

## **ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ИСКУССТВЕННЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ ДЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ СНЕЖНОЙ ЛАВИНЫ**

*Проведён анализ зависимости максимальной кинетической энергии снежной лавины за препятствием от его высоты и угла крутизны склона. Получено аналитическое выражение, позволяющее прогнозировать ослабляющее действие препятствий.*

*Ключевые слова: лавина, энергия, прогнозирование, модель.*

*A.S. Soloviev, A.V. Kalach, O.M. Lebedev, A.Yu. Zenin*

## **EVALUATION OF PARAMETERS OF ARTIFICIAL OBSTACLES FOR AVALANCHE EASING**

*Analyzed of dependence of the maximum kinetic energy of an avalanche behind an obstacle from height of an obstacle and a corner of a steepness of a slope. The analytical expression is received, allowing to predict weakening action of obstacles.*

*Key words: an avalanche, energy, forecasting, model.*

Одной из мер защиты ключевых объектов от лавинной опасности в горных районах является установка искусственных препятствий и заграждений [2]. За многие десятилетия накоплен определённый опыт установки препятствий и заграждений. Однако подробные экспериментальные исследования того, как препятствия той или иной формы ослабляют лавину сильно затруднены. Сходы лавин происходят неожиданно, процесс взаимодействия с препятствием является быстротекущим, обтекание препятствия снежной массой сложно зафиксировать и количественно измерить. Поэтому большую помощь в проектировании искусственных заграждений может оказать **имитационное компьютерное моделирование** [3, 4].

Моделирование схода лавины проводится в двумерном пространстве ХОУ. Снежная масса представлена большим количеством (несколько тысяч) элементов-кругов, имитирующих отдельные фрагменты снега и движущихся по законам классической механики [5]. Механические свойства снежной массы закладываются в выражение для силы взаимодействия между двумя элементами. В модели между элементами действуют упругие потенциальные силы и диссипативные силы вязкого трения.

Упругая сила взаимодействия элементов  $i$  и  $j$  зависит от расстояния между ними  $F_{ij}(r_{ij})$  и задаётся линейной зависимостью

$$F_{ij}(r_{ij}) = c \cdot (r_{ij} - d_{\text{э}}),$$

где  $c$  – коэффициент жёсткости, рассчитываемый по модулю упругости снежной массы;

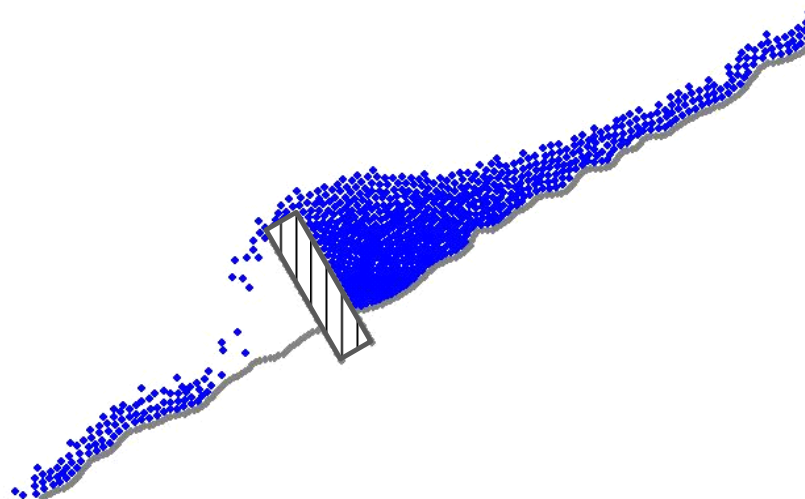
$d_{\text{э}}$  – диаметр элементов снега.

При этом, если расстояние  $r_{ij}$  превышает некоторое критическое расстояние  $r_k$ , в модели происходит отрыв двух элементов друг от друга (то есть обнуление силы взаимодействия). Обычно в модели данного класса выбирают  $r_k = \alpha \cdot d_{\Sigma}$ , причем коэффициентом  $\alpha$  можно учитывать свойство снежной массы к фрагментации. При  $\alpha = 1,0$  учитывается рассыпчатый снег (могут возникать только силы отталкивания между элементами, но не притяжения). При  $\alpha = 1,2$  учитывается липкий мокрый снег (могут возникнуть как силы отталкивания при  $r_{ij} < d_{\Sigma}$ , так и силы притяжения при  $r_{ij} > d_{\Sigma}$ ). Для задания вязкой составляющей силы взаимодействия элементов используется общепринятая пропорциональная зависимость силы от относительной скорости движения двух элементов.

Поверхность склона также, для универсальности модели, представляется элементами-кругами диаметром  $d_{\Sigma}$ , фиксированно расположенными близко друг к другу вдоль имитируемой поверхности склона. Создан некоторый рельеф поверхности (суперпозицией гауссовских пиков), и сама поверхность наклонена на угол  $\varphi$  к линии горизонта (угол крутизны склона).

Снежная масса в начальный момент времени неподвижна, располагается вдоль склона на большом протяжении и имеет толщину снежного покрова  $d$ . С началом компьютерного эксперимента снежная масса, увлекаемая силой тяжести, начинает двигаться вниз по склону, образуя лавину.

В рамках модели препятствие имело форму прямоугольника шириной  $0,5 \text{ м}$  и высотой  $h$ , которую можно было изменять в процессе исследования (рис. 1). При встрече препятствия снежная масса сначала накапливается перед препятствием. Уплотненный перед препятствием снег формирует своеобразную горку, по которой основной объем лавины поднимается над препятствием и после схода с препятствия описывает траекторию, близкую к параболической.



**Рис. 1.** Ослабление лавины препятствием высотой  $h = 1,5 \text{ м}$  на склоне крутизной  $\varphi = 30^\circ$

В уплотнённой снежной массе перед препятствием происходит сложное вихреобразное движение снега, которое приводит к гашению кинетической энергии снежной массы. Поэтому снежная масса после препятствия имеет уже меньшую скорость и соответственно меньшую кинетическую энергию, по сравнению с беспрепятственным движением лавины. Оценки показали, что явления, происходящие в области перед препятствием, приводят к потере почти половины энергии лавины. Непосредственно за препятствием находится защищенная зона, в которую движущаяся снежная масса не попадает. Протяженность защищенной зоны ориентировочно составляет  $(1,0-1,5) \cdot h_{\text{пр}}$  (где  $h_{\text{пр}}$  – высота препятствия) вниз по склону.

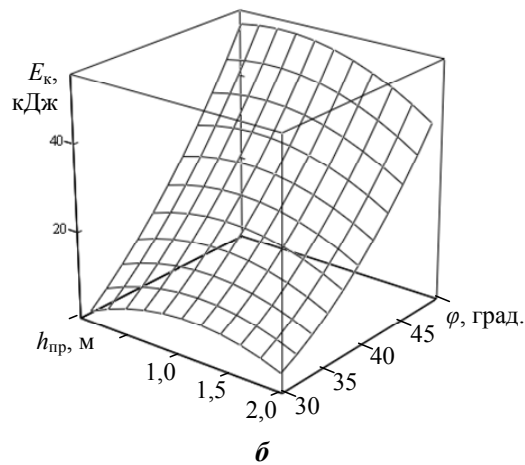
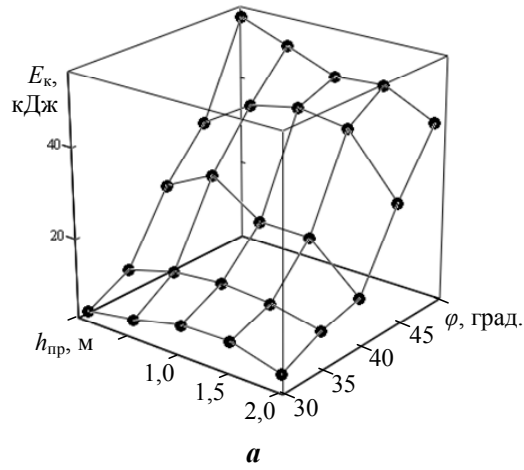
Однако установка препятствия на пути движения лавины приводит и к незначительным отрицательным эффектам. Из-за того, что горка перед препятствием подбрасывает снежную массу вверх, при её последующем движении под действием сил тяжести снег получает дополнительную кинетическую энергию. Поэтому снежная масса падает на склон с большей кинетической энергией, чем в момент преодоления препятствия (ориентировочно на 10-15 %). Данный отрицательный эффект увеличивается с увеличением высоты препятствия.

Для оценки поражающего действия снежной лавины в модели использовали величину  $E_k$  – максимальную в течение всего времени схода лавины кинетическую энергию снежной массы за препятствием. Для изучения влияния угла крутизны склона  $\varphi$  и высоты препятствия  $h_{\text{пр}}$  на кинетическую энергию  $E_k$  проведена серия из 25 компьютерных экспериментов, в которых угол  $\varphi$  задавался значениями  $30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$ ;  $h_{\text{пр}}$  варьировали на уровнях 0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 м. График зависимости  $E_k(h_{\text{пр}}, \varphi)$  представлен на рис. 2, а. С целью облегчения дальнейшего анализа и возможности прогнозировать поражающее действие лавины при наличии препятствия произведена аппроксимация данных компьютерного эксперимента полиномом второго порядка

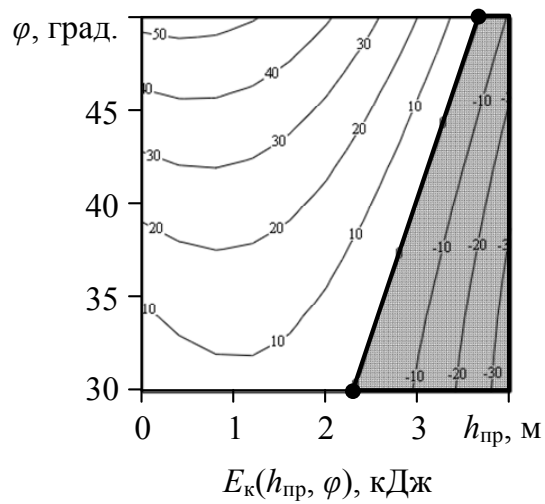
$$E_k(h_{\text{пр}}, \varphi) = -5,129 \cdot 10^{-4} h_{\text{пр}}^2 + 0,048 \varphi^2 - 3,359 \cdot 10^{-3} h_{\text{пр}} \varphi + 0,212 h_{\text{пр}} - 1,310 \varphi - 2,703 \text{ (кДж)},$$

где единицей измерения угла  $\varphi$  является градус, единицей измерения высоты препятствия  $h_{\text{пр}}$  – метр. График аппроксимирующей поверхности второго порядка представлен на рис. 2, б.

Анализ графиков позволяет заключить, что кинетическую энергию лавины можно уменьшить вплоть до нуля путём увеличения высоты  $h_{\text{пр}}$  препятствия. В зависимости от крутизны склона оптимальная высота препятствия  $h_{\text{пр.опт.}}$  полностью ослабляющего лавину, может быть различной. Для определения зависимости  $h_{\text{пр.опт.}}(\varphi)$  график на рис. 2, б перестроен в линии уровня (рис. 3). На рис. 3 затемнена область отрицательной кинетической энергии, соответствующая полному гашению лавины. Граница между областями положительной и отрицательной  $E_k$  представляет собой практически прямую линию.



**Рис. 2.** Зависимость кинетической энергии лавины от высоты препятствия и угла крутизны склона



**Рис. 3.** Зависимость  $E_k(h_{пр}, \varphi)$ , представленная линиями уровня, с наложенной на график зависимостью оптимальной высоты препятствия от крутизны склона  $h_{пр.опт.}(\varphi)$

Для того, чтобы получить аналитическое выражение зависимости  $h_{\text{пр.опт.}}(\varphi)$ , заметим, что граница между областями проходит через точки ( $\varphi = 30^\circ$ ,  $h_{\text{пр.опт.}} = 2,3 \text{ м}$ ) и ( $\varphi = 50^\circ$ ,  $h_{\text{пр.опт.}} = 3,7 \text{ м}$ ). Если искать аналитическую зависимость в линейном виде  $h_{\text{пр.опт.}}(\varphi) = k \varphi + b$  (где  $k$  и  $b$  – угловой коэффициент и начальная точка прямой соответственно), то, подставляя в искомую зависимость координаты двух указанных точек, получаем систему двух уравнений относительно неизвестных  $k$  и  $b$ , решением которой являются  $k = 0,07$  и  $b = 0,20$ . Таким образом, в зависимости от крутизны склона  $\varphi$  оптимальная высота препятствия находится следующим образом:

$$h_{\text{пр.опт.}}(\varphi) = 0,07 \cdot \varphi + 0,20,$$

где единицей измерения угла  $\varphi$  является градус, единицей измерения высоты препятствия  $h_{\text{пр.опт.}}$  – метр.

Сооружение высоких препятствий, например, высотой более 3-4 м, может быть затруднительным, так как высокие препятствия испытывают существенные ударные нагрузки при контакте с лавиной. Для создания необходимой прочности высоких препятствий необходимы значительные затраты строительного материала, создание сложных пространственных конструкций, что влечет существенные материальные затраты. Поэтому на высоких склонах может быть целесообразной установка нескольких низких препятствий последовательно. Каждое препятствие ослабляет лавину приблизительно на 20-50 %, поэтому установив друг за другом 2-3 низких препятствия (высотой 1-2 м) можно практически полностью погасить кинетическую энергию лавины.

Рис. 4 иллюстрирует характер обтекания снежной массой двойного препятствия. При существенном удалении друг от друга двух одинаковых препятствий (рис. 4, а) механизм ослабления лавины каждым из препятствий одинаков (каждое снижает кинетическую энергию лавину на 30 %). При близком расположении препятствий (рис. 4, б) характер движения снежной массы усложняется, поэтому дополнительные исследования могут подтвердить улучшение ослабляющей способности пары препятствий. При установке препятствий различной высоты (рис. 4, в) характер движения снежной массы также изменяется и, возможно, имеет преимущества перед случаем одинаковых препятствий.

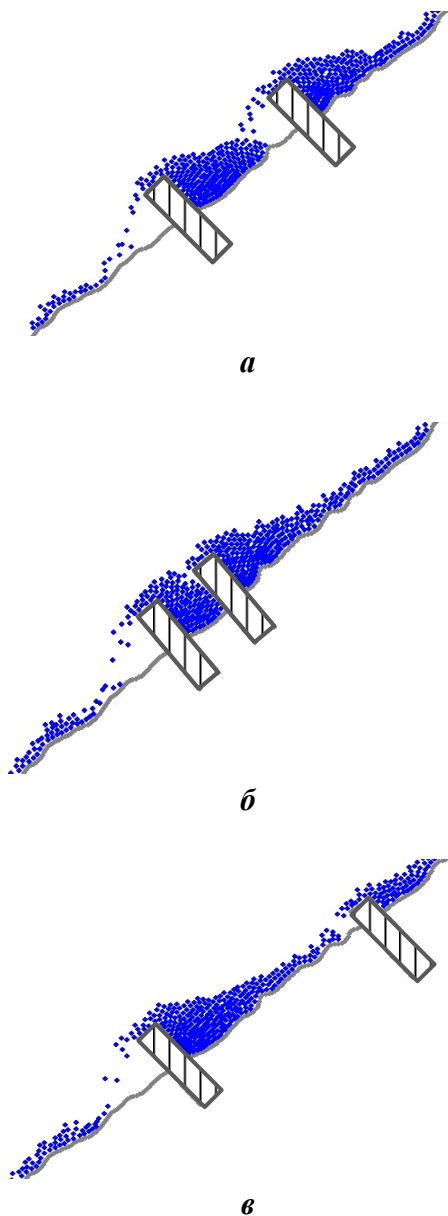
Обобщая полученные результаты, можно сформулировать следующие выводы.

1. Изучена зависимость максимальной кинетической энергии снежной лавины за препятствием от высоты препятствия и угла крутизны склона. Получено аналитическое выражение, позволяющее прогнозировать ослабляющее действие препятствий.

2. Оптимальная высота препятствия, при которой полностью гасится лавина, зависит от угла крутизны склона следующим образом:

$$h_{\text{пр.опт.}}(\varphi) = 0,07 \cdot \varphi + 0,20.$$

3. Для уменьшения материальных затрат на сооружение препятствий целесообразно сооружать не одно высокое препятствие высотой 3-4 м, а два-три препятствия высотой около 2 м последовательно расположенных вдоль склона.



**Рис. 4.** Характер движения снежной массы при встрече двойных препятствий с различными параметрами на склоне крутизной  $\varphi = 40^\circ$

### Литература

1. **Одинцов Л.Г., Дзnelадзе Э.Э.** Обеспечение безопасности при организации туристской деятельности органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации и местного самоуправления. М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС, 2011. 91 с.
2. **ВСН 02-73.** Указания по расчёту снеголавинных нагрузок при проектировании сооружений. М.: Гидрометеиздат, 1973.
3. **Соловьев А.С., Лебедев О.М., Калач А.В.** Имитационное моделирование удара снежной лавины о неподвижное препятствие // Вестник ВГТУ, 2011. т. 7. № 7. С. 88-90.
4. **Particle Based Simulation of Fluids** / Premoze S., Tasdizen T., Bigler J. et al. // Eurographics, 2003. Vol. 22. № 3. P. 103-113.
5. **Hafner J.** Atomic-Scale Computation Materials Science // Acta Mater, 2000. Vol. 48. P. 71-92.