

Ю.В. Есипов, Мохаммад Джаюси
(ДГТУ, ИОНЦ РАН; e-mail: yu-yesipov5@yandex.ru)

ЛОГИКО-ВОЗМОЖНОСТНАЯ ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СТРОИТЕЛЬНЫХ И ПОГРУЗОЧНЫХ РАБОТАХ

Предложены аналитические зависимости для оценки субъективной вероятности (возможностной меры) опрокидывания и (или) разрушения грузоподъемного крана, травмы и (или) увечья исполнителей при падении грузов с высоты.

Ключевые слова: безопасность, нечёткие множества, логическая функция.

Yu.V. Esipov, M. Jayyosi

LOGICAL-POSSIBILISTIC SAFETY ASSESSMENT OF CONSTRUCTION AND LOADING OPERATIONS

The analytical dependences for the evaluation of subjective probabilities (possibility measures) tilting and (or) destruction of the crane, injury and (or) mutilation to performers in the fall of cargo from a height is offered.

Key words: safety, fuzzy sets, logical function.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 17 ноября 2016 г.

Задача оценки вероятности возникновения происшествия (несчастный случай, авария) при погрузочных работах и на высоте в плохо статистически изученной технической системе вида "грузоподъемный кран – средства защиты – факторы окружающей среды – работник" является актуальной как в области промышленной безопасности, так и в страховании [1, 2]. Результаты её решения могут быть полезны для обоснования и оптимизации мер по предотвращению происшествий и для уточнения расчётных уровней страховых взносов.

Для технической системы "машина – защита – факторы окружающей среды – исполнитель" решаются следующие задачи [3, 4]:

- выбор вершинного исхода;
- установление его факторных параметрических критериев возникновения;
- построение лингвистической зависимости возникновения вершинного исхода;
- построение логической зависимости с учётом полного набора связей предпосылок;
- построение для каждой предпосылки параметрической зависимости её реализации по схеме "воздействие – ослабление – восприимчивость".

В качестве вершинных исходов, как наиболее часто возникающих при строительных работах, выбраны: опрокидывание и (или) разрушение автомобильного крана; травма и (или) увечье исполнителей при падении грузов с высоты.

Требуется на основе логико-возможностного метода [3, 4] определить субъективную вероятность возникновения выбранных исходов и оценить вклад защиты в уменьшение опасности.

Конкретизируем техническую систему и рассмотрим её в виде "автомобильный кран – средства защиты – факторы окружающей среды – работник". В этой системе наиболее частыми происшествиями и их предпосылками являются [5, 6]: раскачивание, срыв или падение груза; опрокидывание и (или) разрушение крана; травма, увечье либо смерть работников при падении грузов или фрагментов крана. В связи с этим проведён анализ критериев устойчивости и падения крана при несанкционированном вылете стрелы, действии бокового ветра и сползании грунта.

Известно, что под устойчивостью кранов понимается способность противодействовать опрокидывающим моментам [7]. Устойчивость кранов с установочным изменением вылета устанавливают для положения, когда стрела поднята до минимального вылета. В первом приближении устойчивость крана оценивается с использованием коэффициента устойчивости K как отношения удерживающего момента к опрокидывающему:

$$K = M_{уд}/M_0. \quad (1)$$

При $K < 1$ наступает опрокидывание. При определении устойчивости крана учитываются также следующие величины (рис. 1):

G_0 – нормативная масса крана;

G – масса противовеса;

W_p – ветровая нагрузка;

R_1, R_2, R_3, R_4 – реакции в опорах;

Q – масса груза;

$m_{стр}$ – масса стрелы;

b – расстояние от центра масс частей крана до вертикальной плоскости, проходящей через ребро опрокидывания;

$M_{уд}$ – удерживающий момент относительно ребра опрокидывания от силы тяжести крана;

M_{wp} – момент, созданный ветровой нагрузкой:

$$M_{wp} = p(t) \cdot s \cdot a, \quad (2)$$

где $p(t)$ – давление ветра,

s – миделево сечение,

a – модуль радиус-вектора между центром масс и центром давления скоростного напора.

С учётом введённых переменных и рис. 1, записаны действующие на кран моменты. Удерживающий момент

$$M_{уд} = G_0 \cdot b \cdot K. \quad (3)$$

При анализе устойчивости крана рассмотрено "наихудшее" сочетание опрокидывающих моментов, которое удерживает противовес:

$$M_0 = (Q + m_{стр}) \cdot b + p(t) \cdot s \cdot a. \quad (4)$$

Если

$$G_0 \cdot b \cdot K < (Q + m_{стр}) \cdot b + p(t) \cdot s \cdot a, \quad (5)$$

то произойдёт опрокидывание крана.

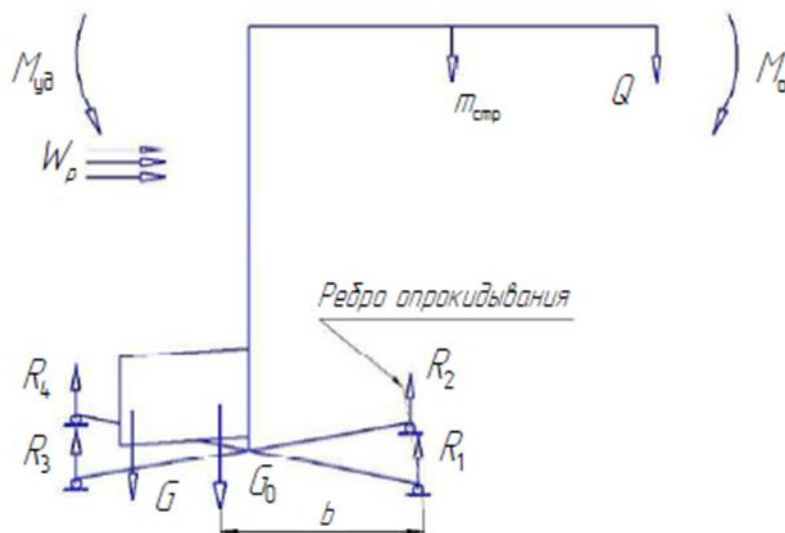


Рис. 1. Схема уравнивания моментов в задаче оценки устойчивости крана

Выразим критерий устойчивости (5) на основе параметрической зависимости вида "нагрузка M_0 – несущая способность $M_{уд}$ ", где опрокидывающий и удерживающий моменты рассматриваются как нечёткие величины (рис. 2).

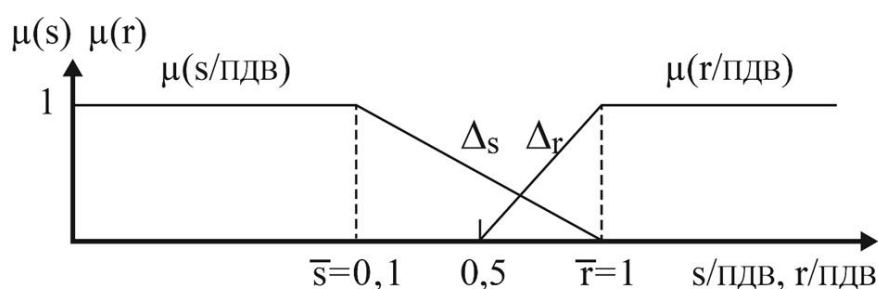


Рис. 2. Нечёткая параметрическая схема опрокидывания на основе линейной аппроксимации функций принадлежности воздействия (создание опрокидывающего момента) $\mu(s)$ и несущей способности к удержанию равновесия (реализации текущего момента удержания) $\mu(r)$: ПДВ – предельно допустимая восприимчивость крана к опрокидыванию

Вероятность опрокидывания рассчитывается на основе линейной (трапециевидальной) аппроксимации зависимости нечёткой (возможностной) меры от приведённого параметрического запаса безопасности к опрокидыванию.

В первом приближении, при допущении о линейной аппроксимации нечётких параметров (в наименее информативном варианте их получения) справедлива зависимость [3, 8]:

$$\pi_i^L = 1 - zb, \quad (6)$$

где zb – приведённый параметрический запас безопасности:

$$zb = (\bar{r} - \bar{s}) / (\Delta_r + \Delta_s), \quad (7)$$

где $\bar{r}$ и $\bar{s}$ – "ядра" нечётких параметров восприимчивости r и воздействия s ;

Δ_r и Δ_s – "интервалы размытости" нечётких параметров восприимчивости r и воздействия s (рис. 2);

$\mu(s = s/\text{ПДВ})$ и $\mu(r = r/\text{ПДВ})$ – функции принадлежности нечётких нормированных параметров воздействия $s/\text{ПДВ}$ и восприимчивости $r/\text{ПДВ}$;

$r/\text{ПДВ}$ – предельно допустимая восприимчивость крана к опрокидыванию, выраженная через $M_{уд}$ – удерживающий момент относительно ребра опрокидывания от силы тяжести крана;

$s/\text{ПДВ}$ – опрокидывающий момент M_o создаваемый статическими и динамическими действиями груза и ветрового напора.

Ниже будет показано построение зависимости и критериев наступления вершинных исходов при падении груза.

Рассмотрим следующие **вершинные исходы (ВИ)**, которые возникают от несанкционированного падения груза на работника, находящегося в опасной зоне строительных работ: $ВИ_1$ – травма с потерей трудоспособности; $ВИ_2$ – увечье с длительной потерей трудоспособности; $ВИ_3$ – летальный исход [9, 10].

Наиболее распространёнными предпосылками этих вершинных исходов являются:

- нахождение работника в опасной зоне, на которую возможно падение фрагмента груза или всего груза;
- падение фрагмента груза или всего груза на работника с защитой (голова в каске);
- падение фрагмента груза на голову работника без каски.

Построим параметрические зависимости для оценки вершинных исходов $ВИ_1$, $ВИ_2$, $ВИ_3$.

В качестве параметра используется давление p (Па) при ударе по работнику.

Были определены следующие исходы:

$p_{11} = [3, 10] \text{ кПа}$ – травма с потерей трудоспособности до 10 суток ($ВИ_1$);

$p_{12} = [10, 100] \text{ кПа}$ – увечье с длительной потерей трудоспособности ($ВИ_2$);

$p \geq 100 \text{ кПа}$ – летальный исход ($ВИ_3$).

Полученные результаты логико-возможностного моделирования происшествий при погрузочных и строительных работах, а также расчётные результаты возможностных вершинных исходов позволяют оценивать эффективность защитных мероприятий, применяемых для повышения безопасности. В частности, расчётные результаты подтверждают полезность использования защитной каски: без каски в конкретной системе субъективная вероятность увечья составляет 12 %, тогда как с каской субъективная вероятность травмы (не увечья!) составляет 3 %.

Литература

1. **Рябинин И.А.** Надёжность и безопасность сложных систем. СПб.: Политехника, 2000. 248 с.
2. **Гаенко В.П.** Современные методы анализа и оценки безопасности сложных технических систем. СПб.: изд-во НИЦ БТС. 2004. 212 с.
3. **Есипов Ю.В., Самсонов Ф.А., Черемисин А.И.** Мониторинг и оценка риска систем "защита объект среда". М.: изд-во ЛКИ УРСС, 2013. 138 с.
4. **Есипов Ю.В., Пустовая Л.Е., Черемисин А.И.** Расчёт показателей безопасности и риска систем. Ростов н/Д: изд-во ДГТУ, 2016. 88 с.
5. **Александров М.П.** Грузоподъёмные машины. Москва: Высшая школа, 2000.
6. **Махутов Н.А.** Особенности статистических подходов при оценке статической прочности // Безопасность в техносфере. № 2. 2014. С. 3-11.
7. **Барсов И.П.** Строительные машины и оборудование. М.: Стройиздат, 1986;
8. **Есипов Ю.В., Горшкова Ю.В., Шишкин Р.И.** Моделирование и визуализация зон риска системы на основе критерия "воздействие восприимчивость" // Вестник ЮНЦ. 2010. Т.6., в. 3. С. 21-28.
9. **Дюбуа Д., Прад А.** Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике. М.: Мир, 1989. 286 с.
10. **Стрелецкий Н.С.** Основы статистического учёта коэффициента запаса прочности сооружений. М.: Стройиздат, 1967. 232 с.