsilon}$  увеличения  $\sigma_*$  не происходит (линия 3). По результатам наших измерений наблюдается монотонное увеличение  $\sigma_*$  с ростом  $\dot{\epsilon}$ .

Отсутствие полного описания условий нагружения в [26] не позволяет охарактеризовать эти расхождения как принципиальные. Тем более, что возрастание  $\sigma_*$  при увеличении  $\dot{\epsilon}$  могут маскироваться процессами трещинообразования. Чтобы избежать образования сколов в образце при поджатии и достичь более равномерного распределения напряжений, была применена специально сконструированная измерительная ячейка с опорой на воздушной подушке [27]. Тем не менее, с учетом отмеченных предосторожностей, разброс значений  $\sigma_*$  при больших  $\dot{\epsilon}$  несколько увеличивается. Не имея возможности выявить причину расхождений в условиях эксперимента, воспользуемся известными экспериментальными данными и теоретическими разработками, чтобы оценить нижний и верхний пределы таких изменений.

На фиг. 3 показаны экспериментальная зависимость напряжения от продольной деформации (кривая 4) и рассчитанная по изменению скорости звука зависимость (кривая 5) для тех же величин [9]. Обе зависимости получены на одном и том же образце льда А4 при температуре  $-20^{\circ}\text{C}$  и  $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ . Экспериментально установлено, что зависимости  $\sigma(\epsilon)$ , полученные для разных скоростей деформации, образуют семейство кривых с постепенным переходом от кривой для самого медленного нагружения до самого быстрого. Этот факт позволяет рассматривать динамическую зависимость (кривая 5) в качестве некоторой предельной кривой, к которой стремятся деформационные кривые при увеличении скорости деформации. Тенденция возрастания  $\sigma_*$  с увеличением скорости в области больших скоростей деформации не противоречит известному факту превышения динамического модуля над статическим.

Таким образом, не вызывает сомнений увеличение  $\sigma_*$  с возрастанием  $\dot{\epsilon}$ . Оценим вид функциональной зависимости.

Согласно модели стандартного линейного тела

$$\sigma + \tau_1 \dot{\sigma} = G_2(\epsilon + \tau_2 \dot{\epsilon})$$

$$\tau_1 = \eta / (G_u - G_r), \quad \tau_2 = \tau_1 G_u / G_r \quad (5)$$

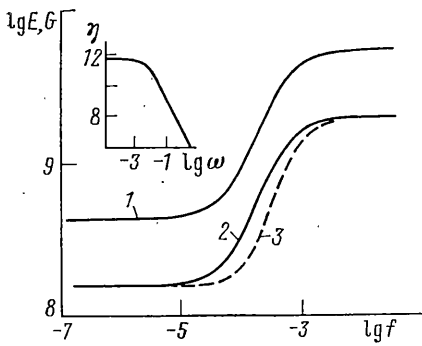
где  $G_u$ ,  $G_r$  — модули до и после релаксации. Рассчитаем по данным эксперимента модуль Юнга (кривая 1) и комплексный модуль  $G_*$  (кривая 2) в зависимости от частоты (фиг. 4). Если предположить, что максимальные напряжения пропорциональны модулю Юнга, то возрастание  $E$  от частоты будет характеризовать вид зависимости  $\sigma_*(\dot{\epsilon})$ . Однако в п. 1 показано, что линейная модель неадекватно отражает механические свойства поликристаллического льда и, соответственно, вид зависимости  $E(f)$ , а также «выполаживание» зависимости  $\sigma_*(\dot{\epsilon})$  в области больших скоростей деформаций (линия 3, фиг. 3) является менее достоверным, чем возрастание  $\sigma_*$  с увеличением  $\dot{\epsilon}$  (линия 1, фиг. 3).

Каждому типу процессов по вязкому, пластическому и упругому механизму соответствует своя скорость и характерное время релаксации. Времена релаксации медленных процессов, величина которых больше 1 с, определялись по кривым ползучести. Для исследованных типов льда и условий нагружения времена релаксации заключены в интервале от 550 до 1500 с.

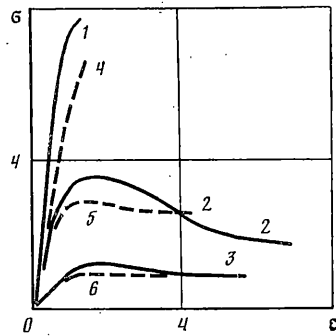
Характерные времена хрупкого разрушения, если основываться на спектрах сигналов акустической эмиссии, ограничены малыми долями секунды, от  $6 \cdot 10^{-3}$  до  $1,3 \cdot 10^{-5}$  с [5], причем времена релаксации зависят от напряжения и температуры.

Если нагружение выполняется со скоростью, соизмеримой со скоростью релаксации, то должна проявляться сильная зависимость механических характеристик льда от скорости нагружения. Оценку вида этой зависимости сверху можно выполнить, используя представления феноменологической релаксационной теории. Увеличение времени релаксации на два порядка величины [5] при возрастании напряжения косвенно подтверждает характер зависимости (линия 1, фиг. 3). Прямое подтверждение вида функции  $\sigma_*(\dot{\epsilon})$  можно получить из рассмотрения результатов испытаний на удар (см. ниже п. 5).

**4. Обобщенная реологическая зависимость.** Уменьшение на шесть порядков времени релаксации при повышении температуры от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $-1^{\circ}\text{C}$  [5] характерно для систем, к которым может быть применен принцип температурно-временной аналогии. Еще одним доводом в пользу применения этого принципа является сходство деформационных кривых, полученных в условиях сжатия с постоянной скоростью нагружения при разных температурах и в изотермических условиях при разных скоростях нагружения (фиг. 5). Линии 1–3 соответствуют измерениям при постоянной скорости нагружения  $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  и температурах  $-50$ ,  $-30,7$ ,  $-5^{\circ}\text{C}$  соответственно. Линии 4–6 получены в измерениях при постоянной температуре  $-7^{\circ}\text{C}$  и скоростях деформации  $2,5 \cdot 10^{-1}$ ,  $5 \cdot 10^{-3}$  и  $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$  соответственно. Образцы льда имели структуру типа А4.



Фиг. 4



Фиг. 5

Из сопоставления линий 1–3 и 4–6 следует, что повышение температуры льда вызывает такое изменение механических характеристик, которое происходит при уменьшении скорости деформации.

Принцип положен в основу метода [28], согласно которому любая функция вязкоупругости, например  $G$ , может быть построена в зависимости от приведенной частоты  $\omega a_T$ :

$$G_\omega = G T_0 \rho_0 / T \rho, \quad a_T = [\tau_0]_{T_0} / [\tau_0]_T, \quad (6)$$

где  $T_0$  — температура приведения,  $\tau_0$  — время релаксации.

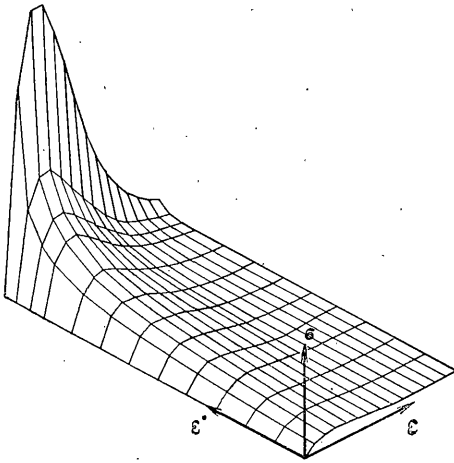
Ранее было отмечено удовлетворительное согласие экспериментальной зависимости  $\sigma_*(\dot{\epsilon})$  с расчетной  $\sigma_*(\dot{\epsilon} a_T)$ , что подтвердило возможность применения ко льду метода приведенных переменных, а также явилось независимым доказательством справедливости вида экспериментальной кривой 1 фиг. 3. В дальнейшем получена зависимость пороговых напряжений от скорости деформации и выделены условия нагружения, при которых лед проявляет преимущественно вязкие, пластические и упругие свойства [5].

На фиг. 6 показана обобщенная поверхность максимальных напряжений от приведенных скорости деформации и деформации. По оси  $\dot{\epsilon}$  отложен  $\lg \dot{\epsilon} a_T$ . Скорость деформации изменяется от  $10^{-14}$  до  $10^{-1}$  с $^{-1}$ , максимальные напряжения — от 12 до 0,4 МПа. Поскольку увеличение скорости деформации в соответствии с принципом температурно-временной аналогии тождественно уменьшению температуры, то ось скоростей деформации можно рассматривать как ось температур с интервалом от  $-1$  до  $-55^\circ \text{C}$ .

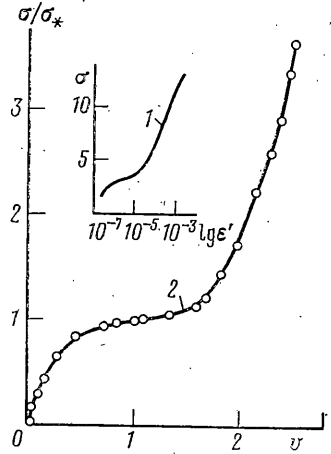
Таким образом, получено независимое подтверждение вида зависимости  $\sigma_*(\dot{\epsilon})$  (линия 1, фиг. 3), основанное на использовании общего принципа, а также построена поверхность  $\sigma_*(\dot{\epsilon}, \dot{\epsilon} a_T = T)$ , что показывает возможность расчета по ограниченным экспериментальным данным механических характеристик льда определенной структуры в широком интервале температур и скоростей деформации.

**5. Границы применения определяющего соотношения.** Реологические свойства льда при больших скоростях деформации ( $\dot{\epsilon} \sim 1$ ) и пригодность определяющего соотношения в этих условиях можно оценить при ударных взаимодействиях свободно падающего жесткого индентора с массивной ледяной пластиной [23, 24]. Применение индентора, снабженного пьезоэлектрическим акселерометром, позволяет подробно рассмотреть процесс соударения и определить основные механические характеристики.

На фиг. 7 показана обобщенная зависимость приведенного напряжения  $\sigma/\sigma_*$  от приведенной мгновенной скорости  $v = X^*/X_0^*$  (линия 2). Измерения выполнялись при температуре  $-9,8^\circ \text{C}$ , величина  $\sigma$  рассчитывалась по соотношению  $\sigma = P(\tau)/S_i$ , где  $S_i$  — поверхность контакта в некоторый момент соударения  $\tau$ , начальная скорость соударения  $v_0$  варьировалась от 0,485 до 2,23 м/с. За точку подобия в семействе кривых  $\sigma(x^*)$  принята точка ( $\sigma = \sigma_{\max}$  и соответствующую этому моменту мгновенную скорость  $X_0^*$ ). Возможность представления экспериментальных кривых [6] единственной



Фиг. 6



Фиг. 7

зависимостью основана на изучении процессов соударения. Точками представлены экспериментальные результаты, линией — расчетная зависимость.

На пассивном этапе соударения  $0 \leq v \leq 1$  происходит разгрузка и упругое восстановление, которое полностью или частично демпфируется пластическими деформациями прослойки снега, образовавшегося при ударе в зоне контакта. Для аппроксимации использовалось соотношение

$$\sigma/\sigma_* = \exp[-f(v)/m] \quad (7)$$

$$f(v) = v - \ln v - 1, \quad m = 1,25$$

Аналогичное выражение применялось при одноосном сжатии. Это свидетельствует об общности процессов в квазистатическом и динамическом режимах, и об удовлетворительности модели.

На активном этапе соударения происходит нагружение и упругопластическое деформирование. Сложность происходящих процессов не позволяет представить всю кривую единым соотношением; однако можно выделить участки с преимущественным процессом деформирования. На активном этапе соударения выделены два участка:  $1 \leq v \leq 2$  и  $v > 2$  и аппроксимированы соотношением

$$\sigma/\sigma_* = [(v-1)^{n_1} + 1] \quad (8)$$

причем  $n=2$  для участка  $1 \leq v \leq 2$  и  $n=0,85$  для участка  $v > 2$ . Расхождение расчетных значений с экспериментальными не превышает  $\pm 2,5\%$ .

Процесс удара в рассматриваемом случае длится 2–3 мс; при этом скорость приложения нагрузки составляет  $\sigma^* = 6 \cdot 10^3$  МПа/с, а скорость деформации  $\dot{\epsilon}^* = X/4a\Delta\tau = 20$  с<sup>-1</sup>.

Возрастание максимальных напряжений при увеличении скорости деформации для больших скоростей не противоречит результату наблюдений квазистатического деформирования. К тому же вид кривой 2 идентичен линии 1 (фиг. 7), характеризующей зависимость максимальных напряжений при увеличении скорости деформации при одноосном сжатии [6].

Таким образом, область применения соотношения (4) ограничена скоростями соударения, при которых не наблюдается интенсивного разрушения льда. При больших энергиях соударения [24] должны применяться другие соотношения, например (8), которые полнее отражают происходящие вблизи поверхности соударения процессы разрушения. Определяющее соотношение в целом правильно отражает деформационные свойства льда, в том числе и при ударном нагружении. Однако совпадение с экспериментом достигается при разных значениях коэффициента  $m$ , причем большему разрушению первоначальной структуры соответствует большее значение.

Подобно закону Глена соотношение (4) также является преимущественно эмпирическим, однако входящие в соотношение коэффициенты имеют ясный физический смысл и могут быть определены при ограниченных стандартных испытаниях. Использование принципа температурно-временной аналогии позволяет достоверно оценивать механические характеристики льда известной структуры в широком интервале температур и скоростей деформации по результатам ограниченных экспериментов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бутягин И. П.* Прочность льда и ледяного покрова: Новосибирск: Наука, 1966. 154 с.
2. *Войтковский К. Ф.* Механические свойства льда. М.: Изд-во АН СССР. 1960. 100 с.
3. *Епифанов В. П.* К вопросу о механических свойствах льда // Изв. АН СССР. МТТ. 1982. № 1. С. 187–192.
4. *Епифанов В. П.* Трещинообразование во льду при сжатии // Изв. АН СССР. МТТ. 1988. № 4. С. 181–188.
5. *Лавров В. В.* Вопросы физики и механики льда. Л.: Мор. транспорт, 1962. 118 с.
6. *Епифанов В. П.* Некоторые результаты экспериментальных исследований механических свойств ледяного покрова // Изв. АН СССР. МТТ. 1985. № 2. С. 182–191.
7. *Иванов К. Е., Лавров В. В.* Об одной особенности механизма пластической деформации льда // Ж. техн. физики. 1950. Т. 20. Вып. 2. С. 230–231.
8. *Bailey R. W.* The utilization of creep test data in engineering design // Proc. Inst. Mech. Eng. Proc. 1935. V. 131. P. 131–269.
9. *Епифанов В. П.* Разрушение поликристаллического льда // Докл. АН СССР. 1982. Т. 267. № 6. С. 1364–1367.
10. *Епифанов В. П., Фаустов М. А.* Метод оценки изменения напряженного состояния вязкоупругого тела // Заводская лаборатория. 1982. № 5. С. 67–69.
11. *Епифанов В. П.* Акустические исследования структурных изменений при растяжении в высоконаполненных полимерных композициях на основе каучука // Высокмолекулярные соединения. 1982. Т. 24. № 7. С. 1386–1390.
12. *Воронина И. Ю., Епифанов В. П.* О процессе трещинообразования в композициях // Композиционные полимерные материалы. Киев: Наук. думка. 1985. Вып. 25. С. 32–38.
13. *Епифанов В. П., Шадрин В. В., Шемякин А. Н.* Механика разрушения наполненных эластомеров при динамическом воздействии // Высокмолекулярные соединения. Сер. А. 1987. Т. 29. № 5. С. 1007–1012.
14. *Епифанов В. П., Фаустов М. А.* Изменение эффективного сечения трещины при деформировании льда // Изв. АН СССР. МТТ. 1982. № 6. С. 171–176.
15. *Hooge R., Mellor M., Budd W. F. et al.* Mechanical properties of polycrystalline ice: An assessment of current knowledge and priorities for research // Cold Regions Sci. Technol., 1980. V. 3. P. 263–275.
16. *Garcia N. B.* Specimen preparation for ice research // Cold Region Regions Sci. and Technol. 1985. V. 10. B. 3. P. 272–275.
17. *Воронина И. Ю., Епифанов В. П.* Акустические исследования структурных изменений гранита при осевом сжатии // Акуст. ж. 1980. Т. 26. Вып. 3. С. 371–376.
18. *Епифанов В. П., Кузьменко В. П.* Механика разрушения снега // Изв. АН СССР. МТТ. 1986. № 4. С. 191–197.
19. *Мазно Н.* Наука о льде. М.: Мир, 1988. 231 с.
20. *Вейнберг Б. П.* Лед. Свойства, возникновение и исчезновение льда. М.; Л.: Гостехиздат. 1940. 524 с.
21. *Епифанов В. П.* Механика разрушения льда в зависимости от температуры и скорости нагружения // Изв. АН СССР. МТТ. 1984. № 2. С. 188–196.
22. *Schwartz J., Frederking R., Gavrillo V., et al.* Standardized testing methods for measuring mechanical properties of ice // Cold Regions Sci. Technol. 1981. V. 4. N 3. P. 245–253.
23. *Епифанов В. П.* Разрушение льда при контактных взаимодействиях // Изв. АН СССР. МТТ. 1986. № 6. С. 177–185.
24. *Епифанов В. П.* Разрушение льда при ударных взаимодействиях // Докл. АН СССР. 1985. Т. 284. № 3. С. 599–603.
25. *Fish A. M.* Thermodynamic model of creep at constant stress and constant strain rate // Cold Reg. Sci. and Technol. 1984. V. 9. N 2. P. 143–161.
26. *Каргер Д. С.* Хрупкое разрушение поликристаллического льда при сжатии // Тр. симпози. МАГИ: «Лед и его воздействие на гидротехническое сооружения». Л.; Румб. 1972. С. 69–79.
27. *Епифанов В. П., Фаустов М. А.* Метод исследования структурных изменений в вязкоупругих телах при сжатии // Заводская лаборатория. 1984. № 11. С. 74–76.

Москва

Поступила в редакцию  
22.IV.1988