

Соловьев А. С., канд. физ.-мат. наук, доц.
Воронежский институт государственной противопожарной службы МЧС России

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ СНЕЖНЫХ ФРАГМЕНТОВ НА СХОД ЛАВИН

asoloviev58@yandex.ru

Предложена имитационная компьютерная модель схода снежной лавины при разных размерах фрагментов снега. Показано, что с увеличением размера снежных фрагментов уменьшается поражающее действие лавины. Характер схода снежной массы и время наибольшего удара лавины от размера фрагментов практически не зависят.

Ключевые слова: снег, лавина, кинетическая энергия, снежная масса.

Снежные лавины являются источником серьезной опасности для инфраструктуры, местного населения, спортсменов и туристов. Во всем мире широко исследуют возможности прогнозирования схода снежных лавины, разрабатывают защитные и ослабляющие лавину сооружения. В последние десятилетия появилась возможность использовать компьютерное моделирование снежных лавин. Моделирование позволяет изучить фундаментальные свойства движущейся снежной массы, разработать методы прогнозирования времени схода лавины, ущерба от нее, разработать эффективные меры защиты инфраструктуры горных районов [1]. В отличие от прямого экспериментального исследования лавин моделирование существенно упрощает и ускоряет процесс исследования [1]. Лавина образуется в случайный момент времени в случайном месте и сходит за короткое время, что сложно зафиксировать исследовательским оборудованием. Кроме того, уровень кинетической энергии движущейся снежной массы опасен для исследовательского оборудования и самих исследователей [2].

Ранее была разработана методика физико-математического моделирования процессов зарождения и схода снежной лавины [3]. Также было изучено влияние основных параметров снежной массы (толщина снежного покрова, состояние снега, температура) и геометрии склона (угол склона, характер изгиба) на особенности схода снежной лавины. Однако остается неизученным влияние размера фрагментов снежной массы на особенности схода и поражающее действие снежной лавины. В зависимости от предыстории накопления, снежно-ледяная масса, с началом движения вниз по склону, может разбиваться на фрагменты разного размера [4]: от снежинок размером порядка 1 мм, если в снежной массе не происходило процессов перекристаллизации, до ледяных глыб размером порядка 1 м, если в процессе длительного нахождения на склоне снежная масса многократно перекристаллизовывалась.

Целью данной работы являлось исследова-

ние влияния характерного размера фрагментов снежно-ледяной массы на особенности схода снежной лавины и ее поражающее действие.

Разработанная ранее имитационная компьютерная модель схода снежной лавины является упрощенной модификацией SPH-метода (SmoothedParticlesHydrodynamics) [5]. Моделирование зарождения и схода лавины проводилось в двухмерном пространстве (x, z) . Снежная масса представлена большим количеством (порядка 10^4) элементов-кругов, имитирующих отдельные фрагменты снега, и движущихся по законам классической механики [5]. Механические свойства снежной массы закладывали в выражение для силы взаимодействия между двумя элементами. В модели между элементами действуют упругие (потенциальные) силы и силы вязкого трения (диссипативные). Упругая сила взаимодействия элементов i и j зависит от расстояния между ними $F_{ij}(r_{ij})$ и задается линейной зависимостью $F_{ij}(r_{ij}) = -c \cdot (r_{ij} - d_3)$, где c – коэффициент жесткости, рассчитываемый по модулю упругости снежной массы; d_3 – 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 моделях данного класса выбирают $r_k = k_{\text{отр}} \cdot d_3$, причем коэффициентом $k_{\text{отр}}$ можно задавать склонность снежной массы к фрагментации. При $k_{\text{отр}} = 1,0$ воспроизводится рассыпчатый снег (могут возникать только силы отталкивания между элементами, но не притяжения). При $k_{\text{отр}} = 1,2$ воспроизводится липкий мокрый снег (могут возникнуть как силы отталкивания при $r_{ij} < d_3$, так и силы притяжения при $d_3 < r_{ij} < r_k$). Для задания вязкой составляющей силы взаимодействия элементов использовалась общепринятая пропорциональная зависимость силы от скорости движения двух элементов по отношению друг к другу. Таким образом, движение снежной массы описывалось системой дифференциальных уравнений второго порядка, которые численно интегрируются по времени с использованием численного метода - усовер-

шенствованного метода Эйлера-Коши.

В рамках данной работы диаметр элементов снежно-ледяной массы d_3 изменялся от 5 до 40 см. При проведении компьютерного эксперимента по сходу снежной лавины, в начальный момент времени снежная масса помещалась на склон, представляющий собой прямую, расположенную под углом 40° к горизонту. В начальный момент времени параметры снежной массы обеспечивали ее неподвижное состояние на склоне. Через определенное время в модели изменяли параметры снежной массы (коэффициент сцепления $k_{\text{огр}}$) таким образом, чтобы инициировать сход лавины. Снежная масса сначала медленно сползала по склону, затем постепенно переходила в прыгающее фрагментированное состояние, то есть, в полноценную лавину (рис. 1).

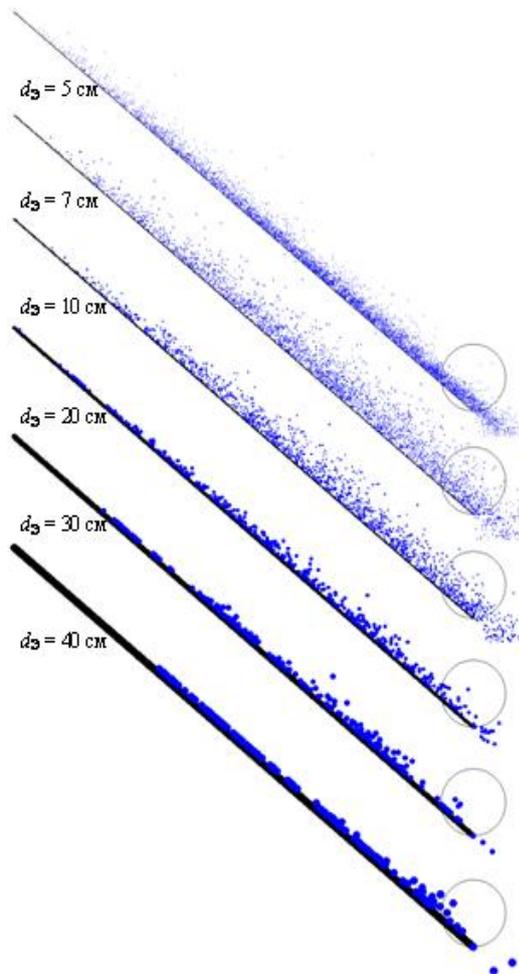


Рис. 1. Влияние размера фрагмента снежной массы d_3 на характер схода лавины

Независимо от размера фрагментов, характер схода снежной массы остается практически одним и тем же: при движении вниз снежная масса сначала разрушается (фрагменты отделяются друг от друга), затем каждый фрагмент, увлекаемый вдоль склона силами тяжести, совершает ударно-поступательное движение, со-

ударяясь то со склоном, то с соседними фрагментами.

Анализ последовательности изображений (рис. 1) при сходе модельных лавин показал, что с увеличением размера фрагмента увеличивается трение фрагментов о склон. Также замечено, что с уменьшением размера фрагментов существенно увеличивается толщина лавинного потока. Это связано с тем, что чем меньше и легче фрагменты, тем выше они подбрасываются при контакте с соседними элементами (своеобразная лавинная пыль). Исключение из данной закономерности составила лавина с размером фрагментов $d_3 = 5$ см.

Поражающее воздействие лавины оценивалось по временным зависимостям кинетической энергии $E_{\text{кин}}(t)$ снежной массы (рис. 2), проходящей через круг (в реальном трехмерном пространстве эквивалентом круга является цилиндр) со значительным радиусом, чтобы геометрически перекрыть всю толщину лавинного потока.

В целом характер зависимостей $E_{\text{кин}}(t)$ приблизительно одинаков для разных размеров снежных фрагментов.

Зависимость $E_{\text{кин}}(t)$ имеет один характерный экспоненциальный фронт и характерный экспоненциальный спад (рис. 2). Однако размер фрагмента d_3 влияет на высоту и ширину пика, а также может вызвать раздвоение основного пика (рис. 2, $d_3 = 20$ см) появление предпика (рис. 2, $d_3 = 20, 30$ см). Нарастание кинетической энергии, испытываемой объектом (экспоненциальный рост), связано с нарастанием средней скорости движения снежных фрагментов в процессе схода лавины; экспоненциальный спад же связан с "иссякновением" лавины (вся снежная масса постепенно сходит). Наличие предпика связано, по-видимому, с тем, что верхние слои снежной массы (крупные глыбы в случае $d_3 = 20, 30$ см) лучше скользят по нижним, чем нижние слои по склону, и поэтому сходят в первую очередь, формируя предпик, а затем их догоняют нижние слои формируя основной пик.

По зависимостям $E_{\text{кин}}(t)$ определены такие параметры, как высота пика E_{max} , характерное время удара лавины с момента начала схода t_{max} , а также "мощность воздействия" P (определяется по площади под пиком зависимости $E_{\text{кин}}(t)$ и имеет размерность кДж·с) (рис. 3).

Снежные лавины с малым размером снежных фрагментов (7, 10 см) оказывают наивысшее энергетическое воздействие, судя по величинам E_{max} и P (рис. 3, а, в). С увеличением размера фрагментов E_{max} и P уменьшаются, так как все большая доля снежных фрагментов оказывается в нижнем слое, контактирующем со скло-

ном и испытывающем существенное трение, поэтому средняя скорость движения снежной массы снижается, а соответственно и уменьшаются показатели E_{\max} и P .

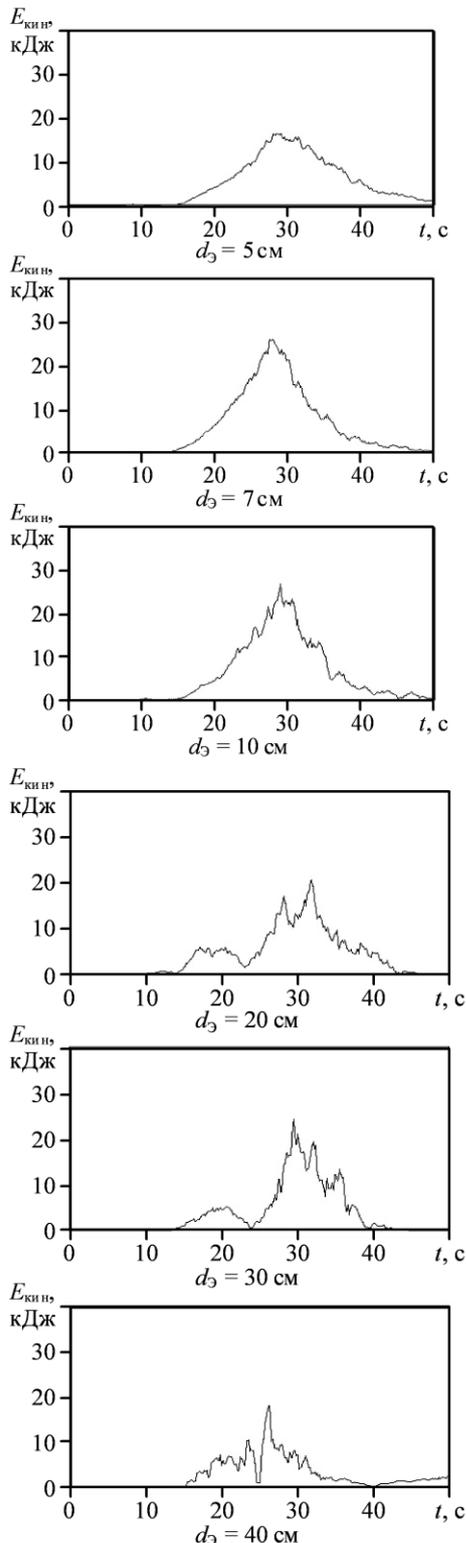


Рис. 2. Зависимость кинетической энергии, воспринимаемой объектом цилиндрической формы, расположенным в нижней точке склона, при разных размерах d_3 фрагмента снежной массы от времени

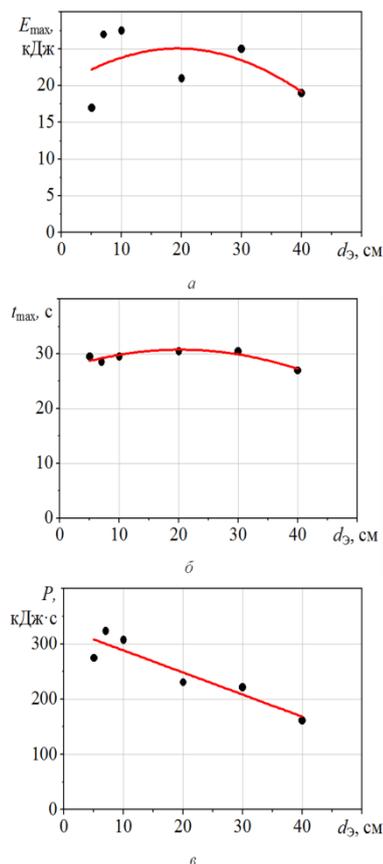


Рис. 3. Влияние размера фрагмента снежной массы d_3 на основные показатели поражающего действия снежной лавины

Однако время прихода максимума энергии снежной лавины (t_{\max}) практически не зависит от размера снежных фрагментов (рис. 3, б) и составляет, для данного типа компьютерных экспериментов, около 30 с. Постоянство времени схода лавины позволяет рассматривать ее, укрупненно, как некоторое "эффективное тело", движущееся по склону под действием силы тяжести и не зависящее от размера фрагментов, и от трения о склон. В то же время, не смотря на постоянство времени схода лавины, наблюдается существенное влияние размера снежного фрагмента на характер роста и спада кинетической энергии внизу склона.

Обобщая изложенный в статье материал, можно сформулировать следующие выводы. Размер снежных фрагментов практически не влияет на характер схода снежной массы и время наибольшего удара лавины. В то же время с увеличением размеров снежных фрагментов может наблюдаться предварительный этап схождения лавины: перед тем, как основная лавина достигнет основания склона, сначала скатываются крупные фрагменты из верхних слоев снежной массы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. Учебное пособие. – М. :Высш. шк., 1998. – 319 с.
2. Войтковский К.Ф. Лавиноведение. – М.:Изд-во МГУ, 1989. – 156 с.
3. Соловьев А.С., Калач А.В., Псарев С.А. Моделирование таяния снежного покрова на склоне с образованием лавины // Проблемы управления рисками в техносфере. 2012. №3(23). С.19-24.
4. Шевчук С.С. Определение параметров снегоудерживающих сооружений при проектировании защиты железных дорог от лавин. – Дисс. . к.т.н.: Новосибирск, 2006. 109 с.
5. Premoze S., Tasdizen T., Bigler J. et al. Particle Based Simulation of Fluids // Eurographics, 2003. Vol. 22.N 3. P. 103–113.