

МЕТОДЫ И ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЗАРЯДОВ

С. Д. ОСНОВИН

(Представлено научной конференцией горно-эксплуатационного факультета).

На совещаниях по буро-взрывным работам в 1939 г. и затем в 1952 г. в г. Москве было отмечено, что вопросы расчета зарядов не имеют ещё необходимой теоретической базы и уровень расчета зарядов отстает от темпов развития буро-взрывного дела, и это отставание становится все более и более ощутительным. В принятой на последнем совещании резолюции научная разработка данного проблемного вопроса поставлена как одна из основных и первоочередных задач.

Цель настоящей статьи — дать общий обзор развития идей, принципов, методов и формул для расчета сосредоточенных зарядов.

1. Заряды нормального выброса

Различают следующие элементы воронки взрыва (рис. 1):

W — кратчайшее расстояние от центра заряда до свободной поверхности, называемое линией наименьшего сопротивления и обозначаемое ЛНС;

r — радиус воронки взрыва;

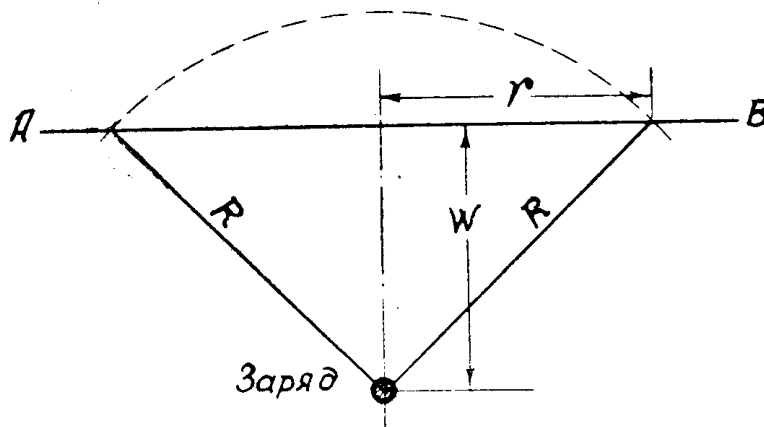


Рис. 1. Воронка взрыва.

R — радиус действия взрыва, определяющий расстояние от вершины опрокинутого конуса до любой точки ее края;

n — отношение радиуса воронки взрыва к линии наименьшего сопротивления $\left(n = \frac{r}{W} \right)$, называемое показателем действия взрыва (показателем выброса).

Заряд, образующий на поверхности среды (породы) воронку, радиус которой равен ЛНС ($r = W$), и показатель действия взрыва равен единице ($n = \frac{r}{W} = 1$) называют зарядом нормального выброса; образованная взрывом такого заряда воронка—воронкой нормального выброса.

Разрушительное действие взрыва заряда находится в прямой зависимости от сопротивления среды. Отсюда принималось, что величина заряда должна быть пропорциональна тому сопротивлению, которое он должен преодолеть. Данный принцип был высказан еще в 1628 г. и до последнего времени не подвергался изменениям. За преобладающее сопротивление, которое должен преодолеть заряд, принимали сопротивление силы тяжести отрываемой среды, а как следствие этого, считали, что вес заряда должен быть пропорционален весу отрываемой среды или, иначе, объему воронки нормального выброса. Поэтому предложенные формулы для расчета величины заряда нормального выброса основаны на теоретическом вычислении объема воронки, образуемой взрывом, и на экспериментальном определении количества ВВ, необходимого для выброса единицы ее объема.

Для расчета зарядов нормального выброса был предложен ряд формул. В табл. 1 приведены основные из них.

Таблица 1

Формулы для расчета зарядов нормального выброса

Порядковый № формулы	Год	Формула	Принятая форма воронки	Объем воронки
1	1812	$L = 1,83 W^2 P^{\frac{1}{3}}$	Опрокинутый усеченный конус	$1,83 W^3$
2	1871	$L = c \cdot W^3$	Конус вращения	W^3
3	1838-1905	$L = 1,895 W^3 z$	Параболоид вращения	$1,896 W^3$

Значение величин, входящих в формулы:

L — вес заряда в кг;

W — ЛНС в м.

Величина P , c и z , расход ВВ на 1 м³ отрываемой породы, носят название удельного расхода ВВ.

Формула 1. В основу формулы положена воронка нормального выброса в форме опрокинутого усеченного конуса, радиус нижнего основания которого равен половине радиуса верхнего основания. Объем такого конуса

$$V = \frac{\pi}{3} \cdot W \left(r^2 + r \cdot \frac{r}{2} + \frac{r^2}{4} \right) = \frac{\pi}{3} \cdot W \cdot 1,75 r^2. \quad (1)$$

Так как у воронки нормального выброса $r = W$, то

$$V = \frac{\pi}{3} \cdot W \cdot 1,75 W^2 = 1,83 W^3. \quad (2)$$

¹⁾ Для пороховых зарядов.

Отсюда:

$$L = 1,83 \cdot W^3 \cdot P. \quad (3)$$

Формула 2. Воронка выброса была принята в форме прямого опрокинутого конуса вращения с вершиной в центре заряда.

Основное свойство воронки нормального выброса $r = W$.

Объем воронки, выраженный через ЛНС $= W$, будет:

$$V = \frac{1}{3} \pi \cdot r^2 \cdot W = \frac{1}{3} \pi \cdot W^3 \approx W^3. \quad (4)$$

Отсюда для расчета зарядов получена формула:

$$L = c \cdot W^3. \quad (5)$$

Формула 3. В основу положена воронка выброса в форме параболоида вращения с фокусом в центре заряда.

Объем параболоида вращения

$$V = \frac{1}{2} \pi \cdot r^2 \cdot h, \quad (6)$$

где r — радиус основания;

h — высота.

Пользуясь затем свойствами параболы и выражая h и r через ЛНС $= W$, определен объем воронки:

$$h = \frac{R + W}{2};$$

$$r = W; \quad R = \sqrt{W^2 + W^2} = W \sqrt{2};$$

$$V = \frac{1}{2} \pi \cdot W^2 \cdot \frac{W \sqrt{2} + W}{2} = 1,896 W^3 \quad (7)$$

и предложена следующая формула для расчета величины заряда:

$$L = 1,896 W^3 \cdot z \quad (8)$$

Формулы 1, 2 и 3 построены на основе одного и того же принципа.

Для сравнительной оценки трех этих формул необходимо помнить, что расход BV на единицу объема воронки определяется исключительно экспериментально, исходя из величины заряда, при котором радиус основания воронки взрыва равен ЛНС.

Если же вычисление величин P , c и z произведено на основе одного и того же опыта, на основе одних и тех же экспериментальных данных, то тот или иной вид расчетной формулы не имеет отличий по существу, и по каждой из этих трех формул в результате расчета должны получиться одинаковые расчетные величины зарядов.

А поэтому эти формулы, как не имеющие различия по существу, можно свести к одной общей формуле:

$$L = q \cdot W^3, \quad (9)$$

q — удельный расход BV при ЛНС $= 1$ м.

Этой формулой общего вида в настоящее время и пользуются для расчета сосредоточенных зарядов нормального выброса.

Характерной чертой данной формулы является то, что в ней принято:

1) пропорциональность величины заряда объему воронки выброса или кубу ЛНС;

2) постоянство удельного расхода $ВВ$ с изменением ЛНС при равенности прочих условий.

Более поздние исследования и практические наблюдения показали, что при производстве взрывных работ в обычных горных условиях, когда необходимо только дробление породы без значительного ее выброса или только ее рыхление, удельный расход $ВВ$ не остается величиной постоянной, и по мере увеличения ЛНС можно применять все меньший и меньший удельный расход $ВВ$. В связи с чем были предложены новые формулы для расчета зарядов, получившие наименование формул для расчета зарядов уменьшенного выброса и зарядов рыхления.

2. Заряды уменьшенного выброса и заряды рыхления

При заряде уменьшенного выброса показатель действия взрыва $n = \frac{r}{W} < 1$ и образуется воронка с радиусом основания, меньшим ЛНС, т. е. $r < W$.

Практика показала, что при показателе действия взрыва $n \leq 0,75$, порода не выбрасывается, и наружное действие заряда выражается лишь в рыхлении и вспучивании взрывающей породы. Такие заряды носят название зарядов рыхления.

Если же значение $n < 0,5$, то вспучивание породы на поверхности не происходит; в этом случае происходит только образование сферической камеры вокруг места расположения заряда. Эти заряды называют зарядами сжатия и применяют при прострелке скважин и шпуров для образования котловых расширений.

Все формулы для расчета заряда уменьшенного выброса и зарядов рыхления отличаются по внешнему виду от формулы общего вида для зарядов нормального выброса (9) только тем, что в них в качестве множителя введен поправочный коэффициент $f(n)$.

В общем виде формулы для расчета зарядов уменьшенного выброса могут быть представлены:

$$Q = f(n) \cdot q \cdot W^3 = f(n) \cdot L, \quad (10)$$

где Q — вес заряда уменьшенного выброса или заряда рыхления в кг

$f(n)$ — функция действия взрыва (показателя выброса);

q — удельный расход $ВВ$ в кг/м³;

W — ЛНС в м;

L — величина заряда нормального выброса с ЛНС = W .

Задача всех авторов в основном заключалась в выводе математического выражения для $f(n)$.

Формул для выражения $f(n)$ было предложено довольно много. Значительная часть этих формул практического применения не получила и в настоящее время представляет лишь исторический интерес. Мы остановимся только на тех формулах, которые в той или иной мере сохранили свое значение до настоящего времени.

Формулы для расчета зарядов уменьшенного выброса можно объединить в три группы по наиболее характерным для них признакам. К числу которых следует отнести основной принцип построения формулы, и от каких величин, входящих в формулу, установлена зависимость.

Формулы первой группы

В эту группу нами отнесены формулы, кроме формулы А. В. Коваченкова (1945 г.), наиболее ранние по времени (табл. 2).

Характерные черты этих формул:

1) основной принцип, принятый при зарядах нормального выброса, пропорциональности величины заряда весу отрываемой породы или объему воронки выброса, изменению не подвергался;

2) значение $f(n)$ ставилось в зависимость только от показателя действия взрыва n ;

3) при выводе значения $f(n)$ учитывался пороховой заряд или заряд из бризантного ВВ.

При выводе формул для $f(n)$ этой группы авторы, применяя различные методы обработки эмпирических данных, исходили из общих положений:

1) воронки выброса с показателем действия взрыва n , не равным 1, при постоянной ЛНС можно получить, увеличивая или уменьшая заряд;

2) с увеличением или уменьшением величины заряда, если ЛНС остается постоянной, показатель действия взрыва n будет изменять свое значение, следовательно, величину заряда можно рассматривать как функцию показателя действия взрыва $n = f(n)$.

Формула 1 (1812 г.) [3 и 12]. Из формул, нашедших применение, эта формула является наиболее ранней.

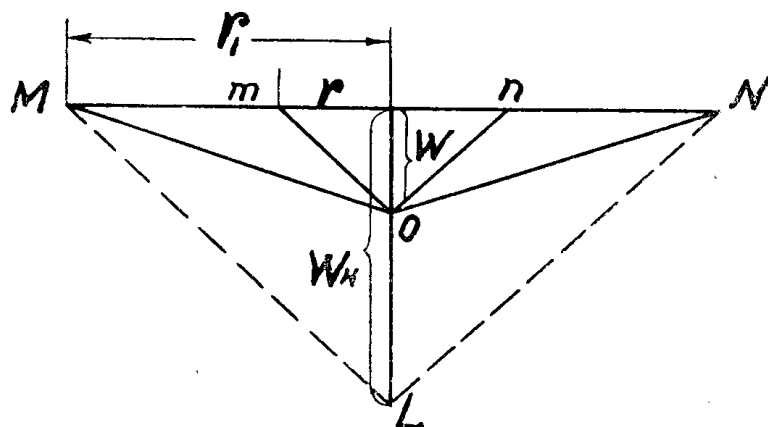


Рис. 2. Исследование $f(n)$.

Для вывода математического выражения для $f(n)$ были использованы данные опытов (рис. 2). Была установлена величина порохового заряда для заданной ЛНС $= W$, образующего нормальную воронку выброса mOn , и величина заряда, образующего при этой же ЛНС воронку усиленного выброса MON с наибольшим для пороховых зарядов значением показателя действия взрыва $n = 3$. Вычислив затем, при какой ЛНС $= W_n$ тот же заряд усиленного выброса в данной среде образовал бы воронку нормального выброса MLN , по данным опыта определено приращение $(r_1 - r)$, а с другой стороны приращение вычислений ЛНС $= W_n$ по отношению к фактической ЛНС W , равное $(W_n - W)$, и принято, что отношение $\frac{W_n - W}{r_1 - r}$ для всех значений $n = \text{const} = 0,91$.

Исходя далее из положения, что „Величины двух нормальных зарядов выброса одного и того же ВВ, действующих в одной и той же среде, при равенстве прочих условий, но при различных ЛНС, относятся друг к другу как кубы их ЛНС“, и произведя затем соответствующие простые математические преобразования, предложена формула:

$$f(n) = \left(\frac{W_n}{W} \right)^3 = (0,09 + 0,91 n)^3. \quad (11)$$

Формула 2 [3 и 12]. Значения $f(n)$, вычисленные по первоначально предложенной формуле (11), при значениях показателя действия взрыва n , стремящихся к нулю, получаются заниженными, что было замечено и самим автором формулы, и тогда же для расчета зарядов уменьшенного выброса им была предложена новая формула, для вывода которой были использованы исключительно экспериментальные данные.

Рядом опытных взрывов было установлено, что заряд нормального выброса с ЛНС $= W$ при ЛНС $7/4 W$ становится зарядом наибольшего сжатия, а при ЛНС $= 7/5 W$ — зарядом рыхления.

Равным образом, заряд наибольшего сжатия с ЛНС $= W$ при ЛНС $= 4/7 W$ становится зарядом нормального выброса, а заряд рыхления с ЛНС $= W$ при ЛНС $= 5/7 W$ — тоже зарядом нормального выброса.

Учитывая данные опытных взрывов была составлена формула, которая удовлетворяла бы указанным выше условиям.

Такой формулой оказалось

$$f(n) = \left(\frac{4 + 3n}{7} \right)^3. \quad (12)$$

Формула 3 — Фролова (1868 г.) [3 и 12]. Фролов предложил простой способ вывода формулы для определения $f(n)$.

Проанализировав результаты опытных взрывов, Фролов показал, что при равных ЛНС величина заряда возрастает, когда радиус основания воронки увеличивается; если же радиусы равны, то величина зарядов возрастает с увеличением ЛНС. Эти же опыты показали, что для зарядов усиленного выброса ($n > 1$) значение $f(n)$ заключается в пределах:

$$1 < f(n) < n^3, \quad (13)$$

а для зарядов уменьшенного выброса ($n < 1$):

$$1 > f(n) > n^3. \quad (14)$$

С другой стороны, при $n = 1$ значение $f(n)$ также $= 1$.

Указанным трем условиям может удовлетворять только одна формула общего вида:

$$f(n) = A + B n^3, \quad (15)$$

где

$$A + B = 1. \quad (16)$$

Применяя этот метод, но пользуясь данными более ранних и широко известных взрывов, Фролов определил значение коэффициентов $A = 0,5$ и $B = 0,5$ и предложил для определения $f(n)$ формулу:

$$f(n) = (0,5 + 0,5 n^3). \quad (17)$$

Фролов впервые указал на большую роль связанности различных сред и на необходимость глубокого учета этой связанности.

Формула 4 — Борескова (1871 г.) [3 и 12]. Развивая предложенный Фроловым метод, но уточняя данные опыта, Боресков предложил для определения $f(n)$ такое выражение:

$$f(n) = (0,4 + 0,6 n^3). \quad (18)$$

Формула 5 [3 и 12] Пользуясь тем же самым методом, были вычислены по данным опытов значения коэффициентов $A = 0,2$ и $B = 0,8$ и предложена формула:

$$f(n) = (0,2 + 0,8 n^3). \quad (19)$$

Формула 6 (1871 г.) [3 и 12]. Основная цель, которая преследовалась при выводе данной формулы, это упростить расчет зарядов за счет некоторого преувеличения их при взрывных работах в военном деле с исключительной целью разрушения.

Было принято, что $W_H = n \cdot W = r$, и для $f(n)$ предложено выражение:

$$f(n) = \left(\frac{W_H}{W} \right)^3 = \left(\frac{n \cdot W}{W} \right)^3 = n^3. \quad (20)$$

Формула 7 (1873 г.) [3 и 12]. Многочисленным экспериментальным взрыванием зарядов усиленного и уменьшенного выброса было установлено, что для них радиус взрыва R (рис. 3) может быть определен через W_H по следующему равенству:

$$R = W_H + 0,41 W. \quad (21)$$

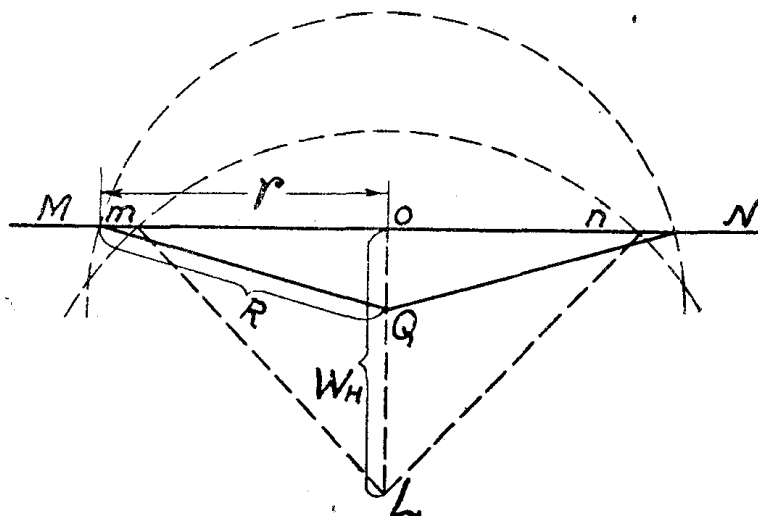


Рис. 3. Исследование $f(n)$.

С другой стороны

$$R = \sqrt{W^2 + r^2}. \quad (22)$$

Далее было принято, что

$$f(n) = \left(\frac{W_H}{W} \right)^3. \quad (23)$$

После замены r через равнозначное ему $n \cdot W$, решая три приведенные уравнения (21), (22) и (23), была выведена формула:

$$f(n) = (\sqrt{1 + n^2} - 0,41)^3. \quad (24)$$

Формула 8 — А. В. Коваженкова (1945 г.) [6]. Автор, считая, что показатель действия взрыва n (показатель выброса) полностью не охватывает все особенности действия заряда, чтобы дополнить понятие о действии заряда, вводит новый показатель „коэффициент выброса“ k , характеризующий отношение объема воронки выброса к объему сферы разрушения. Доказав затем, что „коэффициент выброса“ зависит только от показателя действия взрыва, и решая составленные уравнения, после преобразований предлагает следующую формулу:

$$f(n) = 0,356 (1 + n^2)^{\frac{3}{2}}. \quad (25)$$

Таблица 2

Значение $f(n)$ по формулам первой группы

№ пп	Обозначение формулы	Год	Формула для $f(n)$	Численные значения $f(n)$ при разных n :														
				=0	=0,25	=0,5	=0,75	=0,8	=0,9	=1,0	=1,25	=1,5	=1,75	=2,0	=2,25	=2,50	=2,75	=3,0
1	1 ¹⁾	1812	$f(n) = (0,09 + 0,91 n^2)$	—	—	—	—	—	—	1,0	0,86	3,08	4,70	6,97	9,78	13,93	17,36	22,43
2	2 ²⁾	—	$f(n) = \left(\frac{4 + 3n}{7}\right)^2$	0,187	0,31	0,49	0,73	0,76	0,88	1,0	—	—	—	—	—	—	—	—
3	3-Фролов	1868	$f(n) = (0,5 + 0,5 n^2)$	0,50	0,51	0,56	0,71	0,75	0,86	1,0	1,48	2,19	3,18	4,50	6,25	8,31	10,90	14,0
4	4-Боресков	1871	$f(n) = (0,4 + 0,6 n^2)$	0,40	0,41	0,48	0,65	0,70	0,84	1,0	1,57	2,43	3,62	5,20	7,30	9,78	12,88	16,6
5	5 ³⁾	—	$f(n) = (0,2 + 0,8 n^2)$	0,20	0,21	0,30	0,54	0,60	0,78	1,0	1,76	2,90	4,48	6,60	9,40	12,71	16,80	21,8
6	6 ⁴⁾	1871	$f(n) = n^2$	0	0,016	0,125	0,42	0,51	0,73	1,0	1,95	3,38	5,36	8,0	11,39	15,63	20,8	27,0
7	7	1873	$f(n) = (\sqrt{1 + n^2} - 0,41)^2$	0,20	0,25	0,35	0,59	0,66	0,82	1,0	1,68	2,69	4,14	6,08	8,64	11,86	15,93	20,8
8	8-А. В. Коваженков	1945	$f(n) = 0,356 (1 + n^2)^{\frac{2}{3}}$	0,356	0,37	0,50	0,70	0,75	0,87	1,0	1,46	2,06	2,91	4,00	5,30	6,98	8,92	11,8

1) Только для пороховых зарядов усиленного выброса.

2) Только для пороховых зарядов уменьшенного выброса.

3) Для пороховых зарядов при всяком n и для бризантных ВВ при $n < 1$.4) Для бризантных ВВ при $n \geq 1$ и для зарядов пороха в скале, кладке и бетоне.

В отклике (в порядке обсуждения) на статью А. В. Коваженкова И. М. Наумов [8] считает, что при выводе формулы для $f(n)$:

1) неправильно принята зона обрушения шарообразной, так как воронка выброса образуется только конус рыхления, а не сфера

2) выведенная формула для $f(n)$ — неправильная.

В таблице 2 приведены численные значения $f(n)$ по формулам первой группы, в которых значение $f(n)$ ставилось в зависимость только от показателя действия взрыва n . Численные значения $f(n)$ по формулам первой группы значительно расходятся между собою, смотря по тому, какими эмпирическими данными и методом обработки их пользовались авторы при выводе этих формул. Наиболее близкие между собою численные значения $f(n)$ по формулам (19) и (24). Средние численные значения $f(n)$ дает формула (24), получившая наибольшее распространение в западных странах.

Все исследователи, предлагавшие для определения $f(n)$ формулы, которые отнесены нами к первой группе, стремились внести только поправку в основную формулу (9), приспособив ее к практическим данным. В целом ни одна из этих формул не отражала физического закона действия заряда в среде. Кроме того, выбор показателя действия взрыва n не был обусловлен объективными факторами. В результате полученные расчетные величины зарядов расходились с действительностью, и ни одна из этих формул не получила общего признания при расчете зарядов.

Формулы второй группы

При пользовании формулами первой группы, как показала практика, оказалось, что при выборе величины показателя действия взрыва n , а следовательно, и $f(n)$ приходится считаться с абсолютной величиной ЛНС. Это обстоятельство было учтено и были предложены формулы, которые отнесены нами ко второй группе (табл. 3), при выводе которых:

1) основной принцип оставался прежним;

2) значение $f(n)$ ставилось в зависимость не от показателя действия взрыва n , а от абсолютной величины ЛНС;

3) формулы назначены для бризантных ВВ.

Формула 9 (1934) [3]. Формула назначена для расчета зарядов уменьшенного выброса при горных работах в тех случаях, когда необходимо только дробление породы без значительного выброса ее.

Автор детально проанализировал факторы, влияющие на величину удельного расхода ВВ, и дал таблицы коэффициентов, учитывающих степень этого влияния.

При взрыве заряда устанавливается наличие двух конусов (рис. 4).

Часть породы в объеме конуса AOB будет выброшена, образуя воронку выброса AOB с радиусом основания воронки r . За пределами воронки выброса ослабленная волна действия взрыва, произведя лишь рыхление породы, образует конус рыхления COD с радиусом основания воронки r_1 , названный воронкой действия заряда.

В соответствии с установлением двух конусов введены две характеристики: $\frac{r}{W} = n$ — показатель выброса и $\frac{r_1}{W} = n^1$ — показатель действия взрыва.

На основании практического опыта за исходные приняты следующие основные положения:

1) при всяком заряде уменьшенного выброса показатель действия взрыва $\frac{r_1}{W} = n^1 = 1$ и, следовательно, конус действия взрыва — прямоугольный;

2) хорошее дробление получается лишь тогда, если между показателем выброса n и ЛНС (в метрах) существует зависимость, выраженная равенством:

$$n^2 \cdot W = 1. \quad (26)$$

На основании этих положений установлено такое соотношение между элементами воронки выброса:

$$r = n \cdot W = W \sqrt{-\frac{1}{W}} = \sqrt{W}, \quad (27)$$

т. е. радиус сферы выброса, практически не поддающийся измерению, равен корню, квадратному из ЛНС.

Кроме перечисленных дополнительных определений, автор формулы ввел еще значение стрелки k —превышение радиуса выброса R (рис. 4) над ЛНС W .

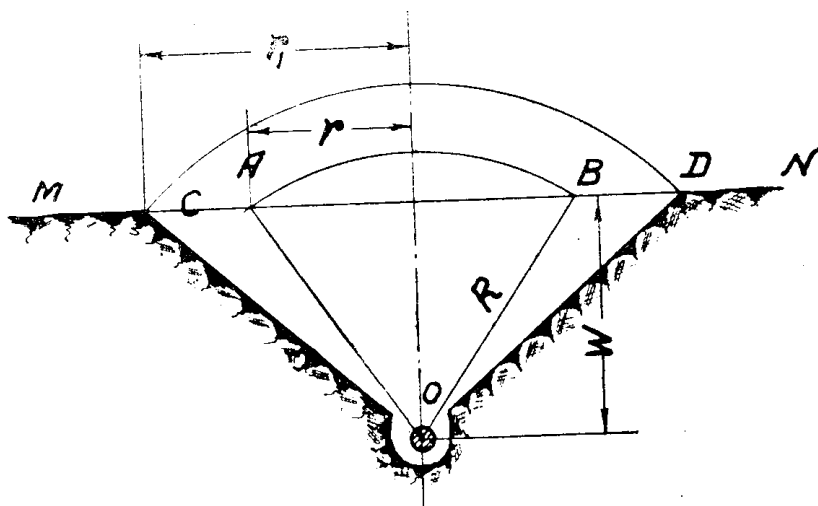


Рис. 4. Воронка выброса и воронка действия заряда.

Пользуясь этими основными зависимостями путем алгебраических преобразований и принимая в основу более ранние исследования, автор получил следующую формулу для $f(n)$, выраженную в зависимости от значения ЛНС:

$$f(n) = \left(\sqrt{\frac{W+1}{W}} - k \right)^3; \quad (28)$$

$$k = W \left(\sqrt{\frac{W+1}{W}} - 1 \right), \quad (29)$$

где W —ЛНС в м;

k —стрелка или поправка к ЛНС в м.

Формула (28) получила широкое распространение в СССР. Но в дальнейшем в части метода определения $f(n)$ и численных значений последней был высказан ряд критических замечаний Н. В. Мельниковым, П. Я. Тарановым, В. И. Терентьевым, Ш. И. Ибраевым, А. В. Коваженковым и др. [7; 14; 15; 4 и 6]. В сводном виде эти замечания следующие:

1) в основу формулы положен неверный принцип постоянства радиуса взрыва (выброса) R при различных ЛНС;

2) зависимость $n^2 \cdot W = 1$ получена путем математических преобразований, а не на основании опытных взрывов;

Таблица 3

Значение $f(n)$ по формулам второй группы

№ п/п	Обозначение формулы	Год	Формула для $f(n)$	Значение показателя действия взрыва n																
				=3,16	=1,41	=1,00	=0,82	=0,71	=0,63	=0,58	=0,50	=0,45	=0,41	=0,38	=0,35	=0,33	=0,32	=0,26	=0,22	=0,18
				Значение ЛНС																
				=0,1	=0,5	=1,00	=1,5	=2,0	=2,5	=3,0	=4,0	=5,0	=6,0	=7,0	=8,0	=9,0	=10,00	=15,00	=20,00	=30,00
				Значение $f(n)$																
1	9	1934	$f(n) = \left(\sqrt{\frac{W+1}{W}} - k \right)^3$	30,0	2,6	1,00	0,62	0,49	0,38	0,33	0,28	0,24	0,22	0,21	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,15
2	10-Н. В. Мельников	1944	$f(n) = \frac{\left(W+1 - k \sqrt{\frac{W+1}{W}} \right)^3}{2 \sqrt{2 W^3}}$	13,6	2,55	1,00	0,76	0,68	0,58	0,55	0,53	0,47	0,44	0,43	0,42	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37
3	11-В. Е. Филипович	1944	$f(n) = \left(\frac{W+1}{2W} \right)^{\frac{3}{2}}$	12,90	1,82	1,00	0,76	0,65	0,58	0,54	0,50	0,46	0,45	0,44	0,42	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37

Таблица 4

Значение $f(n)$ по формулам первой группы
(перечисленные на ЛНС)

№ пл	Обозначение формулы	Год	Формула для $f(n)$	Значение показателя действия взрыва																
				=3,16	=1,41	=1,00	=0,82	=0,71	=0,68	=0,58	=0,50	=0,45	=0,41	=0,38	=0,35	=0,33	=0,32	=0,26	=0,22	=0,18
				Значение ЛНС																
				=0,1	=0,5	=1,0	=1,5	=2,0	=2,5	=3,0	=4,0	=5,0	=6,0	=7,0	=8,0	=9,0	=10,0	=15,0	=20,0	=30,0
				Значение $f(n)$																
1	1 ¹⁾	1812	$f(n)=(0,09+0,91\ n^2)$	25,9	2,57	1,00	0,59	0,41	0,29	0,24	0,17	0,125	0,097	0,085	0,068	0,059	0,055	0,039	0,024	0,016
2	2 ²⁾	—	$f(n)=\left(\frac{4+3\ n}{7}\right)^2$	—	—	1,00	0,80	0,68	0,59	0,55	0,49	0,45	0,42	0,40	0,37	0,36	0,36	0,32	0,30	0,28
3	3-Фролов	1868	$f(n)=(0,5+0,5n^2)$	16,3	1,90	1,00	0,77	0,68	0,63	0,60	0,56	0,55	0,53	0,53	0,52	0,52	0,52	0,51	0,51	0,50
4	4-Боресков	1871	$f(n)=(0,4+0,6\ n^2)$	19,3	2,08	1,00	0,73	0,62	0,55	0,52	0,48	0,45	0,44	0,43	0,43	0,42	0,42	0,41	0,41	0,40
5	5 ³⁾	—	$f(n)=(0,2+0,8\ n^2)$	25,2	2,42	1,00	0,64	0,50	0,40	0,36	0,30	0,27	0,26	0,24	0,23	0,23	0,23	0,21	0,21	0,
6	6 ⁴⁾	1871	$f(n)=n^2$	31,5	2,80	1,00	0,55	0,38	0,25	0,20	0,125	0,091	0,069	0,065	0,041	0,036	0,033	0,018	0,011	0,058
7	7	1873	$f(n)=\sqrt{1+n^2}-0,41)^2$	24,1	2,30	1,00	0,68	0,53	0,46	0,39	0,35	0,33	0,30	0,29	0,27	0,26	0,26	0,25	0,23	0,22
8	8-А. В. Кова- женков	1945	$f(n)=0,356(1+n^2)^{\frac{3}{2}}$	12,9	1,84	1,00	0,77	0,66	0,59	0,57	0,50	0,47	0,45	0,43	0,42	0,41	0,40	0,38	0,37	0,36

1) Только для пороховых зарядов усиленного выброса.

2) Только для пороховых зарядов уменьшенного выброса.

3) Для пороховых зарядов при всяком n и для бризантных ВВ при $n < 1$.

4) Для бризантных ВВ при $n \geq 1$ и для зарядов пороха в скале, кладке и бетоне.

Таблица 5

Значения $f(n)$ и $f(k)$ по формулам третьей группы

№ пп	Обозначение формулы	Год	Формулы для $f(n)$ и $f(k)$	Значение ЛНС																
				=0,1	=0,5	=1,00	=1,5	=2,0	=2,5	=3,0	=4,0	=5,0	=6,0	=7,0	=8,0	=9,0	=10,0	=15,0	=20,0	=30,0
				Значение $f(n)$ и $f(k)$																
1	12-С. Д. Ос- новин	1939	$f(n) =$ $= \left(\sqrt{\frac{\sin \alpha (3 \cos \alpha + \sin \alpha)}{4 \cos^2 \alpha}} \right)^3$	10,6	1,81	1,00	0,66	0,52	0,44	0,37	0,29	0,24	0,22	0,21	0,16	0,14	0,13	0,10	0,08	0,06
2	13-В. К. Кар- чевский	1945	$f(n) = \left(\frac{0,9}{W} + 1 \right)$	9,1	1,90	1,00	0,77	0,55	0,46	0,40	0,32	0,28	0,25	0,23	0,21	0,20	0,19	0,16	0,14	0,13
3	14-С. Д. Ос- новин	1953	$f(k) = \frac{1}{k+1} \left(\frac{k}{W} + 1 \right)$	K = 1*)		1,00	0,84	0,75	0,70	0,67	0,63	0,60	0,58	0,57	0,56	0,56	0,55	0,54	0,53	0,52
				K = 9,5*)		1,00	0,70	0,55	0,44	0,40	0,32	0,28	0,25	0,23	0,21	0,20	0,19	0,16	0,140	0,125

*) K = 1 и K = 9,5 — крайние пределы для горных пород, между ними промежуточные значения $f(k)$ — по скользящей шкале.

- 3) при выводе формулы допущены математические ошибки;
- 4) неправильно использовано значение стрелки k ;
- 5) результаты расчета зарядов при больших ЛНС получаются заниженными.

Формула 10—Н. В. Мельникова (1944 г.) [7]. Горн. инженер Н. В. Мельников отмечает, что автор формулы (28), хотя и учел ценное исследование об изменении удельного расхода $ВВ$ с увеличением ЛНС, однако при выводе формулы допустил ошибки.

Исправляя допущенные, по мнению Н. В. Мельникова, ошибки при выводе формулы (28), им дается следующее выражение для определения $f(n)$:

$$f(n) = \frac{\left(W+1-k\sqrt{\frac{W+1}{W}}\right)^3}{2 \cdot V \cdot 2W^3}, \quad (30)$$

где W — ЛНС в м;

k — стрелка или поправка k ЛНС в м

Формула 11—В. Е. Филипповича (1944 г.) [16]. Пользуясь данными статьи горн. инж. Н. В. Мельникова, В. Е. Филиппович предлагает другой метод решения при выводе значения $f(n)$, считая предлагаемый им метод более простым и рациональным.

Выведенная В. Е. Филипповичем формула имеет следующий вид:

$$f(n) = \left(\frac{W+1}{2W}\right)^3. \quad (31)$$

Как видно из таблицы 3, формулы Н. В. Мельникова и В. Е. Филипповича дают более высокие численные значения $f(n)$ при больших ЛНС, чем это получается по формуле (28).

Для сравнения численных значений $f(n)$ по формулам второй и первой групп в таблице 4 приведены численные значения $f(n)$ по формулам первой группы, перечисленные на те же ЛНС, которые приняты для показателей действия взрыва n^1 в формуле (28) (табл. 3).

Все исследователи, предлагавшие формулы для определения $f(n)$, которые нами отнесены ко второй группе, также стремились ввести только поправки в основную формулу (9), приспособив ее к практическим данным. Но все же это был шаг вперед, так как вместо показателя действия взрыва n , не обусловленного какими-либо объективными факторами, $f(n)$ поставлена в зависимости от определяемой величины—ЛНС. Однако и эти формулы при практическом их применении для расчета зарядов уменьшенного выброса при породах разного рода, т. е. при породах с разными физико-механическими свойствами, дают противоречивые, ненадежные результаты.

Все это заставило искать новые пути и новые методы для расчета зарядов уменьшенного выброса.

Третья группа формул

В третью группу (табл. 5) нами отнесены формулы, в основу которых положены иные принципы и иные методы, нежели это было принято в формулах первой и второй групп.

К трудам этого направления относятся работы: Г. И. Покровского, А. Ф. Суханова, С. Д. Основина, М. П. Бродского, М. Н. Косачева, Д. Д. Бизюкина, В. К. Карчевского и других авторов.

Формула 12—С. Д. Основина (1939 г.) [9]. С. Д. Основиним было принято, что не объем взрывающей среды, а система сил, действу-

щих по боковой поверхности воронки отрыва, и система сил сопротивлений по этой поверхности определяет действие всякого заряда. Определив, как изменяются сопротивления по боковой поверхности у воронки отрыва с ЛНС = W и показателем действия взрыва n не равном 1, когда тот же заряд дает нормальную воронку отрыва с ЛНС = $W_{\text{норм.}}$, им устанавливается зависимость между $W_{\text{норм.}}$ и W . Приняв далее, что

$$f(n) = \frac{W_{\text{норм.}}^3}{W^3}, \quad (32)$$

дано следующее общее выражение для определения $f(n)$:

$$f(n) = \left(\sqrt{\frac{\operatorname{tg} \alpha (\operatorname{tg} \varphi \cdot \cos \alpha + \sin \alpha)}{V 2 \cdot \cos \alpha (\operatorname{tg} \varphi \cdot \cos 45^\circ + \sin 45^\circ)}} \right)^3. \quad (33)$$

При $\operatorname{tg} \varphi = 3$:

$$f(n) = \left(\sqrt{\frac{\sin \alpha (3 \cos \alpha + \sin \alpha)}{4 \cos^2 \alpha}} \right)^3, \quad (34)$$

где α — угол между осью воронки и образующей;

φ — угол внутреннего трения или сопротивления породы.

Формула 13 — В. К. Карчевского (1945 г.) [5]. По основному положению В. К. Карчевского заряд при взрыве должен:

- 1) отколоть блок от массива;
- 2) раздробить отколотый от массива блок на куски;
- 3) поднять и переместить весь объем взорванной массы.

Работа заряда, следовательно, должна быть пропорциональна величине поверхности отрыва, плоскостям дробления и объему перемещенной взрывом массы.

С увеличением ЛНС быстро растет объем (в кубе) и медленнее площадь (в квадрате). Удельные расходы ВВ на преодоление сопротивления по поверхности отрыва, образование трещин и дробление q_1 и на перемещение взорванной массы q_2 будут различные. Причем удельный расход ВВ q_1 с изменением глубины заложения заряда будет изменяться пропорционально W^2 , а удельный расход ВВ q_2 — пропорционально W^3 . Полный же вес заряда будет сумма расходов ВВ на эти два вида работы.

Приняв на основании опытных и расчетных данных, что

$$\frac{q_1}{q_2} = \text{const} = 9, \quad (35)$$

В. К. Карчевский предложил следующую формулу:

$$q = 0,9 q_1 W^2 + 0,1 q_2 W^3, \quad (36)$$

или в упрощенном виде

$$Q = q_1 W^2 (0,9 + 0,1 W). \quad (37)$$

Если эту формулу привести к виду общей формулы для расчета зарядов уменьшенного выброса, то значение $f(n)$ будет

$$f(n) = \left(\frac{0,9}{W} + 0,1 \right). \quad (38)$$

Формула 14 — С. Д. Основина (1953 г.) [10; 11]. Для выполнения полезной работы заряд, согласно выдвинутому С. Д. Основиным положению, должен одновременно преодолеть:

- 1) сопротивление отделению породы от массива;
- 2) силу тяжести и инерции отрываеваемой породы;

Таблица 6

Значение $f(\kappa)$ при различных значениях коэффициента κ

ЛНС м	Значение коэффициента κ																				
	0	0,1	0,5	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	10,5	15,0	∞
	Значение $f(\kappa)$																				
0,1	1	1,82	3,33	5,50	5,91	6,25	6,54	6,79	7,00	7,75	8,20	8,50	8,71	8,88	9,00	9,10	9,14	9,18	9,22	9,38	10,00
0,5	1	1,09	1,33	1,50	1,55	1,58	1,62	1,64	1,67	1,75	1,80	1,83	1,86	1,88	1,89	1,90	1,90	1,91	1,91	1,94	2,00
1,0	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2,0	1	0,95	0,83	0,75	0,73	0,71	0,69	0,68	0,66	0,63	0,60	0,58	0,57	0,56	0,56	0,55	0,55	0,54	0,54	0,53	0,50
3,0	1	0,94	0,78	0,67	0,64	0,61	0,59	0,57	0,55	0,50	0,47	0,44	0,43	0,42	0,41	0,40	0,40	0,39	0,39	0,38	0,38
4,0	1	0,93	0,75	0,63	0,59	0,56	0,54	0,52	0,50	0,44	0,40	0,37	0,36	0,34	0,33	0,32	0,32	0,31	0,31	0,30	0,25
5,0	1	0,93	0,73	0,60	0,56	0,53	0,51	0,49	0,47	0,40	0,36	0,33	0,31	0,30	0,29	0,28	0,28	0,27	0,27	0,25	0,20
6,0	1	0,92	0,72	0,58	0,54	0,51	0,49	0,46	0,44	0,37	0,33	0,31	0,29	0,27	0,26	0,25	0,25	0,24	0,24	0,22	0,17
7,0	1	0,92	0,71	0,57	0,53	0,50	0,47	0,45	0,43	0,36	0,31	0,29	0,27	0,25	0,24	0,23	0,23	0,22	0,22	0,20	0,14
8,0	1	0,92	0,71	0,56	0,52	0,49	0,46	0,44	0,42	0,34	0,30	0,27	0,25	0,24	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20	0,18	0,12
9,0	1	0,92	0,71	0,56	0,51	0,48	0,45	0,43	0,41	0,33	0,29	0,26	0,24	0,22	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19	0,17	0,11
10,0	1	0,92	0,70	0,55	0,51	0,47	0,45	0,42	0,40	0,32	0,28	0,25	0,23	0,21	0,20	0,19	0,19	0,18	0,18	0,16	0,10
15,0	1	0,91	0,70	0,54	0,50	0,46	0,43	0,40	0,38	0,30	0,25	0,22	0,20	0,18	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15	0,13	0,07
20,0	1	0,91	0,69	0,53	0,48	0,45	0,42	0,39	0,37	0,29	0,24	0,21	0,19	0,17	0,16	0,145	0,140	0,136	0,133	0,11	0,05
30,0	1	0,90	0,68	0,52	0,47	0,44	0,40	0,38	0,36	0,28	0,23	0,19	0,17	0,15	0,14	0,130	0,125	0,121	0,118	0,094	0,038

3) сопротивление дроблению породы и перемещению всего объема оторванной породы;

4) сопротивление воздуха.

Рассматривая действие заряда при взрыве, автор формулы различает воронку отрыва и воронку выброса. Под воронкой отрыва подразумевается воронка, ограниченная поверхностью отрыва. Под воронкой выброса—воронка, в пределах которой в той или иной степени происходит выброс породы.

Дифференцируя затем удельный расход $ВВ$, определенный при ЛНС, равной 1 м, на его составные части, соответственно с основными сопротивлениями, преодолеваемыми зарядом, доказываем, что при воронке отрыва любой формы и сохранении ее подобия с изменением ЛНС удельный расход $ВВ$

1) на преодоление сопротивления по поверхности отрыва будет изменяться обратно пропорционально ЛНС;

2) на преодоление сопротивления воздушного столба—в той же пропорции;

3) на преодоление силы тяжести и инерции отрываемой породы—оставаться величиной постоянной.

Показывается, как при этом будет изменяться степень дробления породы и степень ее выброса.

Решая далее комплекс составленных уравнений, предлагается следующая формула для определения $f(k)$ введенной автором вместо $f(n)$ в общую формулу для расчета зарядов уменьшенного выброса:

$$f(k) = \frac{1}{k+1} \left(\frac{k}{W} + 1 \right), \quad (39)$$

где $f(k)$ — поправка к удельному расходу $ВВ$ при ЛНС, не равных 1 м;
 k — коэффициент, зависящий от физико-механических свойств взрывающей породы;

W — ЛНС в м.

Для определения коэффициента k дается дополнительная формула простого вида.

Численные значения $f(n)$ и $f(k)$ по формулам третьей группы даны в таблице 5. Дополнительно в таблице 6 в развернутом виде даны численные значения $f(k)$ при разных значениях коэффициента k . Максимальное значение коэффициента k для горных пород определено 9,5 (в высшей степени крепкие, плотные и вязкие кварциты). Значение коэффициента k для однородного массивного и плотного угля при объемном весе $\gamma = 1,35$ принято равным 1.

Формула 15—М. П. Бродского (1953 г.) [2]. Основываясь на общем уравнении, данном Фроловым, М. П. Бродский предложил следующую формулу для определения оптимального заряда рыхления

$$Q_p = 0,48 H^3 \cdot x^3 \cdot \gamma + 0,07 H^2 \cdot x^2 \cdot \sigma \cdot k_2, \quad (40)$$

где Q — вес заряда аммонита в кг;

H — глубина заложения заряда в м;

x — коэффициент, зависящий от H ;

γ — объемный вес взрывающей породы в $т/м^3$;

σ — временное сопротивление породы скалыванию при взрыве в $т/м^2$.

Воронка взрыва принята в форме конуса вращения. Для определения численных значений x , γ и σ даются таблицы.

Если привести эту формулу к формуле общего вида для расчета зарядов (9), то получим:

$$Q = \left(0,48 \cdot x^3 \cdot \gamma + \frac{0,07 \cdot x^2 \cdot \sigma}{H} \right) \cdot H^3. \quad (41)$$

Из сопоставления выражения (41) с формулой общего вида (9) следует, что первый двучлен в скобках в правой части равенства (41) представляет по существу удельный расход ВВ, определяемый для $\text{ЛНС} = 1 \text{ м}$ и $\text{ЛНС} \leq 1 \text{ м}$ расчетным путем, исходя из значения величин x , γ и σ .

Формулы третьей группы можно подразделить на две подгруппы. К первой подгруппе нами отнесены формулы С. Д. Основина (1939 г.) и В. К. Карчевского. Ко второй подгруппе — формулы М. П. Бродского и С. Д. Основина (1953 г.).

Между этими двумя подгруппами формул имеется существенное различие.

По формуле С. Д. Основина (1939 г.) и по формуле В. К. Карчевского, $f(n)$ может иметь только один порядок численных значений по мере изменения абсолютной величины ЛНС, независимо от того, каковы физико-механические свойства взрывающей среды.

По формуле М. П. Бродского, по внешнему виду схожей с формулой В. К. Карчевского, так как в ней, как и в формуле В. К. Карчевского, вес заряда зависит от H^2 и H^3 , но определяется непосредственно по физико-механическим свойствам отрывающей среды, учитываемых переменными величинами γ и σ .

По формуле С. Д. Основина (1953 г.) $f(k)$ может иметь разный порядок численных значений (по скользящей шкале) по мере изменения абсолютной величины ЛНС в зависимости от значения коэффициента k , характеризующего физико-механические свойства отрывающей среды. Крайние пределы численных значений $f(k)$ при этом таковы, что при любой ЛНС значение $f(k)$ для горных пород не может лежать вне этих пределов. Приняв численное значение $f(n)$ по той или иной формуле для $\text{ЛНС} = 30 \text{ м}$, равными численному значению $f(k)$, можно убедиться, что численные значения $f(n)$ по формулам Н. В. Мельникова и В. Е. Филипповича весьма близки к численным значениям $f(k)$ при коэффициенте $k = 1,9$; по формуле В. К. Карчевского полностью совпадают при коэффициенте $k = 9$; по формулам других авторов будут весьма близки при соответствующих значениях коэффициента k . Таким образом, предложенные до сих пор формулы для определения $f(n)$ представляют собой частные решения по этой формуле. Необходимо также дополнительно отметить математическое свойство выражения для $f(k)$, заключающееся в том, что при замене единицы в правой части уравнения другими численными значениями будут получаться для каждого значения коэффициента k все новые и новые закономерности изменения $f(k)$ в зависимости от абсолютной величины ЛНС.

Таково в основных чертах развитие идей, принципов и методов расчета сосредоточенных зарядов уменьшенного выброса и зарядов рыхления.

Расчетом зарядов занимался целый ряд исследователей, каждый из них внес свою долю в зависимости от тех знаний и тех способов добывания их, которые имели место. Несомненно, что эта работа будет продолжаться и в дальнейшем и потребует, вероятно, еще немало труда, опытов и наблюдений для разрешения этого сложного и обширного вопроса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ассонов В. А. и Росси Б. Д. Справочник по буро-взрывным работам, часть 1. Взрывные работы. Углетехиздат, 1949.
2. Бродский М. П. О действии взрыва в твердой среде. Всесоюзное научное инженерно-техническое горное общество. Теория и практика буро-взрывных работ в горной промышленности. Углетехиздат, 1953.
3. Демидюк Г. П. Взрывные работы, ч. 1. ОНТИ, М.—Л., 1937.
4. Ибраев Ш. И. Отклики читателей на статью доц. П. Я. Таранова „Анализ метода вывода формул для расчета зарядов рыхления „Уголь“, № 3, 1949.

5. Карчевский В. К. Новое основание расчета зарядов. Магнитогорский горно-металл. институт. Научные труды, вып. 2. Вопросы горного дела. Метиздат, 1945.
 6. Коваженов А. В. Расчет зарядов при массовых взрывах. „Горный журнал“, № 9, 1945.
 7. Мельников Н. В. Уточнение формулы по расчету зарядов для взрывных работ. „Уголь“, № 3, 1944.
 8. Наумов И. М. О расчете зарядов при массовых взрывах. „Горный журнал“, № 1, 1947.
 9. Основин С. Д. Теория действия зарядов и их расчет. „Горный журнал“, № 4—5, 1939.
 10. Основин С. Д. Действие сосредоточенных зарядов и их расчет. Томский ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт им. С. М. Кирова. Вопросы разработки мощных пластов Кузбасса. Москва, Углетехиздат, 1953.
 11. Основин С. Д. Действие и расчет зарядов уменьшенного выброса и зарядов рыхления. Известия Томского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института им. С. М. Кирова, т. 79. Издание политехнического института, 1954.
 12. Справочник по взрывному делу. Т. 1. ОНТИ. М.—Л., 1936.
 13. Суханов А. Ф. К вопросу о новой теории разрушения горных пород взрывом. Юбил. сб. научных трудов, XX (1930—1950), Московский институт цветных металлов, вып. 20. Метиздат, М., 1950.
 14. Таранов П. Я. Анализ метода вывода формул для расчета зарядов рыхления. „Уголь“, № 9, 1948.
 15. Терентьев В. И. На статью П. Я. Таранова „Анализ метода вывода формул для расчета зарядов рыхления“. „Уголь“, № 3, 1949.
 16. Филиппович В. Е. Упрощение формулы по расчету зарядов для взрывных работ. „Уголь“, № 10—11, 1944.
-