

РАЗДЕЛ III

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 625.7:004.891.2:004.891.3

ВЫБОР КОНЦЕПЦИИ ЗАЩИТЫ ДОРОГ ОТ ЛАВИН

М. И. Зимин, Торонто, Канада

Аннотация. Рассматривается концептуальное проектирование противолавинной защиты дорог в горной местности. Разработанные технологии позволяют оптимизировать защиту от снежных лавин и избежать неоправданных потерь. Используется нечётко-стохастический анализ. Принимаются во внимание рельеф, метеорологические и сейсмические факторы. Для каждого очага на каждую дату создаётся база метеоданных. Кроме того, для зон зарождения и транзита разрабатывается база данных по рельефу. По ним для всех дней всех лет, для которых есть данные, рассчитывается степень принадлежности ситуации к различным уровням лавинной опасности. Вычисляется давление лавины на дороге. Приводятся примеры расчёта.

Ключевые слова: дорога, лавина, защита, землетрясение, снег, оптимизация.

Введение

Снежные лавины нередко являются серьёзной угрозой для дорог в горной местности, но далеко не всегда проектировщики располагают необходимой информацией об их сходе в конкретном районе. Так, согласно [1] на общем фоне лавинной опасности выделяются периоды, когда сходят особо мощные лавины, которые достигают мест, до этого считавшихся безопасными. Совершенно не рассмотрена возможность схода сейсмогенных лавин, хотя, например, уаскаранская лавина, вызванная восьмибалльным сейсмическим событием, привела к очень тяжёлым последствиям [2]. Подобное положение не может быть признано приемлемым уже хотя бы потому, что имеет место реальная угроза для жизни людей. Кроме того, противолавинные мероприятия весьма затратны, и выбор оптимальной концепции противолавинной защиты очень важен, так как с одной стороны он предотвращает чрезмерные затраты на соответствующие работы, а с другой – обеспечивает приемлемый уровень безопасности. Причём, для проектировщиков важен не только текущий риск возникновения опасных явлений, но и их вероятные параметры, поскольку это определяет выбор соответствующей защиты.

Следует отметить, что согласно некоторым строительным нормам и правилам, например, [3] возможную изменчивость метеорологической и сейсмической обстановки в будущем необходимо учитывать при проектировании различных объектов.

Таким образом, разработка методологии оптимизации защиты от снежных лавин представляет определённый научно-практический интерес.

Методология оптимизации концепции защиты дорог от лавин

Метеообстановка и рельеф в большинстве случаев хорошо известны в каждом регионе. Однако лавины могут отсутствовать в течение всего периода наблюдений, что затрудняет оценку их возможных воздействий на дороги.

Поскольку исходные данные меняются случайным образом, то есть для одних и тех же дней, относящихся к разным годам, входная информация для прогностических программ неодинакова, и различия носят стохастический характер, необходимо выполнять статистическую обработку выборки результатов нечётких вычислений.

По приведённой в [4] технологии можно получать результаты в виде нечётких высказываний «возможен», «ожидается», «нелавиноопасно». При этом термин

«нелавиноопасно» соответствует вероятности схода лавины, не превышающей 0,001, термин «возможен» - вероятности схода лавины, лежащей в пределах от 0,001 до 0,9, и термин «ожидается» - вероятности схода лавины, большей, чем 0,9.

Учёт сейсмической нагрузки несколько выполняется следующим образом. Как показывает математическое моделирование, лавинная опасность при землетрясении такая же, как и без него, если вместо h и q использовать величины

$$h_s = h + p_{el} \{k_s [h - (1 - k_p k_e) h_{430}] - h\}, \quad (1)$$

$$q_s = q + p_{el} q_e, \quad (2)$$

где h_{430} - толщина слоя снега, начинающегося у поверхности Земли, плотностью больше 430 кг/м³, p_{el} - вероятность землетрясения интенсивностью I баллов по шкале MSK - 81 в течение конкретных суток,

$$k_p = \frac{2}{\pi} \arctg \left\{ 0,0000149 \cdot \left[I \cdot \left(\frac{910}{\rho_{430}} \right) \right]^{6,906} \right\}, \quad (3)$$

$$k_e = \frac{2}{\pi} \arctg (3,972 \cdot 10^{-9} \cdot I^{9,438}), \quad (4)$$

$$k_s = \begin{cases} 1 & \text{при } I < 5 \\ 1 + 0,2(I - 5) & \text{при } 5 \leq I < 8 \\ 1 + 0,32(I - 5) & \text{при } I \geq 8 \end{cases}, \quad (5)$$

$$q_s = \begin{cases} 0 & \text{при } I < 5 \\ 4,4(I - 5) & \text{при } 5 \leq I < 8 \\ 16,2(I - 5) & \text{при } I \geq 8 \end{cases}, \quad (6)$$

где I - интенсивность землетрясения на поверхности Земли по шкале MSK - 81, описание которой приведено в [5], ρ_{430} - средняя плотность слоя снега, начинающегося у поверхности Земли и имеющего плотность > 430 кг/м³.

Для каждого очага на каждую дату создаётся база метеоданных. Кроме того, для зон зарождения и транзита разрабатывается база данных по рельефу. По ним для всех дней всех лет, для которых есть данные, рассчитывается степень принадлежности ситуации к различным уровням лавинной опасности.

Для каждого дня тех лет, по которым есть необходимые данные вычисляются степени принадлежности обстановки и лавиноопасным ситуациям, из которых, разумеется, выбирается наиболее опасная. Кроме того, для него методом Монте-Карло разыгрывается сход лавины. Для этого используется случайное число ξ_1 , равномерно распределённое в интервале [0, 1]. Если сход лавины не ожидается, то независимо от величины ξ_1 считается, что лавина отсутствовала. Если по прогнозу сход лавины ожидается, то каким бы ни было ξ_1 , предполагается, что лавина сошла. Если лавина возможна, то при $\xi_1 < 0,5$ считается, что лавина возникла, а при $\xi_1 \geq 0,5$ - что её не было.

Если при моделировании ситуации получается, что лавина сошла, то далее определяется её объём. Предполагается, что он для всех вариантов прогноза является случайной величиной, равномерно распределённой в указанном интервале. Например, если снег находится в неустойчивом состоянии, возможен сход лавин значительного объёма с очисткой от 10 до 50 % площади очага, и количество снега в очаге равно V_c , то плотность вероятности объёма лавины имеет вид:

$$f(V_l) = \begin{cases} 0 & \text{при } V_l < 0,1V_c \\ \frac{2,5}{V_c} & \text{при } 0,1V_c < V_l < 0,5V_c \\ 0 & \text{при } V_l > 0,5V_c \end{cases}, \quad (7)$$

где $f(V_l)$ - плотность вероятности объёма лавины, V_l - объём лавины.

На конкретной реализации объём лавины вычисляется по формуле

$$V_{lk} = 0,1V_c + 0,4\xi_2 V_c,$$

где ξ_2 - случайное, равномерно распределённое в интервале [0, 1], V_{lk} - объём лавины на конкретной реализации.

По заданному рельефу, свойствам снега и объёму лавины по методике, описанной в [6], вычисляется давление лавины на дороге. Оно имеет стохастический характер. Кроме того, только очень ограниченная выборка может быть реально получена.

Возникновение снежных лавин зависит от многих параметров. Поэтому здесь вполне применима центральная предельная теорема [7, 8], в соответствии с которой достаточно большая сумма сравнительно малых случайных величин распределена приближенно по нормальному закону.

В то же время давление лавины не может принимать отрицательные значения. Поэтому соответствующая плотность вероятности определена в интервале $[0, \infty]$. В связи с этим представляется целесообразным применение усеченного нормального распределения. Его параметры вычисляются следующим образом. Сначала рассчитываются математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение элементов выборки давлений лавины на объект:

$$a_p = \left(\sum_{i=1}^n p_i \right) / n, \quad (8)$$

где a_p – математическое ожидание давления лавины на объект, n – объём выборки, p_i – давление лавины на объект на i -ой реализации,

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_p - x_i)^2}{n-1}}, \quad (9)$$

где σ_p – среднее квадратичное отклонение давления лавины на объект.

Затем плотность вероятности значений p отыскивается в виде

$$p(x) = \frac{b}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}, \quad (10)$$

где b – коэффициент, который всегда больше единицы; его величина определяется из условия

$$\int_0^{\infty} p(x) dx = 1.$$

В этом случае

$$b = \frac{1}{\int_0^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx}. \quad (11)$$

После того, как плотности вероятности давления лавины построены для каждой даты, вычисляются вероятности превышения

этим давлением допустимой для дороги нагрузки для всех дней года.

Вероятность того, что давление лавины выйдет за допустимые значения в пределах одних суток в году равна

$$q_1 = \left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - \zeta_i) \right], \quad (12)$$

где q_1 – вероятность того, что давление лавины выйдет за допустимые значения в пределах одних суток в году, ζ_i – вероятность того, что давление на дороге превысит допустимое в пределах i -ой даты, n – число дат, когда сход лавин имел место.

Относительная длительность простоя дороги в течение года оценивается следующим образом:

$$\delta_{\Pi} = \frac{\tau_{\Pi}}{\tau_g} = \frac{[\max(q_1, 2q_1^2, 2q_1^3, \dots, mq_1^m)]}{365}, \quad (13)$$

где τ_{Π} – длительность простоя дороги за заданный период эксплуатации, сутки; m – число дней в году, когда сход снежных лавин ожидается или возможен, τ_g – заданный период эксплуатации, δ_{Π} – относительная длительность простоя дороги в течение одного года.

Максимум функции xa^x при $x > 0$ и $a < 0$ достигается при

$$x = -(\ln a)^{-1}. \quad (14)$$

В качестве примера можно привести расчёт при следующих исходных данных. Доступна информация за 5 лет. Она иллюстрируется таблица 1 – таблица 5, содержащими соответствующие данные наблюдений. Во время дней, отсутствующих в таблицах, снежного покрова на склоне не было. Профиль лавинного очага показан на рисунке 1. Его ширина составляет 20 м. Допустимое давление на дороге равно 560 Па, а допустимая относительная длительность простоя дороги составляет 0,005. Возможно восьмибальное землетрясение 1 раз в 100 лет.

Таблица 1 – Данные за первый год наблюдений

Дата	τ	q	σ	v	h	t_{24}	j	ξ_1	Сход лавины по стохастическому прогнозу	ξ_2	V_{Π}	p_{Π}
11.01	16	1,5	-	5	0,01	-3	1	-	-	-	-	-
12.01	40	2	-	7	0,02	-4	1	-	-	-	-	-
13.01	64	-	-	7	0,02	-3	1	-	-	-	-	-
14.01	88	5	1	2	0,06	-8	1	-	-	-	-	-

Продолжение Таблицы 1

15.01	112	10	2	3	0,15	-1	1	-	-	-	-	-
16.01	136	3	1	7	0,14	-5	1	-	-	-	-	-
17.01	160	-	-	2	0,13	-2	1	-	-	-	-	-
18.01	184	-	-	4	0,13	-4	1	-	-	-	-	-
19.01	208	-	-	3	0,12	-4	1	-	-	-	-	-
20.01	232	15	3	6	0,25	-7	3	0,89	Да	0,91	232	926
21.01	256	5	1	7	0,27	-2	3	0,75	Да	0,63	190	925
22.01	280	0	-	6	0,26	-4	3	0,45	-	0,76	-	-
23.01	304	0	-	7	0,24	-1	3	0,08	-	0,12	-	-
24.01	328	0	-	8	0,23	-5	3	0,68	Да	0,35	193	925
25.01	352	2	-	7	0,24	-11	3	0,15	-	-	-	-
26.01	376	0	-	4	0,22	-5	2	0,19	-	-	-	-
27.01	400	0	-	7	0,19	-1	1	-	-	-	-	-
28.01	424	0	-	3	0,15	3	1	-	-	-	-	-
29.01	448	0	-	4	0,1	12	1	-	-	-	-	-
30.01	472	0	-	6	0,04	14	1	-	-	-	-	-

Таблица 2 – Данные за второй год наблюдений

Дата	τ	q	o	v	h	t_{24}	j	ξ_1	Сход лавины по стохастическому прогнозу	ξ_2	$V_{\text{л}}$	$p_{\text{л}}$
14.01	16	1,1	-	15	0,01	-4	1	-	-	-	-	-
15.01	40	2,2	-	8	0,02	-5	1	-	-	-	-	-
16.01	64	-	-	2	0,01	-1	1	-	-	-	-	-
17.01	88	4	1	1	0,07	-2	1	-	-	-	-	-
18.01	112	4	1	0	0,06	-3	1	-	-	-	-	-
19.01	136	3	1	7	0,04	-2	1	-	-	-	-	-
20.01	160	-	-	3	0,03	-1	1	-	-	-	-	-
21.01	184	-	-	5	0,03	-1	1	-	-	-	-	-
22.01	208	-	-	1	0,02	-2	1	-	-	-	-	-
23.01	232	50	3	0	0,55	-1	5	-	-	0,37	753	927
24.01	256	3	1	1	0,37	7	3	0,22	-	-	-	-
25.01	280	0	-	2	0,21	14	2	0,58	Да	0,84	35,3	925
26.01	304	0	-	3	0,20	-1	1	-	-	-	-	-
27.01	328	0	-	1	0,19	-5	1	-	-	-	-	-
28.01	352	1	-	9	0,19	-11	1	-	-	-	-	-
29.01	376	0	-	2	0,18	-5	1	-	-	-	-	-
30.01	400	0	-	1	0,16	-1	1	-	-	-	-	-
31.01	424	0	-	1	0,15	3	1	-	-	-	-	-
01.02	448	0	-	4	0,1	11	1	-	-	-	-	-
02.02	472	0	-	7	0,04	13	1	-	-	-	-	-

Таблица 3 – Данные за третий год наблюдений

Дата	τ	q	o	v	h	t_{24}	j	ξ_1	Сход лавины по стохастическому прогнозу	ξ_2	$V_{\text{л}}$	$p_{\text{л}}$
10.01	16	1,1	-	15	0,01	-4	1	-	-	-	-	-
11.01	40	2,2	-	8	0,02	-5	1	-	-	-	-	-
12.01	64	-	-	2	0,02	-1	1	-	-	-	-	-
13.01	88	4	1	1	0,06	-2	1	-	-	-	-	-
14.01	112	1	-	0	0,06	-3	1	-	-	-	-	-
15.01	136	1	-	7	0,04	-2	1	-	-	-	-	-
16.01	160	-	-	3	0,03	-1	1	-	-	-	-	-
17.01	184	-	-	5	0,02	-1	1	-	-	-	-	-

Продолжение Таблицы 3

18.01	208	-	-	1	0,02	-2	1	-	-	-	-	-
19.01	232	-	-	10	0,02	-4	1	-	-	-	-	-
20.01	256	-	-	6	0,01	-1	1	-	-	-	-	-
21.01	280	-	-	12	0,01	-4	1	-	-	-	-	-
22.01	304	-	-	3	0,01	-1	1	-	-	-	-	-
23.01	328	56	3	0	0,51	-1	5	-	-	0,31	668	927
24.01	352	1	-	1	0,38	7	3	0,73	Да	0,81	322	926
25.01	376	0	-	2	0,20	14	2	0,71	Да	0,50	20	924
26.01	400	0	-	1	0,14	-1	1	-	-	-	-	-
27.01	424	0	-	1	0,14	3	1	-	-	-	-	-
28.02	448	0	-	4	0,12	10	1	-	-	-	-	-
29.02	472	0	-	7	0,07	11	1	-	-	-	-	-

Таблица 4 – Данные за четвёртый год наблюдений

Дата	T	q	o	v	H	t ₂₄	j	ξ_1	Сход лавины по стохастическому прогнозу	ξ_2	V _л	p _л
09.01	16	1,1	-	15	0,01	-3	1	-	-	-	-	-
10.01	40	2,2	-	8	0,02	-5	1	-	-	-	-	-
11.01	64	-	-	2	0,02	-0.5	1	-	-	-	-	-
12.01	88	4	1	1	0,06	-1	1	-	-	-	-	-
13.01	112	1	-	0	0,06	-1	1	-	-	-	-	-
14.01	136	1	-	7	0,04	-2	1	-	-	-	-	-
15.01	160	-	-	3	0,03	-4	1	-	-	-	-	-
16.01	184	-	-	5	0,02	-3	1	-	-	-	-	-
17.01	208	-	-	1	0,02	-1	1	-	-	-	-	-
18.01	232	-	-	10	0,02	-1	1	-	-	-	-	-
19.01	256	-	-	6	0,01	-3	1	-	-	-	-	-
20.01	280	-	-	12	0,01	-6	1	-	-	-	-	-
21.01	304	-	-	3	0,01	-4	1	-	-	-	-	-
22.01	328	-	-	7	0,01	-8	1	-	-	-	-	-
23.01	352	-	-	3	0,01	-3	1	-	-	-	-	-
24.01	376	-	-	5	0,01	-2	1	-	-	-	-	-
25.01	400	53	3	0	0,52	-2	5	-	-	0,44	749	927
26.01	424	1	-	1	0,32	8	3	0,14	-	-	-	-
27.02	448	0	-	2	0,21	12	2	0,30	-	-	-	-
28.02	472	0	-	7	0,07	12	1	-	-	-	-	-

Таблица 5 – Данные за пятый год наблюдений

Дата	T	q	o	v	h	t ₂₄	j	ξ_1	Сход лавины по стохастическому прогнозу	ξ_2	V _л	p _л
09.01	16	1,4	-	1	0,01	-3	1	-	-	-	-	-
10.01	40	2,1	-	18	0,02	-5	1	-	-	-	-	-
11.01	64	-	-	3	0,02	-0.5	1	-	-	-	-	-
12.01	88	4,2	1	2	0,06	-1	1	-	-	-	-	-
13.01	112	-	-	1	0,06	-1	1	-	-	-	-	-
14.01	136	-	-	3	0,04	-2	1	-	-	-	-	-
15.01	160	-	-	6	0,03	-4	1	-	-	-	-	-
16.01	184	-	-	1	0,02	-3	1	-	-	-	-	-
17.01	208	-	-	11	0,02	-1	1	-	-	-	-	-
18.01	232	-	-	12	0,02	-1	1	-	-	-	-	-
19.01	256	-	-	5	0,01	-3	1	-	-	-	-	-

Продолжение Таблицы 5

20.01	280	-	-	2	0,01	-6	1	-	-	-	-	-
21.01	304	-	-	1	0,01	-4	1	-	-	-	-	-
22.01	328	-	-	2	0,01	-8	1	-	-	-	-	-
23.01	352	-	-	1	0,01	-3	1	-	-	-	-	-
24.01	376	-	-	6	0,01	-2	1	-	-	-	-	-
25.01	400	3,2	1	2	0,03	-2	1	-	-	-	-	-
26.01	424	1	-	2	0,02	-4	1	-	-	-	-	-
27.02	448	0	-	1	0,01	-3	1	-	-	-	-	-
28.02	472	0	-	6	0,01	1	1	-	-	-	-	-

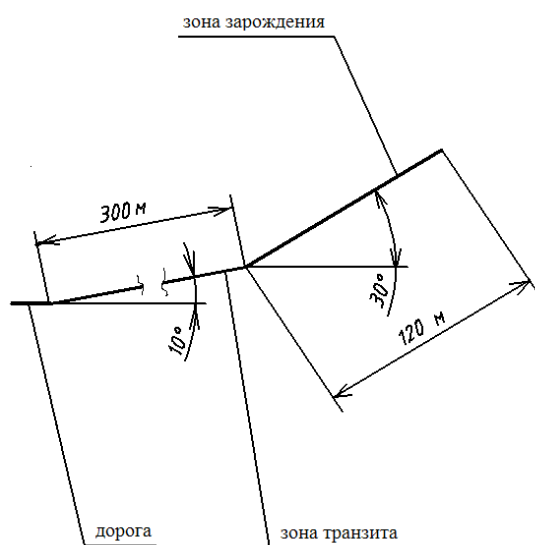


Рис. 1. Расположение дороги и лавинного очага

Применяются обозначения: t – время в течение которого снег находится на склоне, часы; q – сумма осадков за последние сутки, мм; o – интенсивность осадков за последние 3 часа, мм/час; v – максимальный за сутки порыв ветра, м/с; h – толщина снега на склоне, м; t_{24} – среднесуточная температура воздуха, °C; j – код лавинной опасности; $V_{л}$ – объем лавины, м³; $p_{л}$ – давление лавины, Па; ξ_1 и ξ_2 – случайные числа, равномерно распределённые в интервале $[0;1]$.

Полученные исходные данные для статистического анализа иллюстрируются таблица 6. Через $p_1, p_2, \dots, p_5$ обозначены давления лавины в заданный день соответствующего года наблюдения (например, p_1 – давление лавины в первый год наблюдений). Вероятность того, что давление лавины выйдет за допустимые значения в пределах одних суток в году в данном случае равна 0,9116. Соответственно $\delta_{п} = 0.0109$, и, поскольку эта величина превышает допустимую, то рекомендуется строительство противолавинных галерей.

Таблица 6 – Исходные данные для статистического анализа и его результаты

Дата	p_1 , Па	p_2 , Па	p_3 , Па	p_4 , Па	p_5 , Па	ζ_i
20.1	926	0	0	0	0	0,2716
21.1	925	0	0	0	0	0,2711
23.1	0	927	927	0	0	0,4622
24.1	925	0	926	0	0	0,2716
25.1	0	925	924	927	0	0,5748

Заключение

Зная реальный уровень лавинной опасности, можно прогнозировать, какую угрозу эти склоновые процессы представляют для конкретной дороги. Соответственно выбирается концепция защиты, например, рекомендуется строительство противолавинных галерей.

Таким образом, разработанные технологии позволяют оптимизировать защиту от снежных лавин и избежать неоправданных потерь, связанных с перебоями движения транспорта или чрезмерными затратами на противолавинные мероприятия.

Библиографический список

1. Войтковский, К. Ф. Лавиноведение / К. Ф. Войтковский. – М.: МГУ, 1989. – 158 с.
2. Поляков, С. В. Последствия сильных землетрясений / С. В. Поляков. – М.: Стройиздат, 1978. – 311 с.
3. Coburn A. Earthquake protection / A. Coburn, R. Spence. – Chichester: John Wiley&Sons Ltd., 1992. – 355 p.
4. Зимин, М. И. Прогнозирование лавинной опасности. Руководящий документ РД 52.37.612-2000 / М. И. Зимин. – Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 2000. – 16 с.
5. Ontario's 2006 Building Code. – V. 1. - Toronto: Ministry of Municipal Affairs and Housing, 2008.

6. Зимин, М. И. Прогнозирование опасных процессов на основе бионического подхода и его использование в системах автоматизации проектирования /М. И. Зимин // Естественные и технические науки. – 2011. – № 3. – С. 407 – 414.

7. Колемаев, В. А. Теория вероятностей в примерах и задачах / В. А. Колемаев. – М.: Государственный университет управления, 2001. – 87 с.

8. Пискунов, Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисление/ Н. С. Пискунов. – Т. 2. – М.: Наука, 1978. – 576 с.

SELECTION OF CONCEPT OF ROADS PROTECTION AGAINST AVALANCHES

M. I. Zimin

Abstract. The article dwells upon the conceptual design of antiavalanche protection of roads in highlands. The developed technologies allow to optimize protection against avalanches and avoid unjustified losses. Indeterminate-stochastic analysis is used. Relief, meteorological and seismic factors are taken into account. Weather databases are worked out for each avalanche site on each data. Besides, the relieves' database is developed for zones of origin and transit. According to them, for all years there is calculated a degree of situation's belonging to different levels of avalanche's danger. The avalanche pressure on the road is calculated. Example of analysis is given.

Keywords: road, avalanche, protection, earthquake, snow, optimization.

Reference

1. Voitkovskiy K. F. *Lavinovedenie* [Avalanche studies]. Moscow, MGU, 1989. 158 p.

2. Poljakov, S. V. *Posledstviya sil'nykh zemletrjasenij* [Consequences of strong earthquakes]. Moscow, Strojizdat, 1978. 311 p.

3. Soburn A. Earthquake protection / A. Coburn, R. Spence. Chichester: John Wiley&Sons Ltd., 1992. – 355 p.

4. Zimin M. I. *Prognozirovanie lavinnoj opasnosti. Rukovodjashhij dokument RD 52.37.612-2000* [Forecasting of avalanche danger. The leading document RD 52.37.612-2000]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 2000. 16 p.

5. Ontario's 2006 Building Code. V. 1. - Toronto: Ministry of Municipal Affairs and Housing, 2008.

6. Zimin M. I. *Prognozirovanie opasnykh processov na osnove bionicheskogo podhoda i ego ispol'zovanie v sistemah avtomatizacii proektirovanija* [Forecasting of dangerous processes on the basis of bionic approach and its use in computer-aided engineering systems]. *Estestvennye i tehicheskie nauki*, 2011, no 3. pp. 407 – 414.

7. Kolemaev V. A. *Teorija verojatnostej v primerah i zadachah* [Probability theory in examples and tasks]. Moscow, Gosudarstvennyj universitet upravlenija, 2001. 87 p.

8. Piskunov N. S. *Differencial'noe i integral'noe ischislenie* [Differential and integrated calculus]. Moscow, Nauka, 1978. 576 p.

Зимин Михаил Иванович (Канада, г. Торонто) – кандидат технических наук, доктор РАН, профессор РАН, инженер(Канада, Торонто, e-mail: ziminz7@yandex.ru).

Zimin Mikhail Ivanovich (Canada, Toronto) – candidate of technical sciences, doctor of the Russian Academy of Natural Sciences, professor of the Russian Academy of Natural Sciences, the engineer (Canada, Toronto, e-mail: ziminz7@yandex.ru).

УДК 681.5:621.878.23-182.38

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БУЛЬДОЗЕРА С ПОЛУЖЕСТКОЙ ПОДВЕСКОЙ

И. В. Лазута, Е. Ф. Лазута
ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Россия, г. Омск.

Аннотация. В данной статье приводится математическое описание сложной динамической системы бульдозера с полужесткой подвеской рамы. Автором предложена математическая модель, состоящая из уравнений геометрических связей элементов машины и дифференциальных уравнений перемещения рамы машины и рабочего органа при внешних кинематических и динамических воздействиях. Значительное внимание в представленной математической модели уделяется зависимостям между множеством конструктивных параметров машины.

Ключевые слова: динамика, математическая модель, бульдозер, полужесткая подвеска, дифференциальное уравнение, кинематическая связь.

Введение

Современное развитие машиностроения в Российской Федерации должно соответствовать и даже опережать зарубежные направления в данной области. Для этого необходимо при разработке новых

образцов техники использовать весь научный потенциал высших школ. Современное проектирование строительных и дорожных машин должно опираться как на классические методы расчета конструкции, так и на передовые методы компьютерного