

А.С. Соловьёв, А.В. Калач, С.А. Псарев

(Воронежский институт Государственной противопожарной службы МЧС России;
e-mail: a_kalach@mail.ru)

ОБРАЗОВАНИЕ СНЕЖНОЙ ЛАВИНЫ ПРИ ТАЯНИИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА СКЛОНЕ

Разработана имитационная математическая модель для прогнозирования схода влажных снежных лавин. Показано, что сход лавины происходит при определенных значениях коэффициента вязкости и склонности к фрагментации снежной массы.

Ключевые слова: снег, влажная лавина, температура воздуха, крутизна горного склона.

A.S. Soloviev, A.V. Kalach, S.A. Psarev

AVALANCHE FORMATION AT THAWING OF THE SNOW COVER ON THE INCLINE

The simulation mathematical model of forecasting of a descent of the damp avalanches are developed. It is shown that the avalanche descent occurs at certain values of a coefficient of viscosity and propensity to a fragmentation of snow mass.

Key words: snow, the damp avalanche, air temperature, a hillside steepness.

Одним из факторов, вызывающих сход снежной лавины, является изменение температуры воздуха вблизи снежной массы. Изменение температуры воздуха (как повышение, так и понижение) приводит к изменению механических параметров снега (вязкости, сцепления отдельных фрагментов), что вызывает появление внутренних напряжений в снежной массе и может вызвать её деформации и разделение на фрагменты, которые могут привести к образованию снежной лавины.

Для изучения влияния температуры воздуха на сход лавины целесообразно использовать методы математического моделирования, позволяющие с низкими затратами времени и финансов многократно исследовать сход снежной лавины и её характеристики [1, 2]. Авторами разработана математическая модель зарождения и схода снежной лавины при изменении температуры окружающего воздуха и таянии снежного покрова на склоне.

Моделирование зарождения и схода лавины проводится в двумерном пространстве XOY . Снежная масса представлена большим количеством (порядка 10^3) элементов-кругов, имитирующих отдельные фрагменты снега и движущихся по законам классической механики [3, 4]. 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:

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

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

d_{Δ} – 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 $r_k = k_{\text{огр}} \cdot d_{\text{Э}}$, причём коэффициентом $k_{\text{огр}}$ можно задавать степень фрагментации снежной массы.

При $k_{\text{огр}} = 1,0$ воспроизводится рассыпчатый снег (могут возникать только силы отталкивания между элементами, но не притяжения). При $k_{\text{огр}} = 1,2$ воспроизводится липкий мокрый снег (могут возникнуть как силы отталкивания при $r_{ij} < d_{\text{Э}}$, так и силы притяжения при $d_{\text{Э}} < r_{ij} < r_k$). Для задания вязкой составляющей силы взаимодействия элементов используется общепринятая пропорциональная зависимость силы от скорости движения двух элементов по отношению друг к другу.

Поверхность склона также, для универсальности модели, представляется элементами-кругами размера $d_{\text{Э}}$, фиксировано расположенными близко друг к другу вдоль имитируемой поверхности склона. Неровность поверхности в модели воспроизводится наложением гауссовских пиков, и сама поверхность повёрнута на определённый угол φ к линии горизонта (крутизна склона).

Снежная масса в начальный момент времени неподвижна, располагается вдоль склона на большом протяжении и имеет некоторую толщину снежного покрова. Свойства снега соответствуют температуре -10 °С. К концу компьютерного эксперимента снежная масса в модели полностью превращается в воду при температуре 0 °С.

В первой серии компьютерных экспериментов имитировали "мгновенное" таяние снежной массы. В течение первых 7 секунд компьютерного эксперимента снежный покров обладал высокой вязкостью ($d = 1,5$ Н·с/м) и связностью ($k_{\text{огр}} = 1,05$), поэтому располагался на склоне неподвижно.

В момент времени $t = 7$ с производилось скачкообразное изменение параметров снега, соответствующее состоянию тающего снега. Коэффициент вязкого трения между элементами снега снижался до значения $d = 0,5$ Н·с/м, а коэффициент ограничения взаимодействия – до значения $k_{\text{огр}} = 1,02$ (рис. 1).

Так как теперь снежный покров по механическим свойствам становился ближе к жидкости, чем к твердому телу, он начинал двигаться вниз по склону. При малой крутизне склона (до 30°) снежный покров медленно сползал со средней скоростью $v_{\text{ср}}$, не превышающей $0,6$ м/с (рис. 1). При этом его движение существенно тормозилось взаимодействием с поверхностью склона, поэтому скорость движения снежной массы увеличивалась до некоторого значения и более не менялась.

При большой же крутизне склона (40° - 60°) степень воздействия сил тяжести повышалась, по сравнению с воздействием сил трения, поэтому образовывалась полноценная лавина (рис. 1): скорость движения снежной массы возрастала (в течение более чем 10 с скорость достигала 6 м/с).

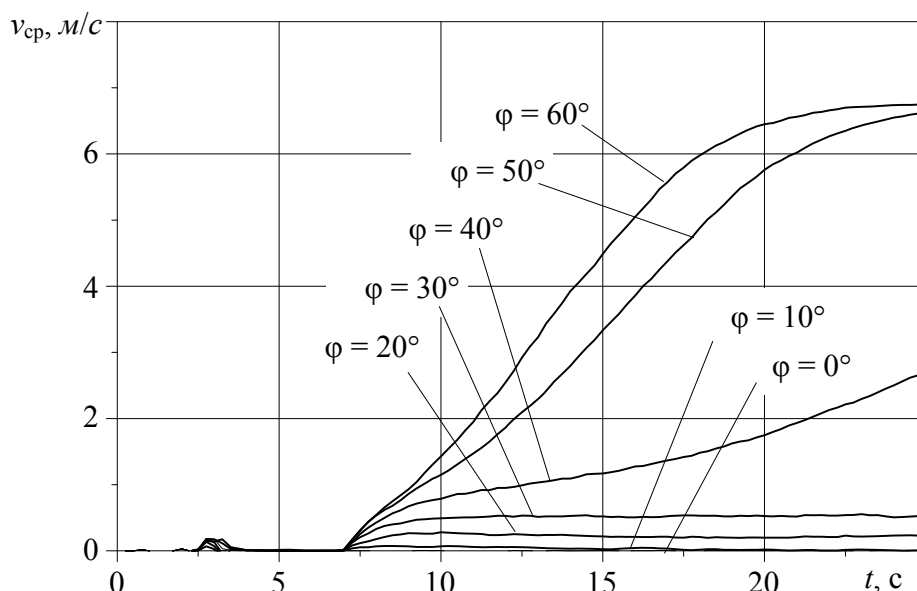


Рис. 1. Увеличение скорости движения снежной массы v_{cp} с течением времени. В момент времени $t = 7$ с производится скачкообразное изменение параметров снежной массы ("таяние снега")

Для повышения адекватности модели в следующем компьютерном эксперименте производили не мгновенное изменение параметров снежной массы, а плавное. Плавное изменение параметров общепринято описывать так называемой "ступенькообразной" ("сигмоидальной") функцией. Такая функция воспроизводит переход величины с одного уровня на другой. Из сигмоидальных функций наибольшее распространение для задач подобного класса получила функция Больцмана, которая часто применяется в описании химических процессов:

$$F(t) = F_2 + \frac{F_1 - F_2}{1 + e^{-\frac{t-t_0}{\Delta t}}}, \quad (1)$$

где F_1 и F_2 – начальный и конечный уровни функции;

Δt – параметр, определяющий время перехода с уровня на уровень;

t_0 – момент времени, в который функция наполовину перешла с уровня на уровень (точка перегиба сигмоидальной функции Больцмана).

Для двух основных параметров, определяющих состояние снежной массы переход производится с уровня 1,5 на уровень 0,5 $H \cdot c/m$ для d и с уровня 1,05 на уровень 1,02 для $k_{огр}$. Учитывая, что общая длительность компьютерного эксперимента составляла 100 с, было выбрано $t_0 = 50$ с, $\Delta t = 20$ с. Тогда зависимость параметров d и $k_{огр}$ от времени описывается следующими формулами:

$$d(t) = 0,5 + \frac{1,5 - 0,5}{1 + e^{-\frac{t-50}{20}}}, \quad (2)$$

$$k_{огр}(t) = 1,02 + \frac{1,05 - 1,02}{1 + e^{\frac{t-50}{20}}}, \quad (3)$$

где t измеряется в секундах.

График изменения с течением времени параметра d приведен на рис. 2, вверху. График $k_{огр}(t)$ имеет аналогичный вид, поэтому не приводится.

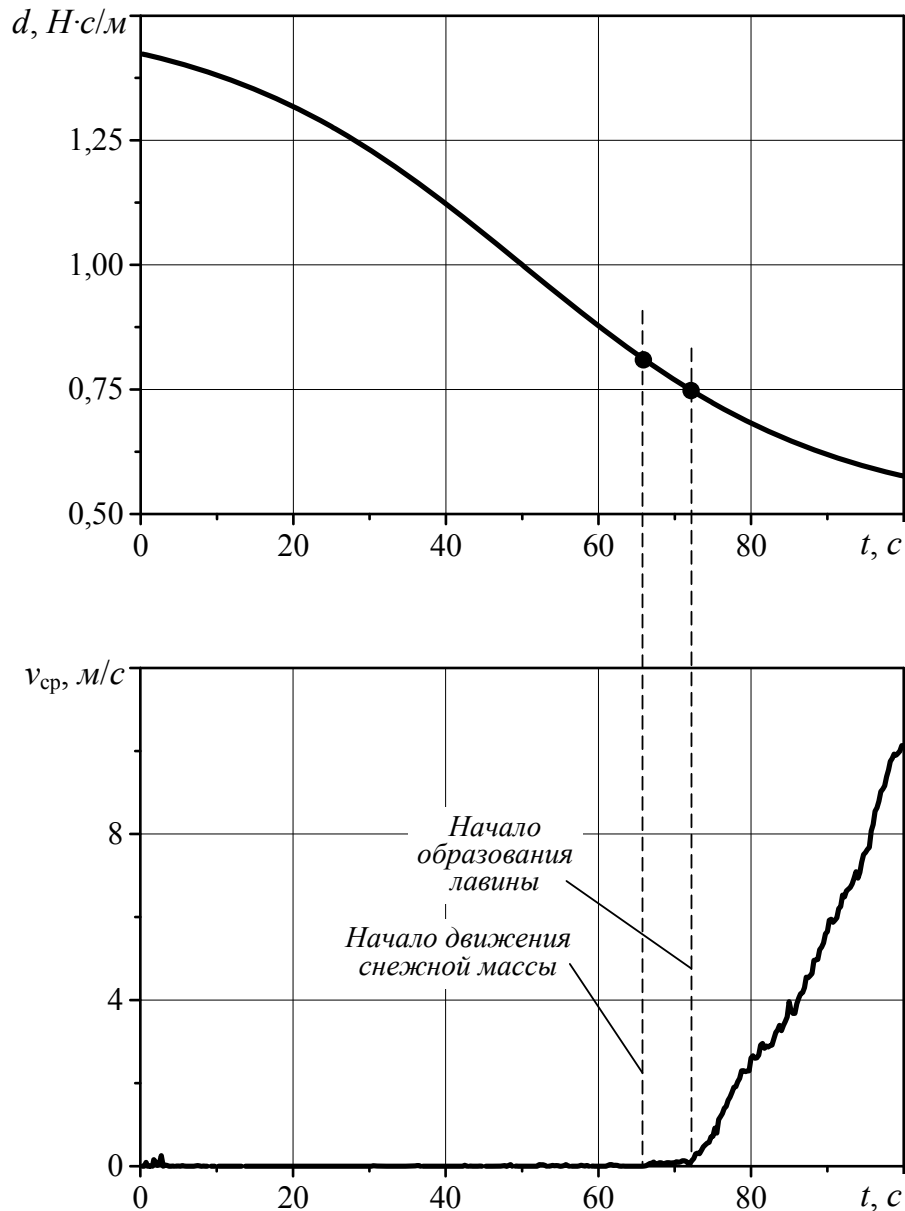


Рис. 2. При медленном уменьшении коэффициента вязкости снежной массы d (график вверху) (и одновременном согласованном уменьшении параметра R_0) в некоторый момент времени начинается образование снежной лавины: рост скорости снежной массы (график внизу)

В данном компьютерном эксперименте снежная масса изначально располагалась на склоне крутизной 50° (при таком угле образуется ярко выраженная лавина). С началом плавного изменения параметров снега ("таянии") долгое время (вплоть до 65 с , рис. 2, внизу) снежная масса была неподвижной не претерпевала сколько-нибудь заметных изменений. Скорость движения снежной массы в этом временном интервале была практически нулевой. Начиная же с момента времени $t = 65\text{ с}$ происходило зарождение и сход снежной лавины, что иллюстрируется графиком скорости $v_{cp}(t)$ (рис. 2, внизу) и серией последовательных иллюстраций состояния снежной массы (рис. 3).

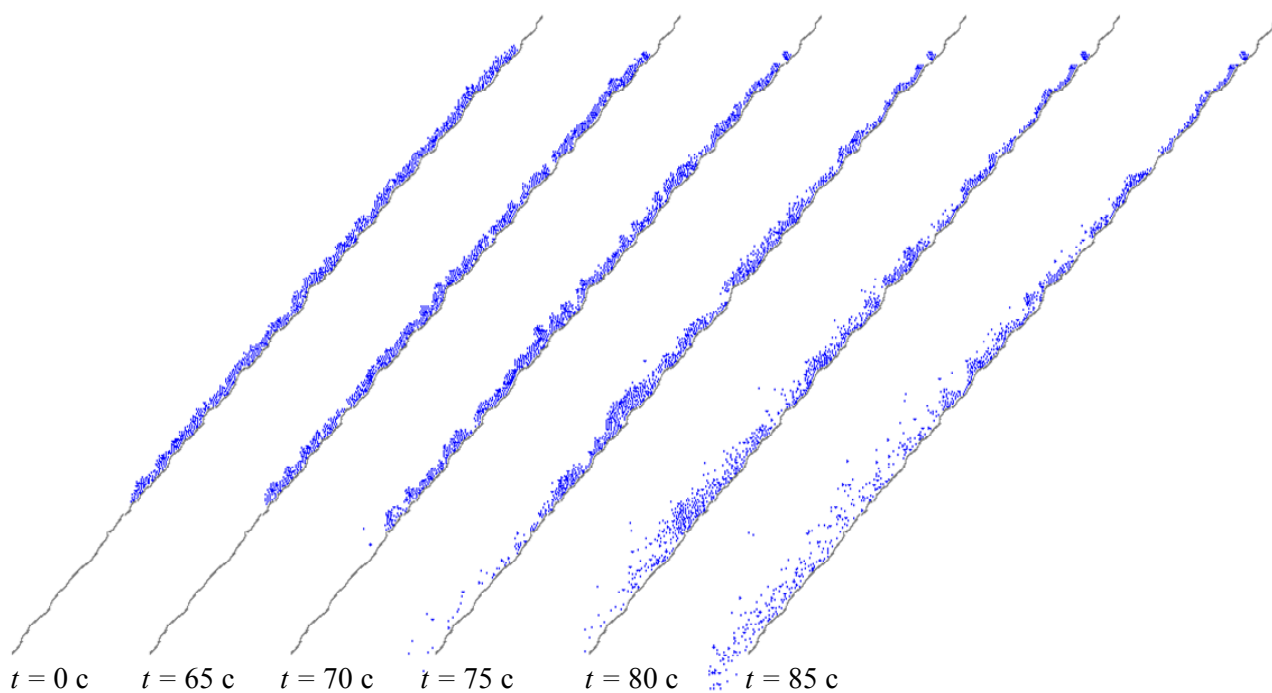


Рис. 3. Движение снежной массы по склону и изменение её структуры по мере таяния снега

С 65 с до 72 с характер движения снежной массы может быть описан как медленное сползание по склону (v_{cp} не более $0,2\text{ м/с}$). На иллюстрациях (рис. 3) видно, что при $t = 70\text{ с}$ снежный покров распределен уже не равномерно вдоль склона, а с уплотнениями и просветами. Начиная с $t = 72\text{ с}$ характер движения снега меняется: образуется полноценная лавина. Скорость движения снежной массы неограниченно возрастает (рис. 2, внизу). Снежная масса становится всё более фрагментируемой (рис. 3, $t = 75\text{ с}$, $t = 80\text{ с}$), и вдоль склона формируется псевдо-кипящий слой, который практически не испытывает взаимодействия с поверхностью склона и поэтому скорость его движения, определяемая в основном силами тяжести, быстро растёт (рис. 3, $t = 85\text{ с}$).

Необходимо отметить, что несмотря на плавное изменение параметров снега, зарождение и сход лавины начинаются внезапно в некоторый момент времени. Этот момент времени определяется достижением параметрами крити-

ческих значений (в частности, $d = 0,8 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{с}$, $k_{\text{огр}} = 1,03$), а также некоторой предысторией (предварительной перестройкой снежной массы).

Обобщая полученные результаты можно сформулировать следующие выводы.

1. Впервые разработана имитационная модель зарождения и схода снежной лавины при таянии снежного покрова на горном склоне.

2. В зависимости от крутизны склона происходит либо медленное сползание тающей снежной массы по склону (угол склона до 30°), либо лавинообразное движение снега (угол склона более 40°).

3. При медленном таянии снежной массы лавина образуется внезапно в некоторый момент времени, в который параметры снежной массы достигают критических значений (в частности, $d = 0,8 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{с}$, $k_{\text{огр}} = 1,03$) и к которому внутренняя структура снежной массы успевает перестроиться.

Литература

1. *Соловьёв А.С., Лебедев О.М., Калач А.В.* Математическое моделирование поведения снежной массы на горном склоне // Вестник ВГТУ, 2011. Т.7. №4. С. 115-117.

2. *Имитационная* модель схода снежной лавины / Соловьёв А.С., Посметьев В.В., Калач А.В., Лебедев О.М. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011614354 от 2.06.2011 г.

3. *Particle Based Simulation of Fluids* / Premoze S., Tasdizen T., Bigler J. et al. // Eurographics, 2003. Vol. 22. № 3. P. 103-113.

4. *Hafner J.* Atomic-Scale Computation Materials Science // Acta Mater, 2000. Vol. 48. P. 71-92.