А.С. Соловьев, А.В. Калач
(Воронежский институт Государственной противопожарной службы МЧС России;
e-mail: a_kalach@mail.ru)

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СХОДА СНЕЖНЫХ ЛАВИН

Проведён анализ процесса схода снежных лавин. Предложена модель блочной среды для расчета критических напряжений в снежном массиве. Материалы могут быть полезны при решении проблем безопасности технических сооружений в горных регионах.
Ключевые слова: лавина, прогнозирование, модель.

A.S. Solovyov, A.V. Kalach

SOME ASPECTS OF SNOW-SLIP DESCENDING FORECAST

The analysis process of snow-slip descending forecast has been viewed. The model of block environment for calculating the critical strain in a snow mass is proposed. The material can be useful at decision of the problems to safety of the technical buildings in mountain region.
Key words: snow-slip, forecast, model.

Статья поступила в редакцию 8 декабря 2010 г.

Лавины – наиболее типичное и разрушительное явление в тех горных районах, где в достаточном количестве выпадает снег. Лавинной опасности подвержены большие территории нашей страны на Кавказе, в заполярных Хибинах, Южной Сибири, Забайкалье и на дальнем Востоке. Особенно актуальными становятся вопросы прогнозирования и предупреждения разрушительных последствий схода лавин ***при развернувшемся крупном строительстве олимпийских объектов*** в Краснодарском крае. Однако, в настоящее время недостаточно изучена кинематика лавинных процессов, отсутствует математическое описание постепенного развития процесса нарушения устойчивости, формирования поверхности скольжения, нарастания во времени напряженного состояния в локальных зонах в толще по мере прогрессирующего нарушения прочности снежного массива.

Обрушение снежной лавины связывается с преодолением действующими на некоторых площадках касательными сдвигающими напряжениями сил сопротивления снега сдвигу. Касательные напряжения возникают в толще откоса в результате действия на элементы снежного покрова собственной силы тяжести, а также дополнительной нагрузки на откосе и давления фильтрующей через толщу снега воды при положительных температурах. Сопротивление снежного пласта сдвигу, как и во всех иных случаях, определяется возникающими в его массиве силами внутреннего трения (фактор угла внутреннего трения и нормальных напряжений) и сцепления. Нарушение прочности толщи снега происходит по наиболее напряженным площадкам, где отношение его сопротивляемости сдвигу к величине касательного напряжения оказывается минимальным. В пределе все эти площадки сливаются в некоторую криволинейную

поверхность скольжения, находящую в условиях плоской задачи отражение в плоскости чертежа в виде некоторой линии скольжения. Точное очертание линии скольжения, необходимое для решения задачи в целом, в силу недостаточной изученности самого механизма и природы оползневого явления, до настоящего времени не установлено.

С физической точки зрения, лавина представляет собой быстрый сход с горного склона снежного покрова под действием силы тяжести. При этом, вначале снег, отложившийся на горном склоне, начинает постепенно и медленно сползать. Верхние слои снега при сползании опережают нижние. Самый нижний слой, примыкающий к грунту, зачастую остается неподвижным. Такое движение соответствует распределению скоростей в слоях текущей жидкости, то есть можно утверждать, что снег "течёт" по склону. Когда скорости и напряжения в этом потоке достигают некоторых критических пределов, медленное течение скачкообразно переходит в бурный лавинный поток. На некотором расстоянии от гребня склона в снежном покрове образуется линия отрыва, за которой начинается беспорядочный сход нижележащего снега, увлекающего за собой новые снежные массы по пути следования так называемой ***зоной транзита.*** Масса низвергающегося снега с воздушными промежутками называется ***лавинным телом.*** У выхода в долину склон становится положе, и скорость лавины уменьшается вплоть до полной остановки. Снег нагромождается в виде лавинного конуса выноса.

Начало и конец движения массы снега типичны почти для всех лавин, но сами лавинные потоки существенно отличаются друг от друга, в зависимости от типа снега (сухой, мерзлый или влажный). В соответствии со свойствами снега **лавины** называются ***сухими*** и ***мокрыми***. Тип движения лавин зависит от формы и размеров склонов. Защита от лавин, борьба с ними немыслимы без знания закономерностей, управляющих лавинами.

Известно, что условия возникновения лавин определяются их типами. М. Отуотер [1] различает **два типа лавин:** ***кратковременного*** и ***замедленного действия.*** Первые находятся в тесной причинной связи с внешними, а также погодными факторами. Главная причина возникновения лавин замедленного действия – длительные внутренние изменения в самом снежном покрове. Надежно установить опасность подобных изменений в пласте снега можно только с помощью рытья шурфов.

К основным факторам, способствующим возникновению ***лавин кратковременного действия***, относятся: угол склона с горизонтом, высота снежного покрова на склоне, характер поверхности склона и снега, интенсивность и общая продолжительность снегопадов, направление и сила ветров, метелевый нанос снега на склон, дожди при оттепелях.

Лавиноопасными считаются склоны, наклоненные к горизонту под углом 25-55°. Снег на таких склонах удерживается силами сцепления, величина которых зависит от гладкости подстилающих поверхностей. Неровная поверхность, густой лес на склонах предохраняют снег от падения. Однако не всякая растительность способствует удержанию снега. Например, стебли густой высокой травы и ветви гибких кустарников под действием снежной нагрузки расстила-

ются вниз по склону, образуя опасную поверхность скольжения. Свежий снег, выпавший на гладкую, затвердевшую поверхность снежного покрова, может легко соскользнуть вдоль этой поверхности. Известно, что чем больше высота снежного покрова на склоне, тем вероятнее сход лавины. При превышении некоторой критической высоты снежного покрова H_n возможна лавина. Как правило, минимальные значения этой критической высоты – 25-30 *см*, хотя известны сходы и более тонких пластов. Очень быстрый прирост снежного покрова не оставляет времени для его упрочения и развития связей с подстилающей поверхностью.

Интенсивность снегопада измеряется в сантиметрах снега, выпавшего за час. Практикой установлено, что при интенсивности снегопада более 2 *см*/*ч* и длительности его до 10 *ч* и более лавинная опасность весьма велика. При холодных ветрах со скоростью свыше 10-15 *м*/*с* (измеренной на высоте флюгера метеорологической станции – около 10 *м*) ускоряются процессы метаморфизма в снежном покрове. Нижние слои снега разрыхляются, а верхние, наоборот, уплотняются за счет кристаллизации охлажденных паров. Рыхлые слои в конце концов не выдерживают тяжести вышележащих плотных снежных досок. Возникает лавина, так и называемая ***лавиной из снежных досок.*** Если ветры сопровождаются метелью, склон отягощается дополнительным грузом метелевого снега с образованием так называемых "карнизов", обрушение которых приводит к образованию лавины.

Метель – один из наиболее серьезных признаков лавинной опасности. Лавины почти неизбежно начинаются или одновременно с сильной метелью или через несколько часов после неё. При длительных оттепелях и весной снежный покров на склонах становится в верхних слоях или по всей глубине рыхлым, крупнозернистым, легко проницаемым для влаги. Характерная особенность такого снега – однородная температура пласта, близкая к нулю. Если подстилающий грунт водонепроницаем, то даже незначительные жидкие осадки, быстро просочившись вниз, образуют поверх него пленки с очень малым сцеплением, так что лавина может случиться и во время дождя.

Лавины замедленного действия кажутся ничем не связанными с внешней погодной обстановкой и происходят внезапно. Прогноз такого типа лавин особенно сложен и требует знания особенностей физических процессов в толще снежного покрова. Испарение снежных зерен, миграция паров и их кристаллизация в холодных и более плотных слоях происходят особенно быстро. Образуются слои глубинного инея или глубинной изморози, что легко обнаруживается на стенке шурфа по характерной гроздьевидной форме слоев кристаллов. В таких слоях под нагрузкой полностью разрушаются связи между кристаллами, и они превращаются в своеобразные подшипники для лавины.

Главной задачей борьбы с лавинами является исследование динамики образования снежных нагрузок на склоне, динамики течения снежного пласта по наклонной подстилающей поверхности и динамики самой лавины. В настоящее время теория лавин находится в начальной стадии схематизации и упрощений.

Геофизики А.Г. Гофф и Г.Ф. Оттен в качестве первого приближения предложили принять движение лавины как материальной точки по второму закону Ньютона [2]:

$$m_{Л} \cdot \frac{\partial \upsilon}{\partial t} = -mg \cdot \sin\varphi - K_g,$$

где v – скорость лавины по направлению склона (*м/с*);

$m_л$ – масса лавины (*кг*);

g – ускорение силы тяжести (*м/с*^{2});

φ – угол наклона подстилающей поверхности к горизонту;

K_g – главный вектор сил сопротивления движению лавины (*м/с*^{2}).

Простейшая модель движения лавины, предложенная А.Г. Гоффом и Г.Ф. Оттеном, применяется в снеголавинных расчетах до настоящего времени, хотя она далеко не всегда соответствует движению реальных лавин. Так, например, эта модель вовсе не применима для особого случая сухих лавин – пылевидных с очень малой массовой концентрацией снега.

Помимо этого, предпринято немало попыток создания гидравлической модели лавины как потока однородной сплошной среды [3]. В начальный момент склон считается покрытым однородным слоем снега, затем начинается смещение лавины сверху в виде большой капли однородной вязкой жидкости, конец которой закреплен на гребне склона. При этом считается, что голова капли растет за счет попутного присоединения порций снега и собственного движения. Такое приближение соответствует реальным условиям. Однако эта модель не применима для инженерных расчетов.

Таким образом, самая первоочередная задача при освоении лавиноопасных районов – предвидение схода лавин. В работе [4] впервые исследованы условия возникновения лавин. Устойчивость снега на склоне под углом к горизонту φ определялась как для абсолютно жесткого пласта, находящегося под действием сил тяжести F, трения $R_Т$ и сцепления $R_С$. При этом снежный пласт испытывает давления p_1, p_2 от нижележащего и вышележащего снежного покрова.

Пусть высота пласта H_n, массовая плотность снега ρ_c, угол внутреннего трения снега θ, структурное сцепление снега C, разность давлений на снежный пласт от нижележащего и вышележащего снежного покрова $p_2 - p_1 = \Delta p$. Разложив силу тяжести на параллельную и перпендикулярную склону составляющие, можно определить величину H_n:

$$H_n = \frac{C \cdot \cos\theta}{\rho_c \cdot g \cdot \sin(\varphi - \theta) + \Delta p}.$$

Величина H_n представляет собой критическую, опасную высоту снежного покрова.

В частном случае, при наличии на склоне сухого слоя снега его поведение можно описать используя математический аппарат механики грунтов, рассчитав напряжения в однородном откосе от собственной силы тяжести зернистой среды [5]. Для описания напряженного состояния откосов грунтовых массивов используют модель блочной среды, которая оказывается удобной для анализа

механизма передачи усилий от блока к блоку и позволяет получить величину вертикального напряжения σ_z в произвольной точке $A(z, x)$:

$$\sigma_z = \frac{\rho_c}{\sqrt{2\pi\xi_0}} \int_0^{z} \int_r^{+\infty} \exp\left[-\frac{(x-\gamma)^2}{2\,\xi_0 (z - z_i)^2} \right] \mathrm{d}z_i \, \mathrm{d}\gamma ,$$

где ρ_c – удельный вес снега;

$\xi_0 = \dfrac{\sigma_x}{\sigma_z}$ – коэффициент бокового давления, который характеризует распределительную способность зернистой среды;

$\gamma = \dfrac{z}{b}$ – относительная глубина снежного покрова (отношение глубины к ширине (b) рассматриваемого участка);

$\dfrac{(z - z_i)}{\mathrm{tg}\,\varphi} = r_i$ – проекция образующей откоса на ось X на глубине z_i.

После интегрирования данного выражения можно вычислить нормальные и тангенциальные напряжения в слоях снега, при превышении которых начинается сход лавин.

Литература

1. ***Отуотер М.*** Охотники за лавинами / Пер. с англ. М.: Мир, 1972, 272 с.
2. **Гофф А.Г., Оттен Г.Ф.** Борьба со снежными обвалами // В кн.: Снег и снежные обвалы в Хибинах. М.: Гидрометеоиздат, 1938. С. 71-98.
3. ***Возникновение*** оползней, селей и лавин. Инженерная защита территорий / Григорян С.С. и др. М.: Наука, 1987.
4. ***Саатчян Г.Г.*** Снег и снежные обвалы // Труды Тбилисского НИИ сооружений, 1936, вып. 27.
5. ***Добров Э.М.*** Механика грунтов. М.: Издательский центр "Академия", 2008. 272 с.