

УДК 532.5.011.11

© 1993 г. И. Е. ШУРОВА, Ю. Л. ЯКИМОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ УДАРА СНЕЖНОЙ ЛАВИНЫ О СООРУЖЕНИЕ

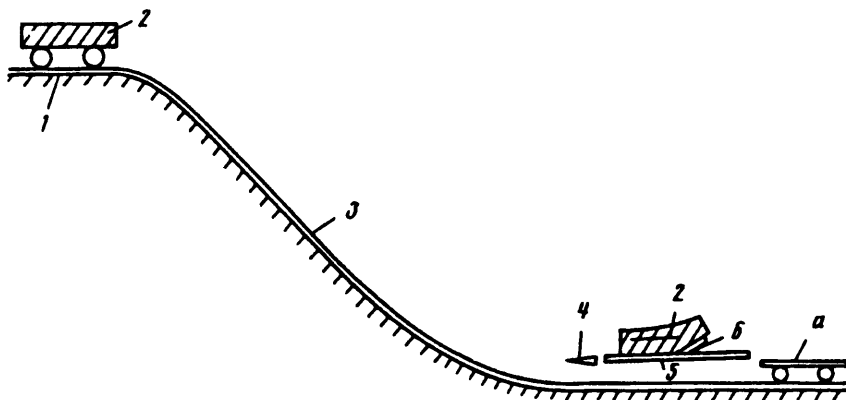
Рассмотрена задача взаимодействия снежного потока большой плотности с различными препятствиями.

Взаимодействие снежных лавин с препятствиями представлены в [1—5]. К ним относятся, например, некоторые предельные задачи о плоском ударе неразрушенного снежного образца и однородного снежного потока, а также задача об обтекании клиновидного препятствия однородным снежным потоком с учетом сжимаемости и прочности снега. Максимальные нагрузки на сооружения будут в том случае, когда осуществляется прямой фронтальный удар с существенным увеличением плотности снеговоздушной массы на фронте ударной волны [3—6]. В реальных условиях одновременный плоский удар по всей поверхности препятствия практически никогда не реализуется, а кратковременные уплотнения в отдельных частях лавины на могут существенно изменить средней плотности потока. Это тем более справедливо, если имеет место поток достаточно большой средней плотности, который определяет максимальные нагрузки при заданной скорости лавины.

Предположим, что при взаимодействии снежного потока с препятствием его средняя плотность ρ не меняется. Кроме плотности и давления учтем еще наличие в снеге касательных напряжений. Другие параметры, характеризующие физические свойства снеговоздушной массы, в частности прочность льдинок, их слипаемость из-за наличия поверхностного натяжения, давление и температура воздуха, характеризующие сжимаемость снеговоздушной массы, для рассматриваемой задачи несущественны. Оправданием этому может служить обстоятельство, что напряжения, связанные с ударом, существенно превосходят напряжения, связанные с поверхностным натяжением, изменением давления воздуха и т. д. Если предположить далее, что касательные напряжения в снеге определяются безразмерными коэффициентами типа кулонова трения k_t и безразмерными коэффициентами сопротивления ξ_t , характеризующими турбулентное трение на границах потока, рассматриваемая задача может быть решена методом физического моделирования. Параметр, характеризующий напряжение кулонова трения, пропорционален ударным нагрузкам и, следовательно, нет основания им пренебрегать. Вопросы моделирования с учетом этих свойств снега подробно рассмотрены в [5—8]. Это, как показано ниже, находится в хорошем соответствии со специально поставленным экспериментом по проверке методики моделирования.

В принятой приближенной постановке из размерных определяющих параметров (v_0 — скорость потока, ρ_0 — характерная плотность снега, L — характерный размер препятствия и снежного потока, например его высота) можно образовать один критерий подобия Фруда $Fr = v_0/\sqrt{gL}$. Безразмерные коэффициенты k_t , ξ_t можно опустить, так как они зависят от свойств снега, который во всех опытах был практически одинаковым.

Из перечисленных выше других физических параметров, определяющих механические свойства снега, можно образовать многочисленные критерии подобия, однако одной из целей представленного экспериментального исследования является выяснение диапазона масштаба модели, при котором существенно только число



Фиг. 1

Фруда. Если число Фруда Fr одинаково у природы и модели, то нагрузки на натурное сооружение в рамках принятых предположений определяются по формуле

$$F_i = 1/2 c_i (Fr) S \rho_0 v_0^2$$

где S — площадь препятствия, $c_i (Fr)$ — безразмерный коэффициент, определенный из эксперимента с моделями малого масштаба.

Основанием сделанных предположений может быть совпадение $c_i (Fr)$, полученное из экспериментов разного масштаба.

Для решения конкретных задач методом физического моделирования в Приэльбрусье построена установка «Снежный лоток», на которой проводились эксперименты по изучению взаимодействия движущегося снега с различными препятствиями [9].

Установка «Снежный лоток» представляет собой (фиг. 1) тележку 1 со снежным образцом 2, свободно движущимся вниз по рельсам 3 с перепадом высот до 17 м, что обеспечивает скорость до 15 м/с. Образец снега в конце пути срезается ножом 4 и, сохраняя свою форму, движется по инерции по столу 5, на котором монтируются модели препятствий 6.

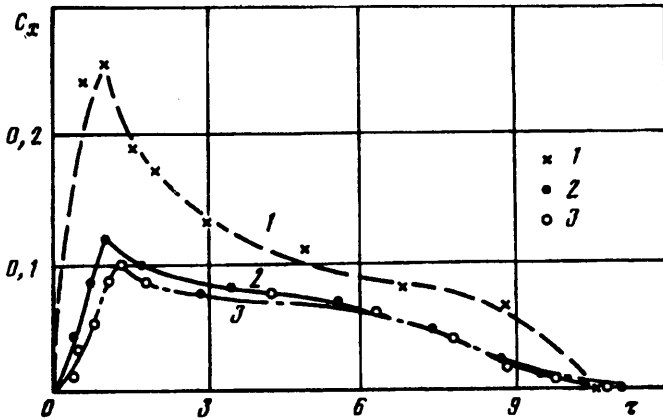
Основным преимуществом этой установки является то, что форма, плотность и скорость образца снега, имитирующего снежную лавину, могут быть заранее заданы.

На основе экспериментальных исследований установлено, что моделирование силового воздействия снежного потока с препятствиями при числах Фруда, характерных для снежных лавин, возможно, если характерный размер модели не менее 0,1 м. При размерах препятствия 0,2—0,3 м и более c_i , полученные на моделях разного масштаба, практически одинаковы. Эта закономерность установлена в экспериментах с мокрым крупнозернистым снегом.

При меньших масштабах рассматриваемое моделирование невозможно, что связано с существенным влиянием свойств снега, зависящих от дополнительных размерных постоянных, например силы сцепления, силы вязкости и т. д. Этот наименьший размер модели при заданном числе Фруда установлен на препятствиях типа вертикальной стенки, круглых цилиндрических препятствиях и клиновидных препятствиях типа лавинореза. Все модели были выполнены из дюрала, обработанного наждачной бумагой.

Из экспериментов следует, что для круглых препятствий при больших числах Фруда коэффициент сопротивления $c_x \sim 2$.

Проводились эксперименты с двумя типами клиновидных препятствий: вертикальные клинья типа лавинореза с углом раствора 2α и наклонными препятствиями типа галереи с углом наклона β . Условие $\alpha = \beta = 90^\circ$ соответствует вертикальной стенке.



Фиг. 2

На фиг. 2 представлена зависимость $c_x(\tau, Fr)$ для лавинореза с углом раствора $2\alpha = 90^\circ$, высотой щеки клина $L = a$ и длиной b ($\tau = v_0 t/b$). Опыты проводились с геометрически подобными моделями и образцами снега при $b/a = 1,5$. Снежный образец представлял собой параллелепипед с высотой $L = a$, шириной передней грани $2,5a$ и длиной $7,5a$. Опыты проводились при $a = 0,1; 0,2; 0,4$ м и скоростями $v_0 = 4,8; 7,1; 10,0$ м/с, т. е. при $Fr = 5,0; 4,9; 4,8$, которым соответствуют кривые 1—3. Плотность снега $\rho_0 \approx 0,4-0,5$ г/см³.

Практически при одном и том же $Fr \approx 5$ для размера модели $L < 0,3$ м имеет место заметное увеличение c_x по сравнению с моделями большего размера. Для $L \geq 0,3$ м $c_x(\tau)$ практически неразличимы. Физически это означает, что моделирование возможно, если величина скоростного напора снежного потока $\frac{1}{2} \rho_0 v_0^2$ существенно превосходит напряжения, связанные с прочностными свойствами снега. Так, при $L = 0,3$ м, $Fr = 5$ и $\rho_0 \approx 0,4$ г/см³ получим для минимально допустимого скоростного напора в модельных экспериментах $\frac{1}{2} \rho_0 v_0^2 \approx 500$ кг/м².

При малых τ имеет место максимальная нагрузка, соответствующая нестационарному обтеканию, и максимальное значение c_{xm} , после чего нагрузка падает и принимает практически постоянное значение, соответствующее стационарному обтеканию, с коэффициентом c_{xc} .

Таким образом, c_{xm} и c_{xc} — характерные значения функции $c_x(\tau)$, при этом в области моделирования $L > 0,3$ м $c_{xm} \approx 1,5c_{xc}$.

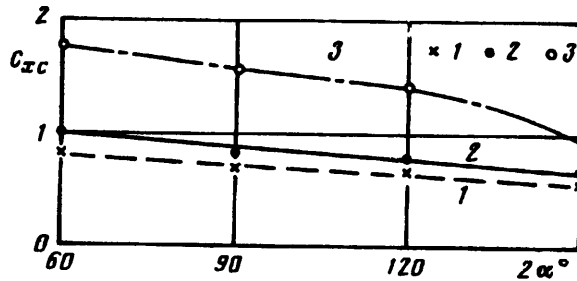
На фиг. 3 представлена зависимость c_{xc} от угла 2α между вертикальными стенками лавинореза. Кривые 1—3 соответствуют $Fr = 7,6; 4,7; 2,8$. Из этой зависимости следует, что для $Fr > 5$ для препятствий с углом раствора больше 60° c_{xc} практически не зависит от α , что возможно связано с образованием застойной зоны перед препятствием.

Для галереи безразмерный коэффициент нормальной нагрузки можно представить в виде двух слагаемых

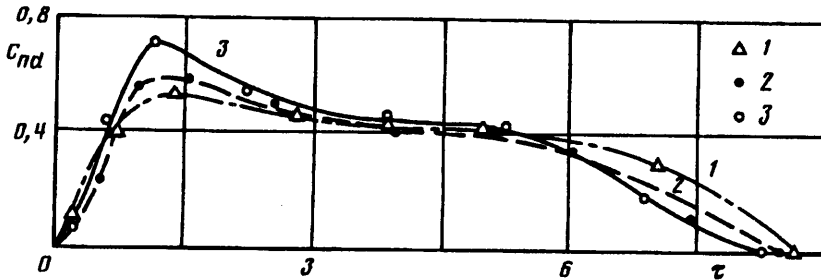
$$c_n = c_{nd} + \frac{2\rho_0 g h}{(\rho_0 v_0^2 \cos \beta)}$$

где h — высота снежного образца. Здесь предположено, что толщина снежного потока над галереей мало отличается от высоты снежного образца.

На фиг. 4 представлены результаты экспериментов для модели галереи с углом наклона к горизонту $\beta = 45^\circ$, которая имела длину по фронту 1 м и ширину вдоль потока $L = a = 0,4$ м, а снежный образец представлял собой параллелепипед с высотой $h = 0,4$ м, шириной по фронту $2,5h$ и длиной $7,5h$. Число Фруда определено по высоте снежного образца h . Величина c_{nd} определялась



Фиг. 3



Фиг. 4

как средняя нормальная нагрузка в центральной части галереи. Минимальное значение $Fg \approx 3$ уже лежит вблизи границы области моделирования, а максимальное ограничено возможностями экспериментальной установки. Кривые 1—3 соответствуют $v_0 = 14,3, 10,0, 6,5$ м/с и $Fg = 7,2; 5,0; 3,2$.

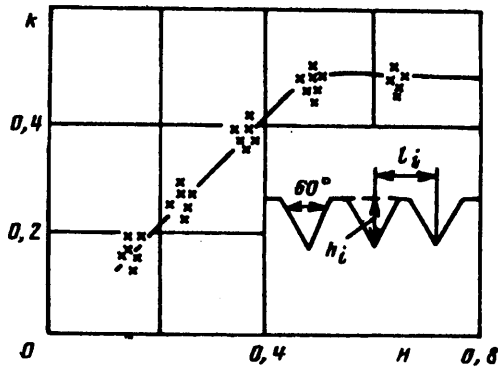
Как показывает эксперимент (фиг. 4), коэффициент $c_{nd}(\tau)$ практически не зависит от числа Фруда. Это позволяет приближенно оценить нагрузки по модельным экспериментам, в которых число Фруда существенно больше натурального. В этом случае можно проводить эксперименты на малых масштабах модели при больших скоростях снежного образца, когда структурные свойства снега несущественны, а существенны только учтенные выше параметры.

Кроме того, на наклонных клиновидных препятствиях изучались законы трения снега о шероховатую поверхность препятствия. В этих экспериментах замерялись касательные составляющие напряжения в зависимости от масштаба стандартной шероховатости (фиг. 5), где $H = h_i/l_i$, h_i — глубина царапин, l_i — шаг между ними:

h_i , мм	0,04	0,15	0,45	0,75	1,50
l_i , мм	0,25	0,50	1,20	1,50	2,40

Опыты проводились с крупнозернистым фирновым снегом с характерным размером зерна ~ 3 мм. Препятствия представляли собой наклонную к горизонту под углом $\beta = 30, 45, 60^\circ$ стенку типа галереи. На фиг. 5 представлена зависимость коэффициента трения k , равного отношению касательной силы к нормальной, от шероховатости H .

Можно сделать вывод, что независимо от формы препятствия справедлив закон трения Кулона, причем для шероховатостей $H > 0,5$ коэффициент трения $k \approx 0,5$. Для меньших шероховатостей коэффициент трения падает по линейному закону до значения $k \approx 0,15$ для поверхностей, представляющих дюралевую пластинку, обработанную крупной наждачной бумагой. Наличие еще одного линейного размера — диаметра зерна — несущественно, так как зерна снега разрушаются на шероховатостях. При больших шероховатостях на стенке, по видимому, образуется слой неподвижного снега.



Фиг. 5

Можно предположить, что в снежной массе также справедлив закон Кулона с коэффициентом трения $k \approx 0,5$, что находится в соответствии с принятой при моделировании моделью снега.

Коэффициент сопротивления при обтекании рассматриваемых препятствий существенно превосходит коэффициент сопротивления, который можно было бы ожидать при обтекании подобных препятствий идеальной несжимаемой жидкостью, что связано с наличием больших касательных напряжений в снежном потоке.

Установка «Снежный лоток» на основе экспериментов с малыми моделями позволяет определить безразмерные коэффициенты нагрузок c_i для сооружений и объектов любой формы. Имея значения безразмерных коэффициентов сопротивления c_i (Fr) для различных типов препятствий, можно оценить силу, действующую на натурное препятствие, в виде $F = 1/2 c_i \rho v^2 S$, где S — характерная площадь препятствия, c_i — функции, зависящие от числа Фруда и безразмерных коэффициентов трения k_i и ξ_i .

Авторы признательны Ц. И. Ставскому, А. И. Денисову и другим участникам экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Briukhanov A. V., Grigorian S. S., Shurova I. E. On some new approaches to the dynamics of snow avalanches//Phys. Snow and Ice. Proc. Int. Conf. on Low Temperature Sci. 1966. V. 1. Pt 2. Sapporo, Japan, 1967. P. 1223—1241.
2. Шурова И. Е. О сверхзвуковом характере течения в снежной лавине//Матер. 3-го Общесоюз. гляциологического симпозиума. Фрунзе, 1968. С. 221—224.
3. Шурова И. Е. Механизм взаимодействия движущейся снежной массы с неподвижным препятствием//М.: Итоги науки. ВИНТИ. География. 1970. С. 98—116.
4. Шурова И. Е., Якимов Ю. Л. Исследование удара снега о неподвижное препятствие//Материалы гляциологических исследований. № 16. М., 1970. С. 155.
5. Shurova Y. E. A mechanism of the interaction of a moving snow mass with a fixed obstacle//Soviet Avalanche Research Avalanche Bibliography Update: 1977—1983, Rep. GD-16, November, 1984. P. 129—152.
6. Шурова И. Е., Якимов Ю. Л. Определение напряжений за фронтом ударной волны в пылевой снежной лавине с учетом прочности твердой фазы//ПМТФ. 1969. № 1. С. 100—101.
7. Jakimov Yu. L., Shurova I. E. Determining snow avalanche load on a structure by physical modeling//Soviet Avalanche Research Avalanche Bibliography Update: 1977—1983, Rep. GD-16. November, 1984. P. 159—164.
8. Жигачев Л. И., Шурова И. Е., Якимов Ю. Л. Определение нагрузок на сооружение от снежной лавины методом физического моделирования//Тр. САРНИГМИ. Ташкент, 1972. С. 143—147.
9. Жигачев Л. И., Шурова И. Е., Якимов Ю. Л. Установка для исследования силового воздействия снежных лавин на сооружения//Склоновые процессы. Вып. 1. 1974. М.: Изд-во МГУ, С. 169—172.