

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАССТОЯНИЯ ОТЛЕТА ПРЕДМЕТОВ, ГРУЗОВ ПРИ ПАДЕНИИ С ВЫСОТЫ



Р. А. Попов, студент,
e-mail: rus14n.popov@yandex.ru
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

В. М. Минько, д-р техн. наук, проф.,
e-mail: mcotminko@mail.ru
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

В данной статье приведено получение аппроксимирующих зависимостей между расстоянием R отлета предметов, грузов и высотой H их возможного падения. Рассмотрены случаи падения при перемещении с помощью подъемного сооружения и падения со здания. Представленные аппроксимирующие формулы имеют среднюю относительную ошибку 4,41 – 4,99 %, что, скорее всего, находится в пределах ошибок опытных данных, по которым получены табличные зависимости между R и H .

Ключевые слова: падение предметов, грузов; причина падения, расстояние отлета, высота падения, аппроксимирующие формулы.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в нормативных документах (отмененных и действующих) есть только одна таблица для определения отлета грузов при падении с высоты [1], составленная для случая падения предмета при его перемещении подъемным сооружением и для случая падения со здания. Каким образом, на основании каких исследований эта таблица составлена, сведений нет. Хотя очевидно, что отлет по горизонтали при падении с высоты различных предметов зависит не только от высоты падения, но и от ряда других исходных условий. В частности, к ним относятся:

1. Отношение веса падающего предмета, груза к площади его поверхности.
2. Сила ветрового давления на падающий предмет, груз.
3. Коэффициенты аэродинамического сопротивления, относящиеся к разным сторонам падающего предмета, груза.
4. Наличие силового воздействия на предмет, ставшее причиной его падения; предмет может быть сброшен с высоты, выпущен из рук, скатиться, например, по причине ветра, уклона.
5. Форма и габариты падающего предмета, продолжительность падения.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования приняты особенности падения предметов, грузов с высоты, траектория их движения в процессе падения с подъемных сооружений и со здания.

ЦЕЛЬ, ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является получение эмпирических зависимостей, связывающих расстояния отлета по горизонтали с высотой возможного падения. Для получения этих зависимостей предполагается использование различных эмпирических формул. В качестве метода исследования использованы методы наименьших квадратов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По имеющимся сведениям, падение предметов, грузов со зданий при строительных работах или при их перемещении с помощью подъемных сооружений является достаточно распространенной причиной несчастных случаев. В качестве одного из основных мероприятий при этом используется ограждение опасной зоны, создаваемой падающим грузом или предметом. В пределах этой зоны запрещается пребывание работников, размещение рабочих мест, оборудования, производство каких-либо даже кратковременных работ.

В связи с изложенным возникает задача определения ширины опасной зоны, и при этом она должна определяться иногда в ходе самого строительства, то есть достаточно оперативно. Имеющиеся в различных правилах [1] зависимости между расстоянием возможного отлета R падающих грузов, предметов от высоты падения H приводятся в табличной форме, в которой значения высоты рассматриваются через большие интервалы, например, 10 – 20 – 70 – 120 м.

Однако во время строительства или других работ, сопровождающихся возможным падением грузов, предметов требуется определить ширину опасной зоны и при промежуточных значениях высоты. В этих случаях правила рекомендуют определять расстояние отлета падающих грузов, предметов с использованием интерполяции. Однако для этого необходимо проведение специальных расчетов, которые в ходе работ, например по месту строительства, оперативно не могут быть выполнены.

В связи с изложенным возникает задача перевода табличных форм в графики и подбора для них с использованием метода наименьших квадратов эмпирических формул [2–5]. По этим формулам с помощью мобильных устройств может быть оперативно определена ширина опасной зоны для любой конкретной высоты.

В таблице 1 указаны данные по минимальным расстояниям отлета падающих грузов, предметов в случае их перемещения подъемным сооружением и в случае падения со здания. По приведенным данным на рисунке 1 приведены графики зависимости расстояния отлета R (м) от высоты H (м) возможного падения при перемещении подъемным сооружением и при падении со здания ($R = f(H)$). Полученные графики имеют вид ломаных линий. Важно отметить, что увеличение расстояния отлета в зависимости от высоты падения не является равномерным. При перемещении грузов подъемным сооружением увеличение высоты падения с 10 до 20 м, то есть в 2 раза, привело к увеличению расстояния отлета в $7/4 = 1,75$ раза. А увеличение высоты падения с 20 до 70 м, то есть в 3,5 раза, привело к возрастанию расстояния отлета только в $10/7 = 1,43$ раза.

В целом, это указывает на нелинейный характер зависимости $R = f(H)$. По данным таблицы 1 построены графики, приведенные на рисунке 1. Исходя из вида этих графиков, для аппроксимации данных в таблице 1 используем формулу:

$$R_1 = aH^b, \quad (1)$$

где a, b – искомые коэффициенты.

Для удобства расчетов логарифмируем формулу (1). Получаем

$$\lg R_1 = \lg a + b \lg H. \quad (2)$$

Из формулы (2), используя метод наименьших квадратов, имеем:

$$\lg a = \frac{\sum_{i=1}^n (\lg H)^2 \cdot \sum_{i=1}^n \lg R_1 - \sum_{i=1}^n R_1 \cdot \sum_{i=1}^n \lg H \cdot \sum_{i=1}^n (\lg H \cdot \sum_{i=1}^n R_1)}{n \sum_{i=1}^n (\lg H)^2 - (\sum_{i=1}^n \lg H)^2}; \quad (3)$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n (\lg H \cdot \lg R_1)^2 - \sum_{i=1}^n \lg H \cdot \sum_{i=1}^n \lg R_1}{n \sum_{i=1}^n (\lg H)^2 - (\sum_{i=1}^n \lg H)^2}. \quad (4)$$

Таблица 1 – Расстояние отлета грузов, предметов в зависимости от высоты падения [1]

Высота возможного падения груза (предмета), м	Минимальное расстояние отлета, перемещаемого (падающего) груза (предмета), м	
	перемещаемого подъемным сооружением груза в случае его падения R_1	предметов в случае их падения со здания R_2
До 10	4	3,5
До 20	7	5
До 70	10	7
До 120	15	10
До 200	20	15
До 300	25	20
До 450	30	25

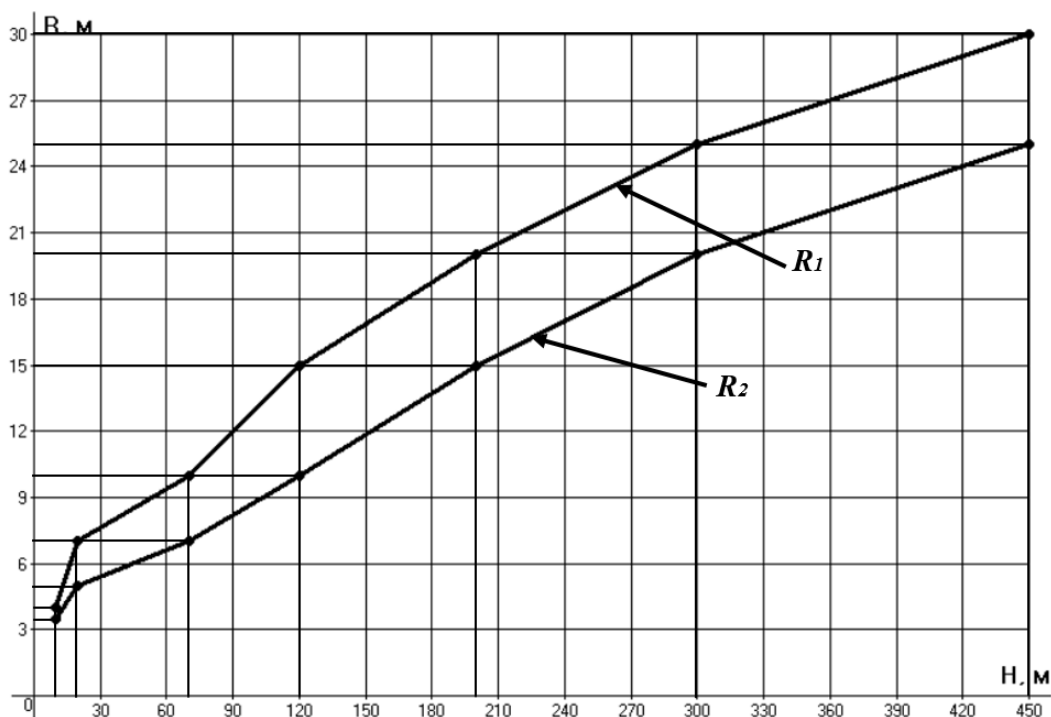


Рисунок 1 – Графики зависимости расстояния отлета R от высоты H падения при перемещении подъемным сооружением – R_1 и при падении со здания – R_2

Для определения значений $\lg a$ и b составлена таблица 2.

Таблица 2 – Исходные данные для расчетов $\lg a$ и b

H	R_1	$\lg H$	$\lg R$	$\lg H \cdot \lg R_1$	$(\lg H)^2$	R_1' - расчетные данные	Отклонения расчетных данных от табличных
до 10	4	1	0,60	0,60	1	4,27	0,27
до 20	7	1,30	0,84	1,09	1,69	6,08	0,92
до 70	10	1,85	1	1,85	3,42	11,52	1,52
до 120	15	2,08	1,18	2,45	4,33	15,17	0,17
до 200	20	2,30	1,30	2,99	5,29	19,68	0,32
до 300	25	2,48	1,40	3,47	6,15	24,20	0,8
n = 6	суммы	11,01	6,32	12,45	21,88	-	-

Получаем по формулам (3) и (4):

$$\lg a = \frac{21,88 \cdot 6,32 - 11,01 \cdot 12,45}{6 \cdot 21,88 - (11,01)^2} = 0,12;$$

Следовательно, $a = 1,32$;

$$b = \frac{6 \cdot 12,45 - 11,01 \cdot 6,32}{621,88 - (11,01)^2} = 0,51.$$

Таким образом, формула (1) приобретает вид:

$$R_1' = 1,32H^{0,51}, \quad (5)$$

где R_1' – расчетные значения расстояния отлета при падении груза, перемещаемого с помощью какого-либо подъемного сооружения.

В таблице 2 рассмотрены значения высоты H до 300 м, так как строительство каких-либо объектов (зданий) большей высоты – это особые случаи.

В предпоследнем столбце таблицы 2 приведены расчетные значения R_1' расстояния отлета, а в последнем столбце – отклонения расчетных данных от табличных.

Средняя абсолютная ошибка Δ формулы (5) будет:

$$\Delta = \frac{0,27 + 0,92 + 1,52 + 0,17 + 0,32 + 0,8}{6} = 0,67 \text{ м.}$$

Полученная средняя абсолютная ошибка может быть использована для расчета средней относительной ошибки $\Delta_{отн}$:

$$\Delta_{отн} = \frac{0,67}{13,5} \cdot 100\% = 4,96\%.$$

В расчете 13,5 – это среднее значение R_1 .

Скорее всего, полученная ошибка лежит в пределах ошибки тех опытных данных, по которым составлена таблица 1.

Еще одним видом аппроксимирующей зависимости может быть уравнение параболы:

$$R = a + bH + cH^2, \quad (6)$$

где a, b, c – искомые коэффициенты, определяемые по формулам, приведенным в [4]:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n R_i (\sum_{i=1}^n H_i^2 \sum_{i=1}^n H_i^4 - (\sum_{i=1}^n H_i^3)^2) - \sum_{i=1}^n H_i R_i (\sum_{i=1}^n H_i \sum_{i=1}^n H_i^4 - \sum_{i=1}^n H_i^2 \sum_{i=1}^n H_i^3) + \sum_{i=1}^n H_i^2 R_i (\sum_{i=1}^n H_i \sum_{i=1}^n H_i^3 - (\sum_{i=1}^n H_i^2)^2)}{E}, \quad (7)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n R_i (\sum_{i=1}^n H_i^2 \sum_{i=1}^n H_i^3 - \sum_{i=1}^n H_i \sum_{i=1}^n H_i^4) - \sum_{i=1}^n H_i R_i ((\sum_{i=1}^n H_i^2)^2 - n \sum_{i=1}^n H_i^4) + \sum_{i=1}^n H_i^2 R_i (\sum_{i=1}^n H_i \sum_{i=1}^n H_i^2 - n \sum_{i=1}^n H_i^3)}{E}, \quad (8)$$

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n R_i (\sum_{i=1}^n H_i \sum_{i=1}^n H_i^3 - (\sum_{i=1}^n H_i^2)^2) - \sum_{i=1}^n H_i R_i (n \sum_{i=1}^n H_i^3 - \sum_{i=1}^n H_i \sum_{i=1}^n H_i^2) + \sum_{i=1}^n H_i^2 R_i (n \sum_{i=1}^n H_i^2 - (\sum_{i=1}^n H_i)^2)}{E}, \quad (9)$$

$$E = n (\sum_{i=1}^n H_i^2 \sum_{i=1}^n H_i^4 - (\sum_{i=1}^n H_i^3)^2) - \sum_{i=1}^n H_i (\sum_{i=1}^n H_i \sum_{i=1}^n H_i^4 - \sum_{i=1}^n H_i^2 \sum_{i=1}^n H_i^3) + \sum_{i=1}^n H_i^2 (\sum_{i=1}^n H_i \sum_{i=1}^n H_i^3 - (\sum_{i=1}^n H_i^2)^2), \quad (10)$$

$$n = 7.$$

Используя исходные данные из таблицы 1, по формулам (7), (8), (9), (10) получаем при перемещении подъемным сооружением:

$$a = 4,0; b = 0,10; c = -9,01 \cdot 10^{-5}.$$

При падении со здания:

$$a = 2,96; b = 0,07; c = -4,02 \cdot 10^{-5}.$$

С учетом приведенных коэффициентов формула (6) получает вид:

$$R'_1 = 4,0 + 0,10H - 9,01 \cdot 10^{-5}H^2, \quad (11)$$

$$R'_2 = 2,96 + 0,07H - 4,02 \cdot 10^{-5}H^2. \quad (12)$$

По полученным аппроксимирующим формулам (11), (12) построены графики, приведенные на рисунке 2. На этом же рисунке приведены и графики табличных данных.

Начиная с высоты возможного падения 50–60 м приведенные графики расчетных данных практически совпадают с табличными. Тем не менее целесообразно определить ошибки, связанные с формулами (11), (12). Соответствующие расчеты выполнены в таблице 3.

Средняя абсолютная ошибка Δ формулы (11) составляет:

$$\Delta = \frac{0,99 + 1,04 + 0,56 + 0,30 + 0,40 + 0,89 + 0,75}{7} = 0,70 \text{ м.}$$

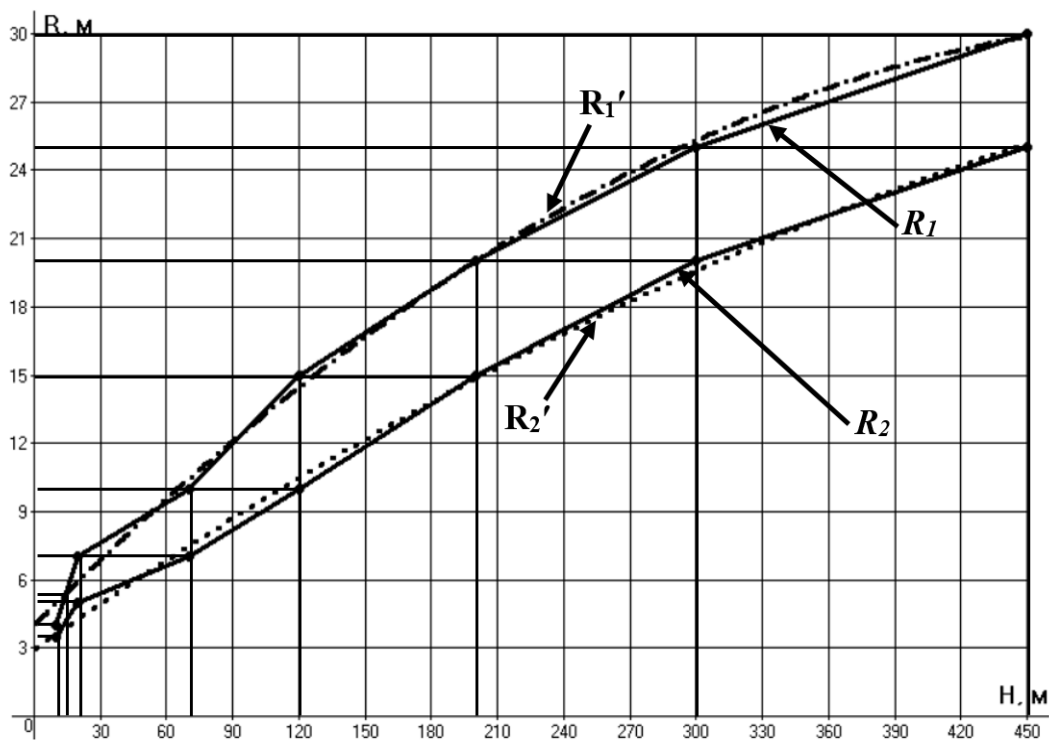


Рисунок 2 – Полученные зависимости для случая падения с подъемного сооружения (R_1 и R_1') и для случая падения со здания (R_2 и R_2')

Средняя относительная ошибка $\Delta_{отн}$ будет:

$$\Delta_{отн} = \frac{0,70}{15,86} \cdot 100\% = 4,41\%$$

В расчете 15,86 – это среднее значение R_1 , исходя из таблицы 3.

Таблица 3 – Сравнение табличных и расчетных значений отлета R при падении груза, перемещаемого подъемным сооружением, и предмета, падающего со здания

H	R_1	R_2	R_1' – расчетные данные по формуле (11) при падении с подъемного сооружения	R_1' – расчетные данные по формуле (12) при падении со здания	Отклонения расчетных данных от табличных	
					для R_1'	для R_2'
до 10	4	3,5	4,99	3,66	0,99	0,16
до 20	7	5	5,96	4,34	1,04	0,66
до 70	10	7	10,56	7,66	0,56	0,66
до 120	15	10	14,70	10,78	0,30	0,78
до 200	20	15	20,40	15,35	0,40	0,35
до 300	25	20	25,89	20,34	0,89	0,34
до 450	30	25	30,75	26,32	0,75	1,32
суммы	111	85,5	-	-	4,93	4,27

Из приведенного расчета следует, что ошибка формулы (11) на 0,55 % меньше ошибки формулы (5), что, возможно, связано с тем, что в формуле (5) не учитывалась высота 450 м.

Для формулы (12) получаем аналогично $\Delta = 4,24/7 = 0,61$ м. Значение $\Delta_{отн}$ будет:

$$\Delta_{отн} = \frac{0,61}{(85,5/7)} \cdot 100\% = 4,99\% .$$

Есть основание утверждать, что и в данном случае ошибка не превысит тех ошибок, которые относятся к опытным данным по R_1 и R_2 , представленным в таблице 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Включаемая в действующие нормативные правовые акты таблица 1 учитывает зависимость расстояния отлета предметов, грузов только от высоты их падения.
2. Приведенные табличные данные по расстоянию отлета могут быть аппроксимированы эмпирическими формулами, погрешность которых не превысит 4-5 %.
3. На расстояния отлета предметов, грузов в случае их падения может влиять, кроме высоты падения, ряд других факторов, указанных выше в настоящей статье. Влияние этих факторов должно быть предметом отдельного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Минтруда России от 16 ноября 2020 г. № 782н «Об утверждении Правил по охране труда при работе на высоте» (Зарегистрировано в Минюсте России 15.12.2020 № 61477).
2. Пустыльник, Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е.И. Пустыльник. – Москва: Наука, 1968. – 288с.
3. Кассандрова, О. Н. Обработка результатов наблюдений / О. Н. Кассандрова, В. В. Лебедев. – Москва: Наука, 1970. – 104 с.
4. Веденяпин, Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработка опытных данных / Г. В. Веденяпин. – Москва: Колос, 1973. – 199 с.
5. Якупов, З. Я. Методы наименьших квадратов и наименьших модулей в научно-технических расчетах: учебное пособие / З. Я. Якупов, Р. К. Галимова. – Казань: КНИТУ-КАИ, 2017. – 140 с.

TO DEFINE THE DISTANCE OF DEPARTURE OF OBJECTS AND GOODS WHEN FALLING FROM A HEIGHT

R. A. Popov, student,
e-mail: rusl4n.popov@yandex.ru
Kaliningrad State Technical University

V. M. Minko, Doctor of Engineering, Professor,
e-mail: mcotminko@mail.ru
Kaliningrad State Technical University

This article provides an approximation of the dependencies between the distance R of the departure of objects, goods and the height H of their possible fall. The cases of falling when moving with the help of a lifting structure and falling from a building are considered. The presented approximating formulas have an average relative error of 4.41 – 4.99%, which is most likely within the errors of the experimental data, according to which tabular dependencies between R and H are obtained.

Keywords: falling objects, loads, cause of the fall, departure distance, height of the fall, approximating formulas.