

17. Общая химия. Под ред. Е. М. Соколовской. М.: Изд-во МГУ, 1980. 724 с.
18. Гиббс Дж. Термодинамика. М.: Наука, 1982. 584 с.
19. Petch N. J. The lowering of fracture stress due to surface adsorption. — Philos. Mag., ser. 8, 1956, vol. 1, n. 4, p. 331–337.
20. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 1979, 568 с.
21. Fowler R. H. A statistical derivation of Langmuir's adsorption isotherm. — Proc. Camb. Phil. Soc., 1935, vol. 31, part. 2, p. 260–264.
22. Межфазовая граница газ — твердое тело. М.: Мир, 1970. 434 с.
23. Федченко В. С., Радкевич А. И., Карвацкий Л. М. Прочность стали в ионизованных газах. — Физ. хим. мех. материалов, 1976, т. 12, № 4, с. 96–100.
24. Карпенко Г. В., Василенько И. И., Хитаршвили М. Г., Федченко В. С. Эффект Ребиндера в среде водорода. — Докл. АН СССР, 1969, т. 185, № 5, с. 1034–1036.
25. Nelson H., Williams D. P., Tetelman A. S. Embrittlement of ferrous alloy in a partially dissociated hydrogen environment. — Metallurg. Trans. Ser. A., 1971, vol. 2, n. 4, p. 953–959.
26. Фаст Дж. Взаимодействие металлов с газами. Т. 2. М.: Metallurgia, 1975. 351 с.
27. Трепвел Б. Хемосорбция. М.: Изд-во иностр. лит., 1958, 327 с.
28. Гельд П. В., Рябов Р. А., Кодес Е. С. Водород и несовершенство структуры металла. М.: Metallurgia, 1979. 221 с.
29. Бэррер Р. Диффузия в твердых телах. М.: Изд-во иностр. лит., 1948. 504 с.
30. Путилов К. А. Курс физики. Т. 1. М.: Физматгиз, 1962. 560 с.

Ленинград

Поступила в редакцию
11.V.1984

УДК 539.375

МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ СНЕГА

ЭПИФАНОВ В. П., КУЗЬМЕНКО В. П.

Механические свойства снега определяются в полевых условиях при помощи пенетрометров [1–3] и метода рамок [4]. Причем метод рамок менее надежен, чем методы, основанные на использовании пенетрометров [5]. Однако метод пенетрометров также не позволяет оценить свойства исходной структуры снега, поскольку вблизи поверхности давления образуется уплотненный слой. Его свойства существенно отличаются от свойств невозмущенной структуры. Поэтому такие характеристики ударного взаимодействия, как размер лунки, глубина внедрения [6], не позволяют оценить истинные величины, например твердость снежного покрова или его слоев. В публикуемой работе аналогично [7] предпринята попытка снабдить инденторы пьезоэлектрическими акселерометрами. Это позволило не только определять механические характеристики снега в любой момент соударения, но и охарактеризовать удар, в процессе которого меняется характер взаимодействия, например при разрушении снега и его уплотнении. Цель работы — рассмотреть механизм разрушения снега при вдавливании, использовать результаты для оценки неустойчивости снега на склоне и прогнозировать лавинообразования.

За исходное уравнение при торможении свободно падающего жесткого индентора принимается уравнение

$$X''(\tau) = g - P(\tau)/m \quad (1)$$

где P — реакция опоры, τ — время, X — глубина внедрения, m — масса индентора, g — ускорение свободного падения.

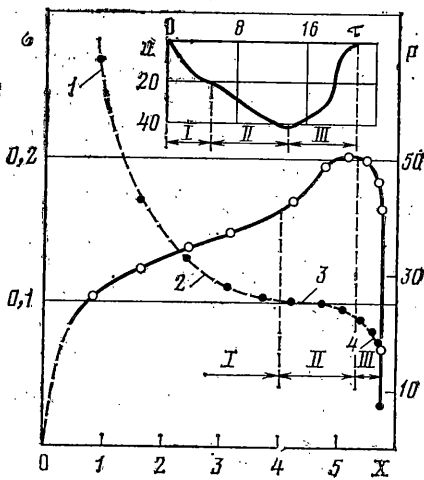
Напряжение, вырабатываемое пьезоэлектрическим акселерометром, пропорционально силе, действующей на пьезоэлемент, а значит, и ускорению индентора.

$$X''(\tau) = nC \left[U(\tau) - \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau} d\tau' U(\tau') \right] \quad (2)$$

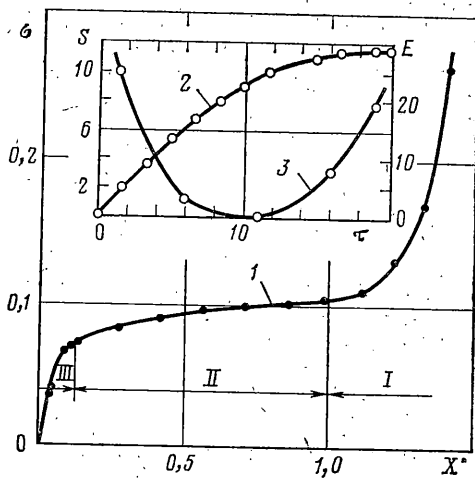
где n — коэффициент преобразования измерительной системы, U — напряжение, C , R — соответственно емкость и электрическое сопротивление измерительной линии, $\tau_0 = RC$.

Обработка электрического сигнала сводится к последовательному интегрированию. В результате получаются значения мгновенной скорости $X'(\tau)$ и глубины $X(\tau)$ проникновения. Сопротивление R находится умножением мгновенного ускорения на массу индентора. Зная $X(\tau)$, легко рассчитать мгновенную поверхность контакта $S(\tau)$. Допуская равномерное распределение напряжений на площадке контакта, можно в первом приближении оценить мгновенные значения эффективных динамических модулей $E_e = \partial \sigma / \partial x$, где $\sigma = P/S$. При ударе регистрировались амплитуда и частота сигнала в акустической эмиссии. До и после разрушения выполнялись микроскопические исследования структуры снега, определялся динамический модуль снега $E = \rho c^2$, где c — скорость упругого возмущения, ρ — плотность.

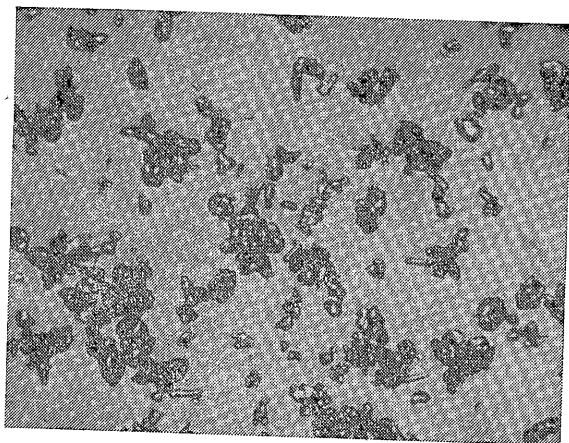
1. На фиг. 1 показаны зависимости силы P , H и напряжения σ , МПа (штриховая линия) от глубины внедрения $X \cdot 10^{-3}$, м пара в снег, а также сглаженная осциллограмма ударного взаимодействия U , мВ от времени соударения τ , мс. Плотность



Фиг. 1



Фиг. 3



Фиг. 2

снежной доски 0,4, температура снега -10°C . Динамический модуль $E_d=34,6 \cdot 10^8 \text{ Па}$, скорость упругих возмущений $(932 \pm 5) \text{ м/с}$, коэффициент ослабления $\alpha \approx 0,44 \text{ см}^{-1}$. Радиус шара 0,038 м.

Вид осциллограммы определяется преобладающим на рассматриваемом этапе соударения процессом: 1) упругой деформацией зерен и шеек, 2) упругим сжатием воздуха, содержащегося в порах, 3) разрушением шеек, 4) вязким перемещением зерен или 5) их разрушением. На участке I от начала соударения до первого экстремума, соответствующего хрупкому разрушению, т. е. твердости снега σ_t , первоначальная структура существенно не изменяется и проникновение шара в снег происходит в основном за счет упругой деформации. Для условий эксперимента $\sigma_t = P/2\pi RX = 26H/2\pi \cdot 0,038 \text{ м} \cdot 10^{-2} \text{ м} = 0,11 \text{ МПа}$. Для снега плотностью 0,4 при температуре -10°C расхождение измеренной твердости с определенной в [3] более 30%. Расхождения могут быть большими и зависят от того, на каком этапе определяются P и X . Рассмотрим, как меняются свойства снега в процессе соударения.

Эффективный модуль в точках 1–4 зависимости $\sigma(X)$ соответственно равен $E_1 = 25 \cdot 10^8 \text{ Па}$, $E_2 = 2,9 \cdot 10^8 \text{ Па}$, $E_3 = 3 \cdot 10^6 \text{ Па}$, $E_4 = 20 \cdot 10^8 \text{ Па}$. Максимально большую величину эффективный модуль имеет в точке 1, т. е. в самом начале соударения, что соответствует почти ненарушенной структуре снега. Причем E_1 по порядку величины соответствует динамическому модулю E_d . Последующее уменьшение модуля свидетельствует о разрушении снега.

На участке II внедрение шара происходит почти при постоянном напряжении $\sigma = 0,1 \text{ МПа}$. Эффективный модуль в точке 3 (площадка текучести) почти на три порядка меньше, чем E_1 . Течение происходит при высоком, применительно к снегу, напряжении в условиях всестороннего сжатия, что должно сопровождаться уплотнением. Плотность снега вблизи поверхности давления, измеренная после удара, около 0,55. Максимум на зависимости $P(X)$ во второй области активной области этапа соударения подтверждает возросшее сопротивление со стороны уплотненного снега.

Естественно ожидать, что снегу большей плотности должна соответствовать большая величина эффективного модуля, т. е. E_4 должен быть больше E_1 . Эксперимент

показывает обратное, $E_1 > E_4$. Кажущееся несоответствие может быть объяснено тем, что в исходной структуре между кристаллитами существуют ледяные шейки (фиг. 2). Отсутствие такого каркаса в уплотненном снегу и повышение температуры при ударе уменьшает сцепление частиц. К тому же мгновенная скорость шара в точке 4 меньше, чем X_1 . Этих факторов достаточно, чтобы E_1 оказался больше E_4 .

На пассивном этапе удара (III) происходит разгрузка.

Таким образом, при внедрении шара в снег разрушается исходная структура, между шаром и ненарушенной частью снега образуется слой из кристаллитов и их обломков. В условиях всестороннего неравномерного сжатия происходит перемещение и уплотнение обломочного материала. Поскольку механические свойства промежуточного слоя существенно отличаются от свойств невозмущенного слоя, то результаты измерений, полученные без учета этого различия, например по методике с применением стандартных пенетрометров [8], могут только косвенно характеризовать свойства «невозмущенного» снежного слоя. Поэтому при определении характеристик разрушения ограничим рассмотрение процесса ударного взаимодействия той частью, которая соответствует разрушению исходной структуры.

Известно, что площадь фигуры, ограниченная кривой $P(X)$ и осью абсцисс, численно равна работе. Затраты энергии на перемещение шара в снегу, определенные по площади $P(X)$, составляют $2,03 \cdot 10^{-4}$ Дж. Это совпадает в пределах точности эксперимента с кинетической энергией шара в момент касания снежной плиты. Отсюда можно рассчитать удельную энергию разрушения снега как отношение энергии, затраченной на преодоление сопротивления снега внедрению, к объему разрушения. Если за объем разрушения принять объем лунки, соответствующей I этапу удара, то удельная энергия $e_{14} = 0,122$ Дж/ $1,8 \cdot 10^{-6}$ м³ = $6,6 \cdot 10^4$ Дж/м³. В дальнейшем предполагается оценить истинный объем разрушения на каждом этапе соударения и исследовать зависимость механических характеристик от скорости взаимодействия для разных структур снега.

На фиг. 3 показана зависимость (1) напряжения σ , МПа от мгновенной скорости шара X , м/с, а также (2) изменение поверхности контакта $S \cdot 10^{-4}$, м² и зависимость (3) эффективного модуля $E_e \cdot 10^8$, Па от времени соударения t , мс. Выделенным областям I—III соответствуют характерные отрезки кривой $\sigma(X)$, в пределах каждого зависимость близка к монотонной. Воспользуемся соотношением Стокса $P = 6\pi\eta R X$ (R — радиус шара), чтобы в первом приближении оценить коэффициент компрессионной вязкости снега в те же моменты соударения, для которых определены величины $E_1 \div E_4$. Рассчитанные коэффициенты вязкости соответственно равны 25, 41, 73 и 209 Па с, т. е. вязкость снежной массы в процессе удара (с уменьшением скорости и напряжения) возрастает. Основной причиной, по-видимому, может быть уплотнение частиц при внедрении шара. Возможно также, что увеличению суммарной поверхности контактов зерен и упрочению образовавшихся шеек способствует нагрев воздуха в порах при ударе. Теплый воздух оплавляет кристаллы, холодные изнутри. Последующее выравнивание температуры вызывает смерзание частиц и повышение вязкости. Это предположение подтверждается наблюдениями остановившихся лавин, частицы снега в которых оказываются смерзшимися.

Экспериментально установлено, что с увеличением скорости деформирования изменяются механические свойства снега [9]. Причем имеется фиксированное значение скорости деформации, выше которой снег разрушается хрупко, ниже — ведет себя как вязкопластическая среда с большим коэффициентом вязкости [10].

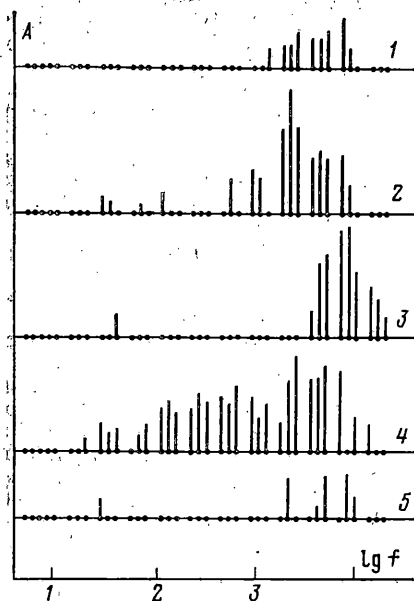
Для льда времена релаксации, определяющие механизмы хрупкого и пластического разрушения, изменяются от долей секунды до нескольких часов [11]. Большие времена релаксации $\tau = 10^2 \div 10^4$ с характеризуют ползучесть льда [12]. Малые времена релаксации $10^{-2} \div 10^{-5}$ с [13] характеризуют упругость льда. Время релаксации зависит от структуры и условий деформирования. Для снега время релаксации, определенное при квазистатических испытаниях, изменяется в интервалах от 10 до 29 мин [14]. Из-за ограниченной точности экспериментов малые времена релаксации могут быть оценены в основном при динамических испытаниях и исследователями, работающими в области квазистатических нагружений, обычно не рассматриваются.

Время релаксации, оцененное из соотношения $\tau = 1/\omega = \eta_3/E_{3e} = 73$ Па·с/ $3 \cdot 10^6$ Па = $2,4 \cdot 10^{-5}$ с, не противоречит [15], что позволяет рассматривать рассчитанные значения E_e и η по порядку величин близкими к достоверным. Поскольку $\omega = 2\pi f$, то при разрушении частиц снега можно ожидать сигналы акустической эмиссии частотой $f = 4 \cdot 10^4$ с⁻¹/ $2\pi \approx 6$ кГц.

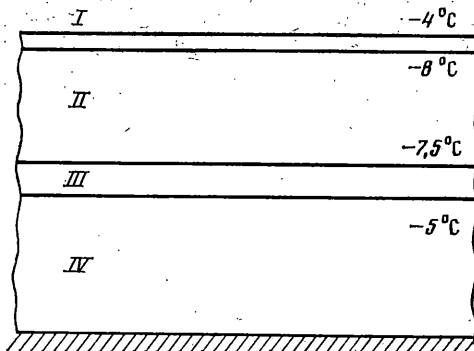
На фиг. 4 показаны спектры ударного взаимодействия шара со снежной плитой для энергий (1) — 1,76; (2) — 2,6; (3) — (5) — 5,2 Дж. По оси абсцисс в логарифмическом масштабе отложена частота, по оси ординат — амплитуда сигналов (А, В). С увеличением энергии удара возрастает амплитуда и изменяется частотный состав спектров. Сигнал (3) — (5) представлен тремя фазами: первой (3), второй (4) и третьей (5). Общим для всех спектров является присутствие высокочастотных компонент в интервалах (4—8) кГц и (2—2,5) кГц. С возрастанием энергии удара регистрируются сигналы в диапазоне частот 250—500 Гц. Появление низкочастотной компоненты 25 Гц совпало с образованием кольцевой трещины и кусочным разрушением верхнего слоя плиты.

Максимумы интенсивности сигналов наблюдаются в областях: I (4—8) кГц, II (2—2,5) кГц, III (250—500) Гц и IV (25) Гц.

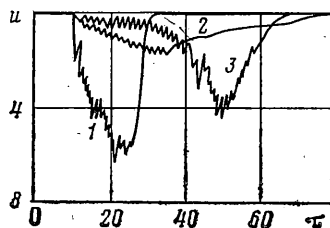
Было показано [16], что существует корреляция между характеристиками сигналов акустической эмиссии и масштабом разрушения. Размер разрушения, со-



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

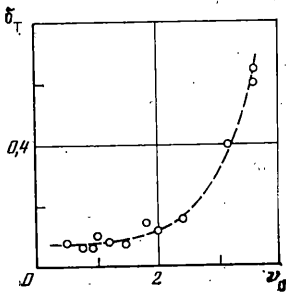
ответствующий, например, экспериментально определенной частоте $f=8$ кГц, рассчитывается из соотношения $f=(2\pi)^{-2}(am^{-1})^{0.5}$, где a — коэффициент упругости в законе Гука $\sigma=a\Delta l$, Δl — смещение, m — масса осциллятора. Принимая для льда $\sigma=10^{-10}$ Н/связь, $\Delta l=7 \cdot 10^{-10}$ м, находится число разрушенных связей $n=(2\pi)^{-2}(\sigma/\Delta l)(N/M)f^{-2}$, где M — молекулярная масса, N — число Авогадро. Рассчитанное значение $n=1,9 \cdot 10^{15}$. Эффективный объем разрушения около $6,3 \cdot 10^{-8}$ см³, масса разрушения $5,6 \cdot 10^{-8}$ г. При толщине трещины в момент раскрытия около 10^{-5} м эффективный масштаб разрушения $R_0=1,4$ мм. Этому масштабу соответствует средний размер шейки, соединяющей зерна снега (фиг. 2).

Эффективные массы для II, III и IV диапазонов будут больше первого $m_i/m_1=f_1^2/f_i^2$, т. е. соответственно в 16, 256 и 10^5 раз. Используя результаты структурных исследований снега, можно предположить, что этими уровнями разрушения являются I — разрушение шейки, II — разрушение зерна, III — разрушение конгломератов частиц как структурных образований, IV — смещение структурных обломков снега. В дальнейшем предполагалось использовать факт существования различных масштабов разрушения снега для оценки лавинной опасности по сигналам акустической эмиссии.

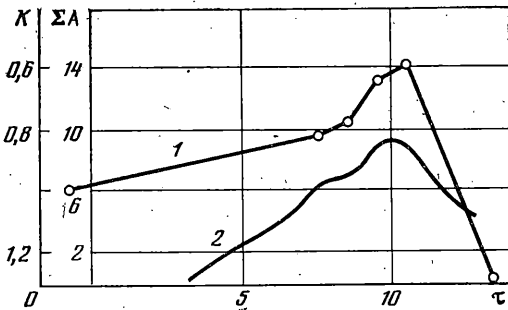
2. Известно, что снежный покров состоит из слоев с различными физико-механическими свойствами [17], причем свойства каждого слоя изменяются во времени [18] и даже в пределах одного слоя возможны отклонения от средних величин [19]. Градиент температур, давление верхних слоев на нижние являются первопричиной и определяющими факторами теплопереноса, в результате которого изменяется структура снега, а следовательно, и его механические свойства. Ледяные кристаллы в пределах слоя образуют однотипную конструкцию. Связанность частиц, за исключением слоя свежевыпавшего снега, обеспечивается ледяными шейками, образующимися в местах соприкосновения кристаллов. На фиг. 5 показан разрез исследованного снежного покрова с условно выделенными слоями I—IV. Под тонким I слоем (4–5 см) свежевыпавшего мелкозернистого снега с плотностью 0,15 расположен II слой более плотного (0,21–0,23) мелкозернистого снега толщиной 30 см. Слой III ледяной изморози с плотностью 0,22 отделен тонкой коркой льда. Толщина III слоя 6–10 см. Ниже располагался слой IV крупнозернистого смерзшегося снега плотностью 0,39–0,41. Толщина IV слоя 38 см.

На фиг. 6 приведены осциллограммы I–3 ударного взаимодействия шарового индентора соответственно с IV, II и III слоем. Масса шара 1,76 кг, энергия удара $E_0=mv_0^2/2=1,9$ Дж. Различная форма осциллограмм иллюстрирует существенное различие механических свойств слоев. Однако в пределах одного слоя могут наблюдаться совпадающие во всех деталях осциллограммы. Например, для II и IV слоя отмечалось практическое совпадение осциллограмм при многократных бросаниях шара, что свидетельствует о достаточной однородности этих слоев. Для слоя глубинной изморози получить полного совпадения не удалось. Даже в пределах относительно небольших площадей (около 3 м²) слоем глубинной изморози свойственна неоднородность и необычайно высокая изменчивость механических свойств.

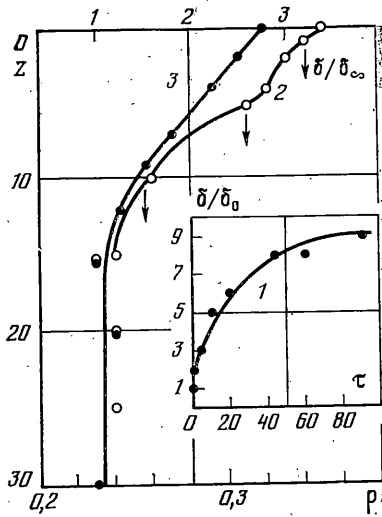
Поскольку определение динамической твердости имело целью нахождение наименее прочного слоя, с которым связывается неустойчивость снежного покрова на



Фиг. 7



Фиг. 8



Фиг. 9

склоне [20], то первоначально необходимо было обосновать условия измерения этой величины.

На фиг. 7 приведена зависимость ударной твердости σ_T от скорости v_0 индентора в момент касания IV слоя. Увеличение ударной твердости с возрастанием скорости удара может быть объяснено, по-видимому, фильтрационными процессами. При малых скоростях соударения воздух, находящийся в промежутках между зернами, успеваеет «вытечь» из зоны удара. С увеличением скорости удара возрастает «компрессия», т. е. начинают проявляться упругие свойства воздуха, что обуславливает резкое увеличение ударной твердости. В дальнейшем величина ударной твердости определялась при минимальных значениях v_0 , при которых компрессия не оказывает заметного влияния.

Механические свойства снежных слоев в вертикальном направлении определялись при помощи сферических инденторов диаметром 50, 76 и 100 мм и массой соответственно (0,09–0,17), 1,76, (0,685, 1,28 и 3,9) кг. Диаметр и масса индентора, пригодного для исследования снега определенной структуры и плотности, находились при заданных v_0 из условия $X < R$. Это условие выполнялось при глубине погружения шара 1–2 мм. Использовались также стандартные пенетрометры [21] с различными коническими наконечниками. Один для плотного снега диаметром 40 мм и углом при вершине 60° ; другой для рыхлого диаметром 100 мм и углом при вершине 120° . Для измерения механических свойств снега в горизонтальном направлении в основном применялся стержневой индентор [22]. Пьезоэлектрический акселерометр размещался в корпусе пенетрометра и при помощи гибкого высокочастотного кабеля соединялся с истоковым повторителем, запоминающим осциллографом и цифроаналоговым преобразователем [23]. Как показали испытания, наиболее перспективными для исследования механических свойств снега оказались шаровые и модернизированный стержневой инденторы.

Ослабленный слой в снежном покрове определялся по числу устойчивости $K = \sigma/p$, где p – снеговая нагрузка на слой. Ему соответствует минимальное значение числа K . При $K=0,5$ состояние снежного покрова на склоне оценивается как лавиноопасное [24]. Сложность шурфования при контактном способе предопределила поиск дистанционного метода оценки устойчивости снежного покрова, например при помощи регистрации сигналов акустической эмиссии. На фиг. 8 приведена зависимость (1) числа устойчивости K и зависимость (2) активности акустической эмиссии $A \cdot 10^3$ сигналов за три часа от времени τ , сутки для участка снежного покрова в зоне отрыва. Увеличение средней активности акустической эмиссии соответствует уменьшению устойчивости снежного покрова. При постоянных значениях числа устойчивости или его увеличении интенсивность акустической эмиссии уменьшается до фонового уровня. Выявленную корреляционную зависимость предполагается использовать для обоснования необходимых и достаточных критериев [25] при определении устойчивости снежного покрова на склонах и прогнозирования лавинной опасности.

3. Свойство снега уплотняться под действием силы сжатия и сохранять это состояние после прекращения механического воздействия может быть использовано для

экспериментальной оценки распределения максимальных напряжений и деформаций на поверхности давления и в объеме. При уплотнении изменяются механические свойства снега, например, твердость. Причем, большим напряжениям соответствуют большие уплотнения. Высокая вязкость снега способствует длительному сохранению картины силового поля, как бы в замороженном состоянии, соответствующем моменту действия максимальных напряжений.

Сразу после прохождения по снегу машины с гусеничным движителем (типа «Буран») в нескольких местах по центру колеи определялась твердость σ_T , а также твердость σ_0 верхнего слоя невозмущенного участка снежного покрова. На фиг. 9 приведена зависимость (1) отношения σ_T/σ_0 от времени τ , мин. Твердость поверхностного слоя колеи возрастает за 30÷40 мин почти на порядок, причем σ_T стремится к некоторому предельному значению. Установленной из эксперимента зависимости (1) соответствует эмпирическая формула вида $\sigma_T/\sigma_0 = k_2 - k_3 e^{-\theta \tau}$, где k_2 и k_3 — некоторые безразмерные константы, а $\theta = 3,9 \cdot 10^{-2}$ 1/мин. По смыслу величина θ характеризует процесс возвращения снега в состояние квазиравновесия. В уплотненном слое возрастает удельная поверхность контактов между частицами снега, образуются ледяные шейки, что приводит к увеличению твердости. Время $\tau = 1/\theta = 1,5 \cdot 10^3$ с характеризует большие времена релаксации, т. е. время ползучести для снега [14].

Для оценки максимальных напряжений в объеме применялся искусственный прием (метод шурфования [21]) последовательного снятия слоев снега, для которых определялась динамическая твердость. Кривая (3) на фиг. 9 характеризует изменение твердости по высоте снежного покрова z , см через 90 мин после прохода «Бурана». Температура первого слоя -5°C . Рассматривается отношение σ_T/σ_∞ , где σ_∞ — твердость слоя, для которого не выявлены различия измеряемой величины до и после прикатки.

Синхронно с измерением твердости определялась плотность снега ρ как функция глубины слоя. Под слоем прикатки подразумевается снег I и II слоя по п. 2. Максимальное уплотнение слоя $\rho/\rho_0 = 0,35/0,15 \approx 2$ на поверхности контакта при $z=0$.

Оказалось, что «конус уплотнения» [26] не дошел до земли. Уже на глубине 10÷15 см трудно вызвать остаточные изменения, т. е. $\sigma_\infty \approx \sigma_{15}$. Кривая (2), представляющая зависимость плотности ρ от высоты z , см, имеет такую же тенденцию к уменьшению, что и кривая (3), однако ее монотонность свидетельствует о различном механизме уплотнения снега разной исходной структуры и плотности. Нельзя не отметить, что плотность только в первом приближении может рассматриваться как характеристика для оценки механических свойств снега [19].

Выявлению достаточно простых и удовлетворительных законов, управляющих деформацией снега при действии на него поверхностных сил, посвящено большое количество исследований. Воспользуемся результатами работы [27], послужившей основой для построения программы публикуемых экспериментальных исследований. Для определения среднего удельного давления под гусеницей «Бурана» использовалось соотношение [26] $p_1 = k_4 (M_1/S_1)$, где $k_4 = 2$ — коэффициент, $M_1 = 380$ кг — масса машины, $S_1 = 12 \cdot 10^3$ см² — площадь опоры. Для условий эксперимента $p_1 = 2(380/12 \cdot 10^3) = 6 \cdot 10^3$ Па. Тогда для рассматриваемого случая коэффициент пропорциональности в законе Герстнера $c_1 = p_1/x = 4 \cdot 10^3$ Па/м, где $x = 0,15$ м — осадка снега. Зная вид функции $\sigma_T/\sigma_\infty \sim f(z)$, характеризующей распределение давления в любом нормальном к оси слое, и допустив $\sigma_{\max} \sim p_1$, можно описать деформацию снега.

Подводя итог, можно заключить, что метод жесткого индентора, снабженного пьезоэлектрическим акселерометром, в сочетании с методом зондирующих импульсов, исследованием структуры и определением плотности снега, а также регистрацией сигналов акустической эмиссии и температуры позволяет детально исследовать процесс разрушения снега. Метод может оказаться полезным для оценки механических свойств снежного покрова и прогнозирования лавинообразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Haefeli R. Schneemechanik mit Hinweisen auf die Erdbaumechanik.— Beitr. Geologie der Schweiz. Geotechn. Ser., Hydrologie, 1939, Lfg. 3. 11 S.
2. Савельев В. А., Лангев М. Н., Лангева Н. И. Строение, состав и физико-механические свойства снега в Хибинах и их изменение в процессе метаморфизма.— В кн.: Снег и лавины Хибин. М.: Изд-во МГУ, 1967, с. 201—239.
3. Abele G. Deformation of snow under rigid plates at a constant rate of penetration.— U. S. Army Cold Region, 1970, Res. Rept. No. 273. 70 p.
4. Самойлов Р. С., Ушаков А. И., Ходаков В. Г. Полевые определения механических характеристик снега и фирна (Обзор).— В кн.: Материалы гляциологических исследований: Хроника и обсуждения. М.: Междувед. геофизич. комитет АН СССР, 1982, вып. 46, с. 201—208.
5. Королев А. И. Об определении твердости снежного покрова применительно к снеголавинному делу.— Тр. Среднеазиат. науч.-исслед. гидрометеорол. ин-та, 1965, вып. 21(36), с. 54—61.
6. Гомольский С. Г., Храпачый Н. Г., Цуприк В. Г. Исследование удара твердого тела о лед.— В кн.: Ледотермические явления и их учет при возведении и эксплуатации гидроузлов и гидротехнических сооружений: Материалы конф. и совещ. по гидротехнике. Л.: Энергия, 1979, с. 73—77.
7. Елифанов В. П. Разрушение льда при ударных взаимодействиях.— Докл. АН СССР, 1985, т. 284, № 3, с. 599—603.

8. *Котляков В. М., Лосев К. С.* Исследование снежного покрова за рубежом.— В кн.: Снежный покров, его распространение и роль в народном хозяйстве. М.: Изд-во АН СССР, 1962, с. 59–86.
9. *Эльмесов А. М.* К вопросу о зависимости несущей способности снега от времени.— Тр. высокогорн. геофизич. ин-та, 1965, вып. 4, с. 35–40.
10. *Эльмесов А. М.* К вопросу о модели напряженно-деформируемого состояния снега.— Тр. Высокогорн. геофизич. ин-та, 1965, вып. 4, с. 35–53.
11. *Войтковский К. Ф.* Механические свойства льда. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 100 с.
12. *Раннелс Л. К.* Явление диффузии и релаксации во льду.— В кн.: Физика льда. Обзор докладов Междунар. симпоз. Мюнхен, 1968. Л.: Гидрометеоздат, 1973, с. 124–127.
13. *Kirgisa D.* Internal friction in ice.— Contrib. Inst. Low Temperature Sci., Ser. A, 1964, No. 18. 62 p.
14. *Анфилофьев Б. А., Эльмесов А. М.* Методика и некоторые результаты исследования реологических свойств снежного покрова при сдвиговых испытаниях.— Тр. Новосибир. ин-та инж. ж.-д. трансп., 1970, вып. 115, с. 95–106.
15. *Епифанов В. П.* Некоторые результаты экспериментальных исследований механических свойств ледяного покрова.— Изв. АН СССР, МТТ, 1985, № 2, с. 182–191.
16. *Виноградов С. Д.* Акустические наблюдения процессов разрушения горных пород. М.: Наука, 1964. 84 с.
17. *Канаев Л. А.* Об изменчивости свойств снега.— Тр. Среднеазиат. н.-и. гидрометеорол. ин-та, 1969, вып. 44(59), с. 25–42.
18. *Божинский А. Н.* О характеристиках структуры снега.— В кн.: Материалы гляциологических исследований. М.: Межвед. геофизич. комитет АН СССР, 1975, вып. 25, с. 116–121.
19. *Давыдов В. А., Дурьнин Ю. Ф., Слесаренко Ю. Е., Фролов А. Д.* Применение ультразвукового метода для изучения строения, состава и физико-механических свойств снежного покрова и оценки лавинной опасности.— В кн.: Снег и лавины Хибин. М.: Изд-во МГУ, 1967, с. 240–257.
20. *Болов В. Р., Залиханов М. Ч., Шабельников В. А.* О горизонтах разрыхления в толще снежного покрова и их значений в лавинообразовании.— Тр. Высокогорн. геофизич. ин-та, 1980, вып. 46, с. 21–28.
21. **Руководство по снеголавинным работам (временное).** Л.: Гидрометеоздат, 1965. 397 с.
22. *Королев А. И.* К вопросу о методике определения лавинной опасности.— Тр. Среднеазиат. н.-и. гидрометеорол. ин-та, 1967, вып. 30(45), с. 111–121.
23. *Епифанов В. П., Кудря В. П.* Метод оценки механических свойств вязкоупругих материалов при их ударном взаимодействии с индентором.— Завод. лаб., 1985, № 2, с. 64–66.
24. *Москалев Ю. Д.* Возникновение и движение лавин. Л.: Гидрометеоздат, 1966. 152 с.
25. *Фомин А. Г.* Критерий устойчивости снежного покрова.— Тр. Новосибир. ин-та инж. ж.-д. трансп., 1970, вып. 115, с. 115–123.
26. *Мальгин В. А.* Исследование воздействия на снежный покров машин с гусеничным движителем.— Тр. Горьк. политехн. ин-та, 1971, т. 27, вып. 10, с. 58–62.
27. *Ишлинский А. Ю., Кондрагьева А. С.* О качении жестких и пневматических колес по деформируемому грунту.— В кн.: Тр. Сопоставления по проходимости колесных и гусеничных машин по целине и грунтовым дорогам. М.: Изд-во АН СССР, 1950, с. 68–88.

Москва

Поступила в редакцию
20.1.1985

УДК 539.41

СОПРОТИВЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛОВ ЧИСТОМУ РАСТЯЖЕНИЮ И СЖАТИЮ

ЖУКОВ А. М.

Приведены опытные данные о модулях упругости на растяжение и сжатие некоторых металлов и полимеров, показывающие, что эти модули практически одинаковы. Установлено, что для чугуна, пенополистирола и сплава Д16Т сопротивление растяжению и сжатию в нелинейной области различно.

В последние годы интенсивно развивается разномодульная теория упругости, принимающая материал однородным, но имеющим разные модули упругости на растяжение и сжатие в фиксированных направлениях. В [1] собраны опытные данные о модулях упругости при растяжении и сжатии ряда материалов. Различие в модулях (по отношению к наименьшему значению) достигает весьма больших величин: для серого чугуна 33,3%, оргстекла 100% и стекломата АС-30 595%. В публикуемой работе рассматриваются результаты корректно выполненных опытов и описываются дополнительные опыты на сером чугуне и сплаве Д16Т.

Модули упругости оргстекла при комнатной температуре, приведенные в [1], равны 1344 МПа при растяжении и 2688 МПа при сжатии. По данным наших испытаний, проведенных более 25 лет тому назад, в которых деформации образцов изме-