

Ю.Н. Сенчихин, к.т.н., профессор, НУГЗУ

**ПРИБЛИЖЕННЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ (ПРОЦЕССА
ВЫСТРЕЛА) СПАСАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ
МЕТАНИЯ СНАРЯДА С ТРОСОМ НА ВЫСОТЫ ЗДАНИЙ**
(представлено д-ром техн. наук Прохачем Э.Е.)

Предложены приближенные решения с допущениями о совпадении траектории снаряда с положением троса, которые позволяют оценить границы применимости устройств данного типа в смысле оценки максимальной высоты подъема снаряда

Ключевые слова: пожарно-спасательные работы, выстрел, пневмометание, задачи анализа, траектория, снаряд с тросом, спасательный конец

Постановка проблемы. Для анализа работы спасательного устройства (установки) [1], необходимо иметь математические модели, описывающие процесс метания снаряда с тросом, которые позволят оценить основной параметр задачи (ОПЗ) – высоты пневмометания (выстрела).

В общей постановке задачи анализа движения снаряда с тросом, задано в параметрической форме [2]. Обращено внимание, что траектория полета снаряда и положение троса не совпадают, а составные уравнения движения, которыми описывается исследуемый процесс, с граничными и начальными условиями имеют наиболее общий вид. Для общего случая учитываются, по существу, все силы, действующие на снаряд и трос, что приводит к усложнению задачи настолько, что не всегда можно получить при решении достоверный результат.

Анализ последних исследований и публикаций. Попытка получить «точное» решение для рассматриваемого процесса предпринималась во ВНИИПО РФ, где рассматривалась система метания снаряда со спасательным концом в виде материальной точки с переменной массой [3]. Однако уточняющих решений не получено.

Постановка задачи и ее решение. С учетом допущений, необходимо определить максимальную высоту пневмометания снаряда с тросом для установки границ применимости спасательного устройства.

В дальнейшем при решении сформулированной задачи анализа пневмометания будем задавать траекторию снаряда, последовательно увеличивая степень аппроксимирующего ее полинома.

Для приближенной оценки ОПЗ «высота» (H_{\max}) эффективной является математическая модель, основанная на следующих дополнительных допущениях:

– трос – бесконечная нерастяжимая тонкая нить с постоянной

линейной плотностью ρ ;

– выстрел производится вертикально вверх (рис. 1).

Заметим, что учет изменения линейной плотности троса на различных его участках вполне возможен и существенных усложнений в модели и алгоритмы расчетов не внесет.

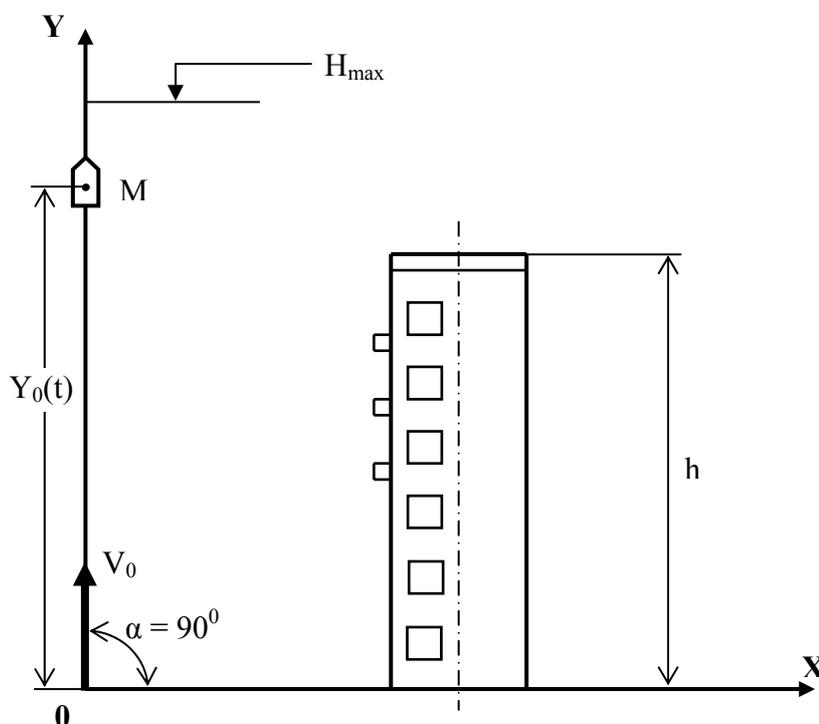


Рис. 1. Схема движения снаряда с тросом, метаемого с помощью пневмострела в вертикальном направлении

Хотя в теоретическом отношении выстрел в вертикальном направлении заведомо лишен смысла (после выстрела при отсутствии ветра снаряд вернется на исходную позицию), тем не менее, при выполнении с помощью спасательного устройства одного из тактических приемов – доставки спасательного конца с тросом на крышу здания – углы наклона полета снаряда на большей части восходящей траектории близки к 90° . Поэтому приведенное предположение в известном смысле оправдано и может дать практически нужные результаты.

Кинетическая энергия, приданная системе в момент $t = 0$, непрерывно перераспределяется между снарядом и той частью троса, которая связывает снаряд с установкой. Это предположение выполняется «точно», если трос перед выстрелом сложен на поверхности земли специальным образом – «в укладку».

Траектория снаряда линейна, причем аппроксимируется прямой, проходящей через начало координат т. 0. Тогда (и только тогда) из физических соображений провисание троса отсутствует, и упомянутое семейство в любой момент времени совпадает с траекторией снаряда, т.е. является той же прямой линией.

Линейные размеры снаряда пренебрежимо малы в сравнении с геометрическими характеристиками задачи (высотой здания, длиной троса). Вследствие чего можно считать снаряд точечной массой.

В рамках сделанных предположений, не учитывая аэродинамических поправок, закон сохранения энергии записывается следующим образом:

$$T_{\text{тр}} + M/2(dy_0/dt)^2 + Mgy_0 + \rho gy_0^2/2 = MV_0^2/2. \quad (1)$$

Здесь $T_{\text{тр}}$ – кинетическая энергия троса, Дж; y_0 – высота полета снаряда, м; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; ρ – линейная плотность троса, кг/м , M – масса снаряда, кг ; V_0 – начальная скорость снаряда – скорость в момент времени $t=0$.

В данном частном случае скорость снаряда равна скорости каждой точки троса и совпадает по величине с V_y – компонентой скорости, что непосредственно следует из предположения о нерастяжимости троса.

Из (1) направленно находим один из ОПЗ – максимальную высоту полета снаряда – и следовательно, даем оценку «сверху» параметру «высота» здания, для которого еще будет эффективна установка. Иначе, определяем верхнюю границу применимости высотного спасателя.

Полагая в (1) $y_0=H_{\text{max}}$, а значит, $dy_0/dt=0$ и $T_{\text{тр}}=0$, имеем:

$$MgH_{\text{max}} + \rho gH_{\text{max}}^2/2 = MV_0^2/2. \quad (2)$$

Решая последнее уравнение, получим:

$$H_{\text{max}} = M/\rho[\sqrt{1 + \rho V_0^2/Mg} - 1]. \quad (3)$$

Скорость снаряда в произвольный момент времени описывается дифференциальным уравнением:

$$\left(\frac{dy_0}{dt}\right)^2 = 2 \frac{V_0^2/2 - y_0g(1/2 M/\rho y_0 + 1)}{1/\rho y_0 M + 1}, \quad (4)$$

с начальным условием $y_0(0) = 0$.

Откуда численным интегрированием можно получить время подъема снаряда на максимальную высоту, а затем и время свободного падения.

В настоящей работе для интегрирования использовалась стандартная процедура метода Рунге-Кутты [4,5]. Разностный аналог обыкновенного дифференциального уравнения для расчета зависимости координаты снаряда, как функции времени, имеет конкретный вид:

$$\delta y_0 \delta t = f, \quad (5)$$

$$f = 2 \frac{V_0^2/2 - y_0 g (1/2 M / \rho y_0 + 1)}{1/\rho y_0 M + 1}.$$

Правая часть уравнения (4) такая же, как в (3).

Обозначим правую часть приведенного выше уравнения через $y^*(y, t)$, δt – шаг интегрирования по времени.

Тогда

$$f = 1/2(K_1 + K_2), \quad K_1 = y^*(y_0, t), \quad K_2 = y^*(t + \delta t, y_0 + \delta t K_1). \quad (6)$$

Примененный вариант алгоритма типа Рунге-Кутты является методом второго порядка точности относительно δt , что вполне достаточно для первого приближения.

Оценить влияние сопротивления воздуха тросу и снаряду не сложно, если общее выражение для второго закона Ньютона дополнить слагаемым, учитывающим аэродинамические поправки [3]:

$$M d^2 y / dt^2 = -Mg - \rho g y_0 (dy_0 / dt)^2 \rho_v (C_x + 0.03 \pi d (L dy_0 / dt)^{-0.139} L). \quad (7)$$

Здесь C_x – коэффициент лобового сопротивления снаряда, ρ – плотность воздуха, L – длина пройденного снарядом пути, v – кинематическая вязкость воздуха, d – диаметр снаряда (миделево сечение).

Забегая вперед, заметим, что учет аэродинамических поправок приводит к дифференциальным уравнениям, которые не допускают разделения переменных. И тогда, если на первом этапе (задача анализа) такой учет всего лишь несколько усложняет решение, то на втором этапе (решение тактических задач) иногда оказывается невозможным воспользоваться алгоритмом решения задачи анализа для создания тактического обеспечения к спасательному устройству.

Выводы. Приближенная модель позволяет быстро рассчитать оценочный параметр выстрела – высота H_{\max} . Ее целесообразно использовать при установлении границ применимости спасательного устройства, т.к. конечные результаты здесь представимы в виде рабочих формул, в которые достаточно подставить конкретные значения численных данных. С точки зрения точности расчетов ОПЗ упрощенная модель не дает оценочного параметра выстрела – дальность L_{\max} .

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2079311 Российская Федерация, МКИ 6 А 62 В 1/02. Устройство для выполнения пожарно-спасательных работ / Сенчихин Ю.Н., Пустовой А.С.; заявитель и патентообладатель Харьковский инж. строит. ин-т. – № 93053702; заявл. 26.11.93; опубл. 20.05.97, Бюл. №14.

2. Сенчихин Ю.Н. Формализация задачи анализа работы спасательного устройства для метания снаряда с тросом на высоты зданий в общей постановке / Ю.Н. Сенчихин // Проблемы надзвичайних ситуацій: зб. наук. пр. – Вип. 19. – Харків: НУЦЗУ. 2014. – С. 120-125.

3. Демин А.П. Пневматическое метательное устройство / А.П. Демин, Б.И. Воронин // Пожарная техника и тушение пожаров: сб. научн. трудов. – М.: ВНИИПО, 1982. – С. 121-123.

4. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 831 с.

Ю.М. Сенчихін

Наближений аналіз роботи (процесу пострілу) рятувального пристрою для метання снаряда з тросом на висоти будівель

Запропоновано наближені рішення з допущеннями про збіг траєкторії снаряда з положенням троса, які дозволяють оцінити межі застосування пристроїв даного типу в сенсі оцінки максимальної висоти підйому снаряда з тросом.

Ключові слова: пожежно-рятувальні роботи, постріл, пневмометання, задання аналізу, траєкторія, снаряд з тросом, рятувальний кінець.

Yu.M. Senchykhin

An approximate analysis of the work (the firing process) of rescue device for throwing a projectile with a rope at the height of buildings

An approximate solution to the assumptions of the projectile trajectory coincides with the position of the cable, which allows estimating the limits of applicability of this type of device in terms of assessing the maximum lifting height of the projectile with a rope.

Keywords: fire-rescue works, pneumatic throwing, problem analysis, the trajectory of the projectile with a rope, life end.