

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ДВИЖУЩЕЙСЯ СНЕЖНОЙ МАССЫ НА СООРУЖЕНИЕ

Взаимодействие снежной лавины с препятствием с целью определения нагрузок исследовалось неоднократно [1, 2]. Определяли максимальные давления на щит [3-7], сбрасывали образцы на упругое препятствие [8], применяли оригинальные установки [9, 10]. Однако расчеты все еще основаны на гипотетических моделях, адекватность которых реальному природному явлению вызывает некоторое сомнение.

Слабая изученность процессов в снежной массе при взаимодействии с жестким препятствием, недостаточный учет таких характеристик, как структура лавинного тела, обусловлены многими причинами: использованием аппаратуры, явно непригодной для регистрации быстропротекающих процессов, трудностями в размещении измерительных устройств в теле движущейся лавины и т. д.

Рассмотрим некоторые вопросы, касающиеся методики измерений локальных давлений в произвольно выбранной точке движущейся снежной массы.

**1. Требования к аппаратуре для исследования быстропротекающих процессов.** Первичный импульс ударного нагружения имеет форму однополярного сигнала. Если требование линейности к измерительной линии [11] не выполнено, например использованы элементы, период собственных колебаний которых соизмерим с продолжительностью соударения, или нарушены требования по согласованию элементов, то сигнал искажается, может стать биполярным. Поэтому применение электрических тензометров и шлейфовых осциллографов [12], приводило к трудностям в интерпретации данных, на что обоснованно указано в работе [13]. К существенным ошибкам в определении нагрузки и интервалов времени приводит также использование пьезоэлектрических акселерометров в несогласованных цепях [14].

В качестве иллюстрации на фиг. 1 показаны осциллограммы 4 и 5, заимствованные из работ [8 и 14]. Так кривая 5 из работы [8] имеет явно выраженный резонансный характер: период колебаний равен периоду собственных колебаний тензометрического датчика, часть осциллограммы расположена ниже линии развертки. Кривая 4 получена при использовании пьезоэлектрического датчика. Форма сигнала в основном отражает переходные процессы, что характерно для несогласованной цепи. При оценке характеристик ударного взаимодействия по амплитуде биполярных сигналов 4 и 5, как это сделано в работах [8, 14], может быть допущена многократная ошибка. Для расшифровки таких сигналов требуются специальные методики.

Осциллограммы 1-3, полученные при соблюдении требований к измерительной линии, имеют колоколообразную форму, заканчиваются горизонтальным участком, совпадающим с линией развертки при нулевом уровне сигнала. Такие осциллограммы удобны для обработки и интерпретации, поскольку отражают процесс удара во всех деталях. Например, амплитуда и длительность осциллограмм 1-3 зависят от механических свойств исследуемых материалов. Для одинаковых граничных условий максимальная амплитуда для льда (1), пластилина (2) и снега (3) соответственно равна 100, 40 и 24 мВ, а продолжительность удара - 2, 7 и 20 мс, что согласуется с теоретическими представлениями [11].

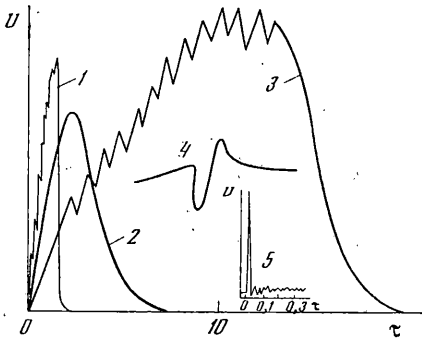
Осцилляции малой амплитуды, наблюдаемые на переднем фронте некоторых (1 и 3) осциллограмм, обусловлены процессами разрушения материала [15], а не собственными колебаниями датчика [11]. Независимым подтверждением этого является, во-первых, отсутствие осцилляций для пластилина (2) и, во-вторых, отсутствие осцилляций для участка разгрузки. Частота осцилляций в этом случае может рассматриваться как параметр процесса разрушения, например, может быть использована для оценки масштаба разрушения.

При проникновении шара в снег происходит уплотнение. Возрастающее сопротивление отражается на форме кривой 3. При использовании индентора в виде обоюдоострого ножа существенного уплотнения не происходит и на осциллограмме наблюдается горизонтальный участок. Применяя инденторы разной геометрической формы, например, шаровой, ножевой и в форме диска, можно изучать особенности процесса разрушения снега в каждом случае.

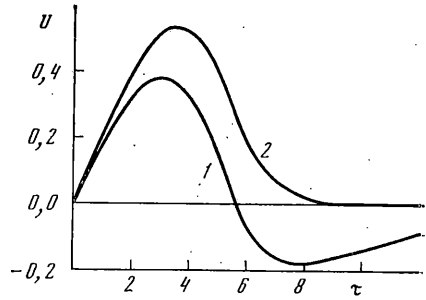
Получить достоверную информацию о быстропротекающих процессах по форме биполярного импульса можно лишь в ограниченных случаях. На фиг. 2 такая попытка проиллюстрирована для несогласованной цепи с пьезоэлементом. Линия 1 соответствует искаженной форме импульса, линия 2 - восстановленному первичному импульсу. Расчет выполнялся по соотношению

$$A(\tau) = U(\tau) + \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau} U(\tau') d\tau' \quad (1)$$

где  $A(\tau)$  - первичный однополярный сигнал,  $U(\tau)$  - искаженный сигнал после измерительной линии,  $\tau_0$  - постоянная времени измерительной линии.



Фиг. 1



Фиг. 2

Необходимо отметить, что для расчета параметры цепи должны быть точно известны. К тому же при обработке трудно сохранить «тонкую» структуру импульса.

Поэтому в рабочем диапазоне частот измерительная линия должна обладать линейными свойствами, при этом каждый элемент электрически согласовывается с остальными, собственная частота чувствительного элемента должна превышать максимальную частоту процессов разрушения по крайней мере на порядок. При соблюдении этих условий решение поставленной задачи достигается наиболее простым способом.

**2. Об определяющем влиянии структуры снежной массы на максимальные напряжения.** Аналитическая зависимость для расчета нагрузок движущейся снежной лавины на сооружение [16] содержит в качестве основных параметров плотность  $\rho$  и скорость  $v$  лавинного потока, причем за основу, как правило, берется уравнение Бернулли  $P \sim (\rho v^2/2)$ , однако применяют и другие соотношения, например,  $P \sim \rho v$ , в которое скорость входит в первой степени [19]. В некоторых случаях учитывают изменение плотности лавинного тела [17], возможность обтекания [18], а также угол между направлением движения лавины и нормалью к поверхности препятствия [16], но вид расчетного соотношения при этом сохраняется.

Недостаточная изученность этого природного явления, ограниченность натуральных экспериментов не позволяют обосновать по имеющимся данным определяющее соотношение и установить границы его применения. Воспользуемся физическим моделированием для оценки пригодности применяемых формул.

В первом приближении реальным условиям рассматриваемой задачи соответствуют условия взаимодействия свободно падающего жесткого индентора с однородной снежной доской на массивном основании [20–21]. Эти опыты выполнялись как в лабораторных [22], так и в натуральных условиях [23, 24]. Накоплен обширный материал.

Обобщенная кривая (фиг. 3) построена по результатам сбрасывания с различной высоты шарового индентора, снабженного пьезоэлектрическим акселерометром, на однородную снежную плиту. Зависимость напряжения от мгновенной скорости представлена в координатах  $\sigma/\sigma_0 - v$ , где  $v = X^*/X_0^*$ ,  $X_0^*$  — мгновенная скорость в конце активного этапа нагружения, при которой прекращается разрушение снежного каркаса.

Для условий модельного эксперимента, в котором начальная скорость изменялась в пределах от 0,1 до 6 м/с, зависимость напряжения от скорости предложено аппроксимировать следующими соотношениями

$$Y(X^*) = \begin{cases} a(1 - e^{-bx^*}) + cx^*, & X^* \leq X_0^* \\ d + f(x^* - g)^h, & X^* \geq X_0^* \end{cases}$$

дополнительные условия:

$$Y_1(X_0^*) = Y_2(X_0^*), \quad \left. \frac{dy_1}{dx^*} \right|_{X_0^*} = \left. \frac{dy_2}{dx^*} \right|_{X_0^*}$$

Критерий точности аппроксимации:  $S = \sum_{i=1}^{28} (Y_i - Y(X_i^*))^2$ . В результате полу-

чены следующие значения параметров:  $X_0^* = 2,07$  (устойчивое значение);  $a = 0,87$  (устойчивое значение);  $b = 6,23$  (может принимать значения 4,5...6,5);  $c = 0,121$ ;  $d = 1,11$ ;  $f = 0,585$  (может принимать значения  $\sim 0,07$  и  $\sim 0,5$ );  $g = 1,6$  (может принимать значения  $\sim 1,6$  и  $\sim 1$ );  $h = 5,38$  (может принимать значения 5,5...9);  $S = 0,0528$ .

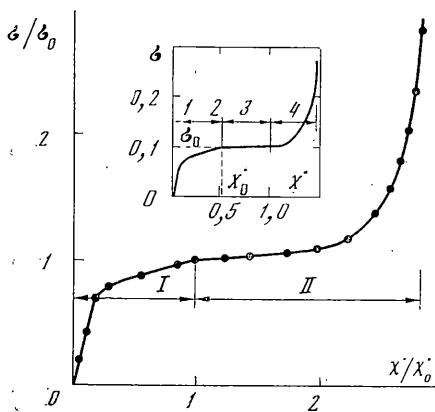
Аппроксимация по отдельным участкам. Линейная аппроксимация по четырем точкам  $X^* = 1 \dots 1,74$ :

$$Y = 0,0821X^* + 1,083$$

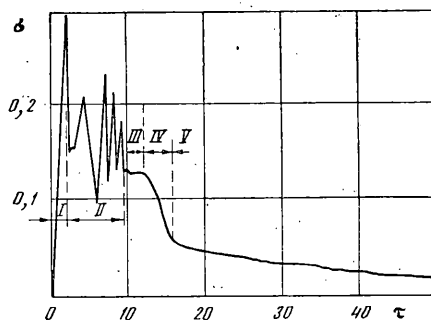
Степенная аппроксимация по точкам  $X^* \geq 1,74$ :

$$Y = 1,1 + 0,51(X^* - 1,58)^{5,41}$$

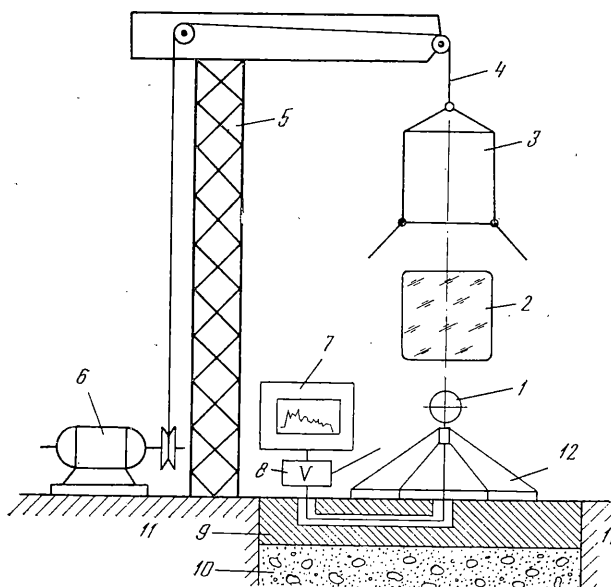
Параметры обеих частных аппроксимаций близки к значениям, найденным при совместной оптимизации параметров.



Фиг. 3



Фиг. 5



Фиг. 4

Необходимо отметить, что при максимальном разрушении исходной структуры снега (участок 3) аппроксимация может быть выполнена соотношением  $\sigma \sim X^*$ , а при минимальном нарушении структуры снежного блока (участок 4) лучшее совпадение получается при использовании выражения  $\sigma \sim (X^*)^n$ , где  $n=5$ . В промежуточных случаях  $n$  принимает значения  $1 \dots 5$ . По аналогии выбор определяющего соотношения для расчета нагрузки в натуральных условиях будет определяться степенью измельчения снежного пласта к моменту соударения с преградой, типом лавины и положением преграды в зоне транзита.

Максимальные напряжения (около 0,3 МПа) достигаются в начальной стадии удара (фиг. 3), при ненарушенной структуре снега. Упругие свойства снега подтверждаются линейностью начального участка осциллограммы, кратковременностью а также тем, что усилия достигают разрушающих только в самом конце этого участка. Согласно модели упругого контакта по Герцу

$$E_0 = \frac{5}{3\pi} \frac{m}{\sqrt{R}} (1-\nu^2) \frac{X_0^{**}}{X_0^{1/2}} \quad (2)$$

где  $K=0,172(m/\sqrt{R})$  – константа, характеризующая параметры индентора,  $X_0^{**}$  и  $X_0$  – соответственно мгновенные ускорение и глубина внедрения на упругом участке при условии  $X \ll R$ . Коэффициент Пуассона привят равным 0,35.

Расчетная величина упругого модуля  $E$  для условий эксперимента равна 3,3 МПа, и согласуется с величиной максимальных напряжений  $\sigma_m = 0,1E_0$ , где  $E_0$  – экспериментальные значения модуля упругости. Однако динамический модуль, рассчитанный по скорости распространения упругих волн, на два порядка больше. Поскольку начальная скорость соударения  $v_0 = 1,4$  м/с, то это расхождение можно

объяснить тем, что полученная величина характеризует квазистатический режим нагружения.

Из рассмотрения начального этапа соударения следует, что при ударе о преграду большие куски снежной толщи будут проявлять свойства упругопластического тела.

По мере разрушения первичной структуры снега напряжения на площадке контакта уменьшаются до 0,1 МПа, упругий эффективный модуль уменьшается до 0,08 МПа. Обломочный материал образует подвижный слой вязкостью  $\eta = P/6\pi R\dot{X} = 16,8$  Пас, который выдавливается из зоны контакта. Течение осуществляется в тонком слое, тем не менее полученная величина оказывается близкой к величинам динамической вязкости известных жидкостей что, по-видимому, подтверждает обоснованность представлений лавин некоторых типов потоком жидкости.

Однако полной адекватности представлений не достигается. В частности, не соблюдается условие несжимаемости. Согласно измерениям плотность снега с нарушенной структурой была 0,4, а после удара вблизи поверхности давления стала 0,55. Увеличение плотности в 1,5 раза вызвало возрастание напряжений также в 1,5 раза, что отмечалось также в [23]. Линейная зависимость максимальных напряжений от плотности снега в узком интервале величин не вызывает сомнений, поскольку с увеличением плотности возрастает эффективный модуль, а, следовательно, и максимальное напряжение [16].

Относительное изменение нагрузок на активном этапе соударения в зависимости от структуры снежной массы составляет 300% (от 0,3 до 0,1 МПа). Это согласуется с выводом работы [18], в которой отмечалось существенное снижение нагрузки (трехкратное) при обтекании, а также с данными работ [8, 27], в которых экспериментально определенное напряжение составляло соответственно 0,31 и 0,33 МПа.

Из рассмотренного следует, что при расчете максимальных нагрузок на препятствие следует исходить из определяющего влияния структуры лавинного тела: наличия в нем глыб и кусков снега. При прочих равных условиях для пылевых лавин давление, оказываемое на препятствие, должно быть меньше, чем для лавин, содержащих крупные снежные образования.

При расчете необходимо учитывать концентрацию и распределение этих образований. В связи с этим модель снежной лавины в виде многокомпонентной среды [25] должна точнее передавать динамику взаимодействия, чем расчеты, основанные на соотношении Бернулли [28]. Исходные предположения о линейной и квадратичной зависимости максимальных усилий от скорости следует, по-видимому, рассматривать как предельные случаи. Границы применения этих тождеств должны определяться критериями, характеризующими состояние структуры лавинного тела.

**3. Зависимость локального давления от структуры снежного потока.** Известны попытки смоделировать снежную лавину путем сбрасывания снежного блока на плиту [8]. Более удачными представляются опыты по высыпанию снежной массы из бункера [25], поскольку при этом происходит образование пылевого облака и дополнительное измельчение первоначальных снежных образований, что в первом приближении подобно реальным процессам в движущейся лавине.

Однако искажения, вносимые плитой, трудности в оценке поверхности давления и в распределении нагрузки снижают достоверность измерений и создают предпосылки для поиска иной схемы нагружения. Определению истинных величин ударных нагрузок, продолжительности соударения при условии малых возмущений, вносимых в поток, по-видимому, способствовало бы размещение малогабаритных датчиков внутри движущейся снежной массы.

В соответствии с изложенным преграда в виде шара размещалась над плитой, расстояние от поверхности подбиралось таким, чтобы в точке размещения преграды влияние на поток со стороны плиты было минимальным. Диаметр шара выбирался большим по сравнению с характерным размером первичной структуры снега, но вместе с тем достаточно малым, чтобы искажения потока были минимальными. Последние условия выполнялись при диаметре около 0,1 м, причем в этом случае согласно [16] результаты легко могут быть пересчитаны на препятствия больших размеров.

На фиг. 4 показана блок-схема экспериментальной установки. Снежный блок 2 формируется в бункере 3. Перемещение бункера достигается при помощи троса 4, системы блоков, размещенных на опоре 5, и барабана, приводимого во вращение электродвигателем с редуктором 6. При открывании створок бункера снежный блок начинает свободное падение с заданной высоты. Давление, оказываемое движущейся снежной массой, на жесткий индентор 1, размещенный на подставке 12, передается на жесткую опорную плиту 9, бетонную подушку 10 и грунт 11, что увеличивает жесткость и массивность преграды в целом. Индентор снабжен пьезоэлектрическим акселерометром. Электрический сигнал с пьезоэлемента передается по кабелю на блок согласования 8, выход которого электрически соединен с входом запоминающего осциллографа 7.

На фиг. 5 показана типичная зависимость локального нормированного напряжения  $\sigma_* = \sigma/\sigma_{\max}$  от времени  $\tau$ , мс при взаимодействии большой массы снега с неподвижным препятствием. Напряжение рассчитывалось по соотношению  $\sigma = P/S$ , где  $P$  — усилие на шаровой индентор сечением  $S = 44$  см<sup>2</sup>.

В начальной стадии удара на зависимость  $\sigma(\tau)$  наблюдается несколько экстремумов, затем площадка на уровне  $0,4\sigma_*$  и в завершающей фазе удара постепенное уменьшение напряжения ( $0,2 \pm 0,1$ )  $\sigma_*$ . Первому максимуму соответствует напряжение 0,3 МПа, площадке — 0,1 МПа. Согласно п. 2 такие величины напряжений соот-

ветствуют неразрушенному снежному пласту и измельченной снежной массе. Наблюдаемое уменьшение локальных напряжений можно объяснить разрушением снежного блока. Уменьшением плотности при разрушении можно также объяснить кажущееся несоответствие толщины (0,5 м) исходного блока и протяженности (1,2 м) снежного тела (1-V), оцененной по продолжительности соударения и скорости.

Таким образом, в падении под действием различных факторов снежный блок разрушается и трансформируется в снежный поток с явно выраженным фронтом I, неоднородным ядром II-III, хвостовой частью IV и шлейфом V.

Характерные размеры неоднородностей потока можно оценить по продолжительности взаимодействия и скорости. Так экстремумы на II фазе удара, по-видимому, соответствуют кускам снега с эффективным размером 3-10 см. За крупными обломками снежного пласта движется масса с характерным размером частиц 0,5 см. Участок III имеет вид ступеньки, и по аналогии с потоком жидкости она могла быть определена как фаза пластического течения, однако при большем разрешении по времени можно обнаружить дискретный характер взаимодействия и оценить продолжительность отдельных соударений.

Хвостовая часть IV потока воспринимается на зависимости  $\sigma(\tau)$  как разгрузка. Действительно, именно уменьшение концентрации снежной массы вызывает уменьшение напряжения, поскольку  $\sigma \sim \rho v$  и  $v \sim \text{const}$ . Фазой V обтекания датчика пылевым облаком заканчивается ударное взаимодействие. Поскольку  $\rho_{III} \sim 0,4$  и  $\sigma \sim \rho$ , то  $\rho v \sim 0,4$ , что не противоречит [2].

Необходимо отметить, что по существу зависимость  $\sigma(\tau)$  передает динамику обтекания индентора снежным потоком, причем форма кривой отражает макроструктуру этого потока, а выбранный способ измерения локальных давлений может быть использован для разработки метода механической спектроскопии лавинного потока.

Из зависимости  $\sigma(\tau)$  следует, что максимальное давление в условиях опыта оказывают крупные (3-10 см) куски снега, а минимальное (0,5 $\sigma_*$ ) - мелкие (0,5 см) частицы. Таким образом, с уменьшением размера обломков снежного пласта в пределах одного порядка давление уменьшается в два раза. Поскольку снежная лавина не является однородным образованием, то при расчете максимальных нагрузок на сооружения необходимо учитывать структуру снежного потока.

Возможность регистрировать слабые взаимодействия была рассмотрена в другом эксперименте.

На фиг. 6 показана осциллограмма соударения кристаллов снега с шаровой поверхностью датчика. В аэродинамической трубе жестко крепился датчик диаметром 34 мм. Кристаллы снега перемещались воздушным потоком со скоростью 15 м/с ортогонально плоскости чувствительного элемента. Температура минус 10° С.

На осциллограмме можно выделить близкие к предельным случаи центрального и бокового удара. Нетрудно видеть, что радиус частиц

$$R = \frac{1}{2} K_2 v \Delta t = K_3 A^3 \quad (3)$$

где  $v$  - скорость частицы,  $\Delta t$  - время соударения,  $A$  - амплитуда сигнала. Используя частицы известной плотности и размеров, легко определить коэффициенты  $K_2$  и  $K_3$ . Рассчитанные размеры частиц оказались близкими к применявшимся в эксперименте.

Этот опыт подтвердил возможность исследования снежно-пылевых лавин, в частности оценивать нагрузки на преграду, измерять концентрацию снежных частиц, определять их фракционный состав, а также выявлять условия, при которых частицы проявляют преимущественно упругие или пластические свойства.

Таким образом, применяя инденторы, снабженные пьезоэлектрическими акселерометрами, можно получать объективную информацию о структуре движущейся снежной массы, локальных давлениях. Для исследования динамики снежной лавины необходимо оптимальным образом [29] разместить в лотке датчики и жестко закрепить их на обтекаемых основаниях.

**4. Микроструктура снежного куска.** Нагрузка на препятствие зависит при прочих равных условиях прежде всего от структуры снега. Информацию о гранулометрическом составе содержат сигналы акустической эмиссии (АЭ) [23].

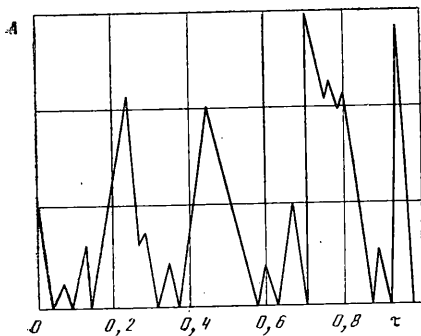
Упругие возмущения, возникающие при хрупком разрушении элементов снежного каркаса, передаются через тело датчика, служащее в этом случае как волновод, и воспринимаются чувствительным элементом пьезоакселерометра. Собственный период и амплитуда этих высокочастотных возмущений на порядок меньше, чем соответствующие характеристики основного сигнала, что позволяет разделить эти сигналы при помощи стандартной аппаратуры, тем более, что полезный сигнал находится в ограниченном интервале частот.

В качестве примера рассмотрим способ расшифровки гранулометрического состава по спектрам акустической эмиссии.

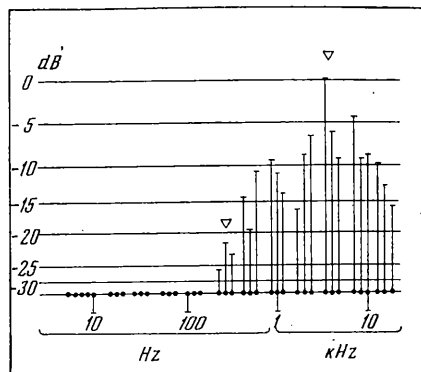
На фиг. 7 показаны спектрограммы, возникающие при погружении ножевого наконечника в среду шарообразных стеклянных частиц. Нетрудно видеть, что спектры АЭ для фракций диаметром 1 (а) и 1,9 (в) мм отличаются по амплитуде и составу. Можно четко выделить по крайней мере два максимума. Один - на частоте 3,15 кГц и другой, низкочастотный, в диапазоне 250 Гц (для крупных частиц) и 500 Гц (для мелких частиц). Большая чувствительность спектральных характеристик к преобладающему размеру частиц открывает принципиальную возможность определения гранулометрического состава.

Характерный размер частиц можно рассчитать из соотношения

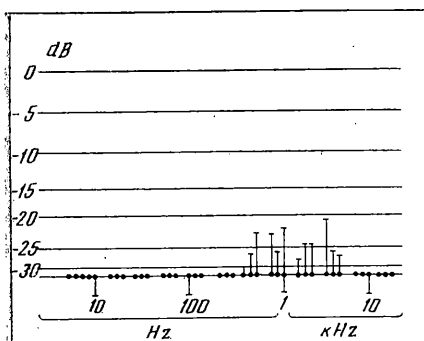
$$R = (1/\pi) / (3a/16f^2\rho)^{0,33} \quad (4)$$



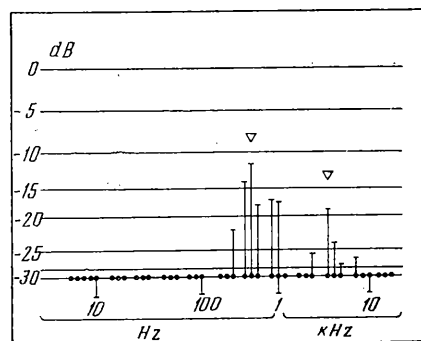
Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8



где  $f$  — частота характерного сигнала АЭ,  $\rho$  — плотность снега,  $a$  — сила сцепления частиц.

При расчете  $R$  можно использовать также известное отношение

$$R_1/R_2 = A_1/A_2 \text{ или } R = k_0 A \quad (5)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  — амплитуды сигналов АЭ, относящиеся соответственно к разрушению элементов структуры радиусом  $R_1$  и  $R_2$ ,  $k_0$  — коэффициент пропорциональности.

Если некоторые характеристики снега, например плотность, а также амплитуда и частота АЭ известны, то можно рассчитать силу сцепления.

Например, для снега плотностью 0,25 при температуре  $-10^\circ\text{C}$  определена осциллограмма (фиг. 8) и рассчитан характерный размер кристаллитов  $R = (1/\pi) / (3a/16f^2\rho)^{0,33} = (1/\pi) / (3 \cdot 20,3 \cdot 10^6 / 16 \cdot 700^2 \cdot 0,25)^{0,33} \approx 0,3$  (мм). Рассчитанная величина оказалась близкой к размерам кристаллитов, определенных при контрольных микроскопических исследованиях.

Таким образом, регистрация сигналов АЭ в сочетании с применением индентора полевой формы позволяет оценить гранулометрический состав снежных образований в движущемся потоке.

**5. Постановка задачи исследования.** Предварительные эксперименты имели целевую направленность: разработку методики исследования движущегося тела снежной лавины и совершенствование измерительной аппаратуры для этих целей.

Как уже отмечалось, резкая остановка движущейся снежной массы сопровождается сжатием, уплотнением и разогревом воздуха, заключенного в теле лавины. Форма и размеры препятствия могут иметь решающее значение. Поэтому были разработаны датчики трех форм: в виде шара, диска и обоюдоострого ножа.

Отсутствие явно выраженного уплотнения снега перед индентором в форме обоюдоострого ножа, а также исключение компрессии и уменьшение разброса данных позволяют при помощи датчика такой формы достоверно определять механические свойства снежного скелета.

Предполагается, что впервые будут измерены механические характеристики внутри движущегося тела снежной лавины, новые экспериментальные данные позволят расширить представления о сложном природном явлении, будут способствовать разработке адекватных теоретических моделей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорян С. С. Механика снежных лавин // Склоновые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1974. Вып. 1. С. 134–158.
2. Божинский А. Н., Лосев К. С. Основы лавиноведения. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 281 с.

3. Аккурагов В. Н., Войтковский К. Ф., Липатов А. Ф., Нечаев Н. Ф., Пермьяков Р. С., Салицкая В. И. Экспериментальное определение силы удара снежных лавин // *Материалы гляциол. исследований*, 1970. Вып. 16. С. 45–52.
4. Исаенко Э. П. Ударное воздействие снежной лавины на преграду // *Материалы гляциол. исследований*, 1976. Вып. 25. С. 159–165.
5. Матвиенко В. С. Экспериментальные установки для исследования динамических характеристик лавинного потока // *Материалы гляциол. исследований*, 1970. Вып. 16. С. 67–71.
6. Ржевский Б. И. К вопросу о максимальных лавинных нагрузках в Хибинах // *Материалы гляциол. исследований*, 1976. Вып. 25. С. 181–183.
7. Эльмесов А. М. К удару лавины и расчету скорости ее движения // *Тр. Закавказ. НИИ Гидротехн. и мелиорации*, 1970. Вып. 45 (51). С. 50–57.
8. Липатов А. Ф., Салицкая В. И. Экспериментальное исследование эквивалентных нагрузок при ударе образца снега по упругим системам // *Снег и лавины Хибин*. М.: Изд-во МГУ, 1967. С. 335–348.
9. Жигачев Л. И., Якимов Ю. Л., Шурова И. Е. Установка для исследования силового воздействия снежных лавин на сооружение // *Склоновые процессы*. М.: Изд-во МГУ, 1974. Вып. 1. С. 169–172.
10. Исаенко Э. П. О методах определения нагрузок на сооружения от удара снежных лавин // *Лавины Сахалина и Курильских островов*. Л.: Гидрометеоздат, 1971. С. 124–133.
11. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Ч. 2. М.: Наука, 1984. 431 с.
12. Долов М. А. Деформация снега при больших импульсных нагрузках // *Тр. Высокотехн. геофиз. ин-та*, 1967. Вып. 9. С. 3–12.
13. Кильчевский Н. А. Динамическое контактное сжатие твердых тел: Удар. Киев: Наук. думка, 1976. 314 с.
14. Ядрошников В. И. О методике измерений лавинных нагрузок механическими датчиками // *Вопр. проектирования железных дорог в сложных физико-географических условиях Сибири*. Межвуз. сб. Новосибирск: Новосиб. ин-т инж. ж.-д. трансп., 1980. С. 32–43.
15. Шрейнер Л. А. Физические основы механики горных пород. М.—Л.: Гостехиздат, 1950. 212 с.
16. Указания по расчету снеголавинных нагрузок при проектировании сооружений. ВСН 02–73. М.: Гидрометеоздат, 1973. 20 с.
17. Шурова И. Е., Якимов Ю. Л. Исследование удара снега о неподвижное препятствие // *Материалы гляциол. исследований*, 1970. Вып. 16. С. 52–57.
18. Войтковский К. Ф. Давление снега на противолавинные сооружения // *Материалы гляциол. исследований*, 1970. Вып. 16. С. 38–45.
19. Исаенко Э. П., Ядрошников В. И. Экспериментальное исследование процесса соударения снежных образцов с препятствием // *Научно-технич. конф., посвящ. 50-летию СССР*. НИИЖТ, Новосибирск, 1972. С. 133.
20. Епифанов В. П., Кудря В. П. Метод оценки механических свойств вязкоупругих материалов при их ударном взаимодействии с индентором // *Заводская лаборатория*, 1985. № 2. С. 64–66.
21. Епифанов В. П. Разрушение льда при ударных взаимодействиях // *Докл. АН СССР*, 1985. Т. 284. № 3. С. 599–603.
22. Епифанов В. П., Русинов А. А. Об использовании метода свободно падающего индентора для определения механических характеристик снежного покрова // *Материалы гляциол. исследований*, 1987. № 59. С. 116–121.
23. Епифанов В. П., Кузьменко В. П. Механика разрушения снега // *Изв. АН СССР. МТТ*, 1986. № 4. С. 191–197.
24. Yerifanov V. P., Kuz'menko V. P. Acoustic emission methods applied to avalanche-formation studies // *J. Glaciol.* 1988. V. 34. No. 117. P. 232–235.
25. Дюнин А. К. О теории борьбы с лавинами на железных дорогах. // *Тр. Новосиб. ин-та инж. ж.-д. трансп.*, 1969. Вып. 89. С. 5–18.
26. Москалева Ю. Д. Давление, удар лавины и лавинные воздушные волны // *Тр. Среднеазиат. н.-и. гидрометеорол. ин-та*, 1980. Вып. 78 (159). С. 13–22.
27. Salm B. Anlage zur Untersuchung dynamischer Wirkungen von bewegtem Schnee // *ZAMP*, 1964. V. 15. N 4. P. 357–375.
28. Фомин А. Г. К оценке давления лавинного тела. // *Тр. Новосиб. ин-та инж. ж.-д. трансп.*, 1976. Вып. 176. С. 3–8.
29. Meister R. Influence of strong winds on snow distribution and avalanche activity // *Annals Glaciol.* 1989. V. 13. P. 195–201.

Москва

Поступила в редакцию  
12.IV.1989