

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ МЕСТНОГО ПРИГОТОВЛЕНИЯ НА ЭНЕРГЕТИКУ И КПД ВЗРЫВА

*Т. Н. Перелет, инж., А. И. Крючков, канд. техн. наук (НТУУ «КПИ»), В. С. Прокопенко, докт. техн. наук (ЗАО «Техновзрыв»)*

*Досліджено, проаналізовано і узагальнено існуючі способи визначення енергетичних параметрів сухих безтритилових багатоконпонентних вибухових речовин.*

*Ключові слова: енергія, вибухова речовина, ККД, робота.*

*Исследованы, проанализированы и обобщены существующие способы определения энергетических параметров сыпучих безтритиловых многокомпонентных взрывчатых веществ.*

*Ключевые слова: энергия, взрывчатое вещество, КПД, работа.*

*Existing methods for determining energy parameters of free-flowing nontrotyl multicomponent explosives are studied, analyzed and generalized.*

*Key words: energy, explosive, efficiency, work.*

**Введение.** Энергия взрыва используется на большинстве карьеров Украины. В настоящее время широко применяются взрывчатые вещества (ВВ) местного приготовления, которые обеспечивают возможность автоматического регулирования состава ВВ с учетом характеристики пород для каждой скважины с использованием современных смесительно-зарядных машин. В связи с этим необходимо подбирать рецептуру непосредственно на месте проведения взрыва в реальном режиме времени. Для того чтобы обеспечить эффективное разрушение горного массива в конкретных условиях при минимальном экологическом воздействии на окружающую среду, необходимо правильно подобрать состав ВВ.

**Анализ состояния проблемы.** В работе [1] представлено решение задачи по определению КПД взрыва в горной породе и его эффективности, а также параметров буровзрывных работ. Однако при этом необходимо выполнить экспериментальные и теоретические исследования, базирующиеся на положениях теории физики взрыва. В работе [2] изложен энергетический подход к разрушению горных пород, при котором учитывается баланс между энергией взрыва заряда ВВ и критической плотностью энергии породы при ее разрушении. Согласно [3] определение КПД путем интегрирования нестационарного поля напряжений при взрыве ВВ требует точного знания нестационарных полей напряжений и скоростей деформаций, а при определении КПД через работу, выполненную газообразными продуктами взрыва, существует неопределенность термодинамических параметров взрыва вследствие неоднозначности протекания химического превращения продуктов взрыва.

Из анализа приведенных выше трудов следует, что при определении энергетических параметров ВВ учитывалась или механическая, или термодинамическая составляющая КПД.

**Целью статьи** является обобщение существующих методик определения энергетических параметров ВВ для нахождения общего КПД взрыва.

**Результаты экспериментальных и теоретических исследований.** Несмотря на значительное разнообразие ВВ, применяемых в промышленности, ведется постоянный поиск новых, более дешевых, экологически более чистых и эффективных. Следует отметить, что исследования проводят в различных направлениях: от усовершенствования известных типов ВВ до получения принципиально новых видов и сортов ВВ.

В последнее время широкое распространение получили бестротиловые ВВ местного приготовления. К таким ВВ относятся взрывчатые вещества типа комполайт (ЗАО «Техновзрыв»), состоящие из аммиачной селитры (АС), дизельного топлива (ДТ) и горюче-сжимающего компонента (ГСК). Изготовление данных ВВ происходит непосредственно на месте будущего взрыва: компоненты смешиваются и заряжаются в скважину. Кислородный баланс взрывчатой смеси легко регулируется при производстве, поэтому вредные выбросы при взрыве можно свести к минимуму. Аналогично путем подбора компонентов можно регулировать фугасность и бризантность смеси, необходимую для конкретной крепости породы.

Особенностью ВВ является сверхзвуковая скорость выделения при взрыве тепловой энергии с последующим ее превращением в кинетическую энергию сжатых газов, механическая работа которых приводит к разрушению горного массива.

Общей энергией химического превращения ВВ считают теплоту, которая выделяется при взрыве ВВ.

Вся энергия за вычетом химических и тепловых потерь превращается в работу взрыва (рис. 1). Практически расширение продуктов взрыва при совершении ими работы ограничивается некоторыми пределами.

Химические потери связаны с неполнотой реакции превращения ВВ в результате частичного разброса вещества в зоне реакции.

К тепловым относятся потери, обусловленные тем, что продукты взрыва отдают тепло окружающей среде, в том числе и горным породам, путем теплообмена.

Действие взрыва заряда ВВ в породном массиве проявляется в полезных формах, для которых выполняется взрыв, и бесполезных, представляющих собой потери (разброс породы, переизмельчение прилегающей к заряду части массива). В зависимости от условий взрыва и его цели полезные формы работы будут существенно меняться. Применительно к взрывным работам в скальных породах наибольшее значение имеет работа дробления и перемещения пород, а в рыхлых – простреливание (образование полостей) и выброс на определенную высоту и расстояние.

Для оценки влияния состава ВВ на механическую работу взрыва проведены экспериментальные исследования. Исследованы восемь составов ВВ типа комполайт, хорошо зарекомендовавших себя на карьерах при ведении взрывных работ.

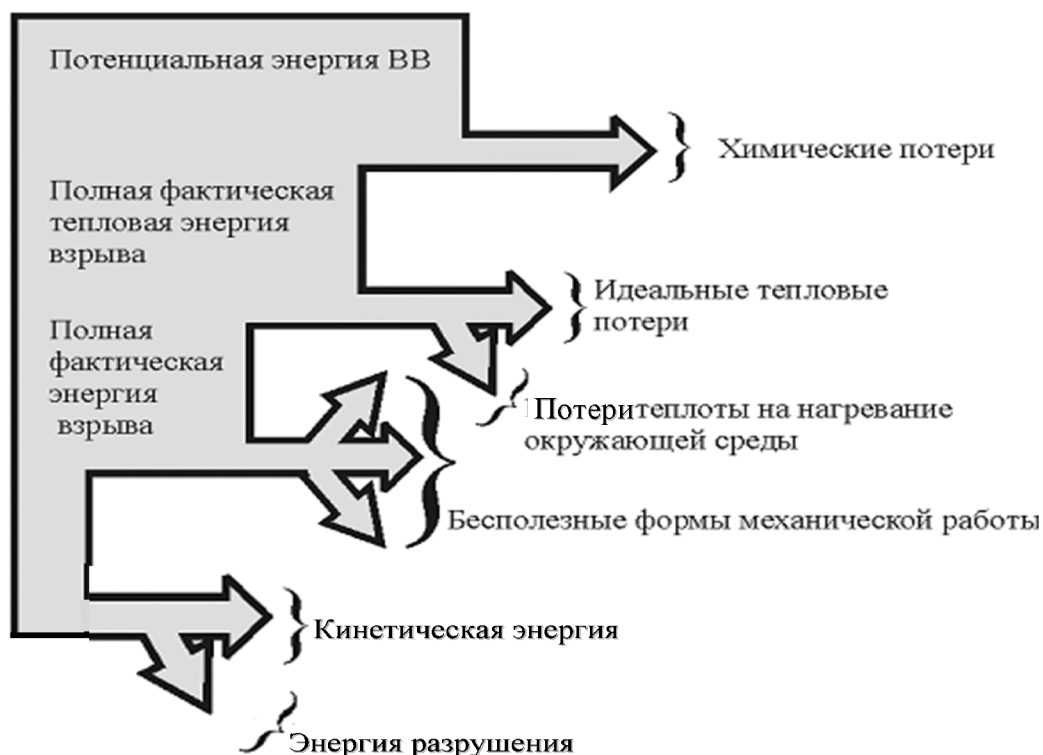
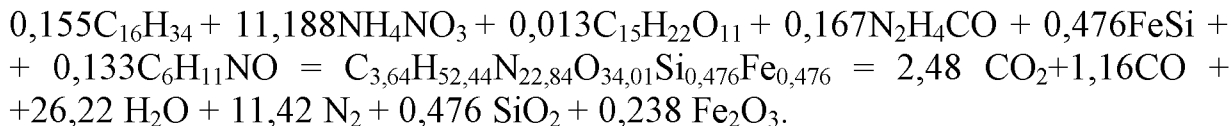


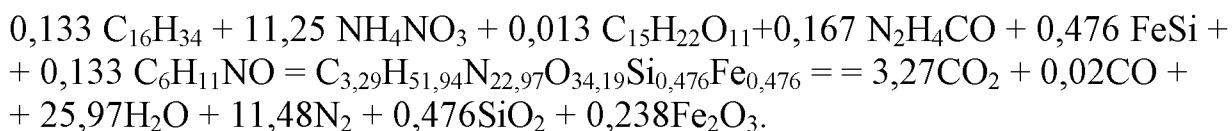
Рис. 1. Схема баланса энергии при взрыве

Ниже приведем реакции баланса исследуемых составов.

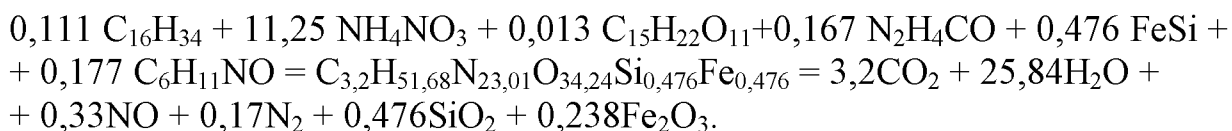
Состав 1:



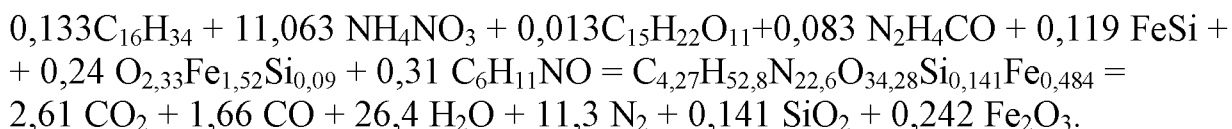
Состав 2:



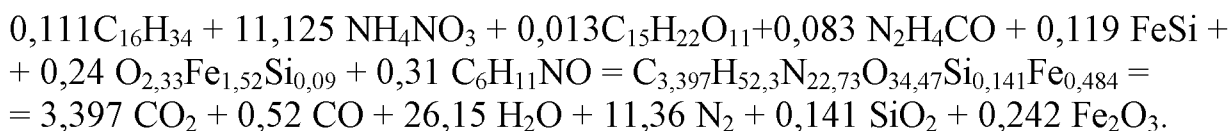
Состав 3:



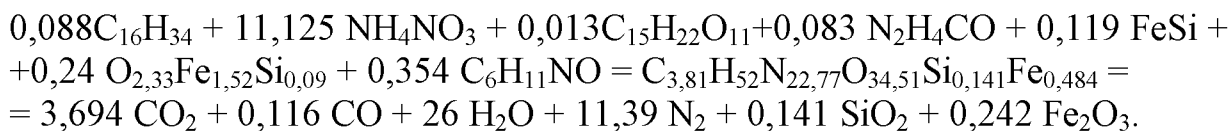
Состав 4:



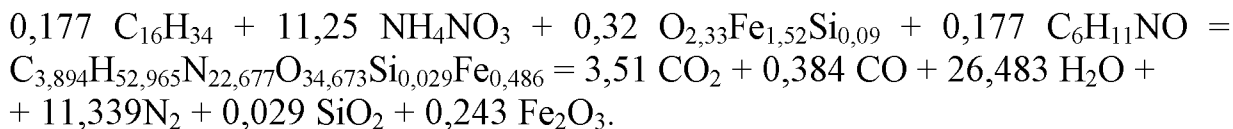
Состав 5:



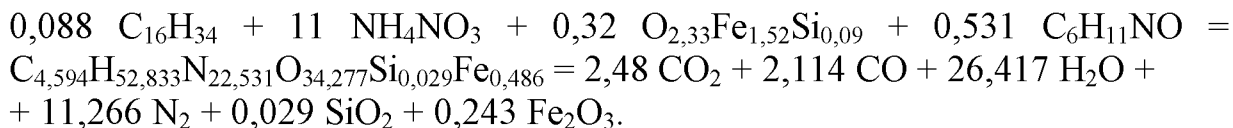
Состав 6:



Состав 7:



Состав 8:



Долю энергии взрыва, приходящуюся на полезные формы механической работы, называют КПД взрыва.

Полный КПД определяется по формуле

$$КПД = КПД_{ТД} + КПД_{М}, \quad (1)$$

где  $КПД_{ТД}$  – термодинамический КПД;  $КПД_{М}$  – механический КПД.

Комполайт – это бестротиловое многокомпонентное ВВ, состоящее из аммиачной селитры, дизельного топлива, ферросилиция (ФС), ваты кордного волокна, железорудного концентрата (ЖРК), карбамида и муки.

Для нахождения термодинамического КПД были определены такие характеристики взрыва, как общее количество газов, образовавшихся при взрыве ( $V_{общ}$ ), теплота взрыва ( $Q_v$ ), давление ( $P$ ), температура ( $T$ ) и полная энергия взрыва ( $A_{п}$ ) (табл. 1).

Таблица 1. Термодинамические характеристики составов комполайтов

Составы комполайтов	$V_{общ}$ , л/кг	$Q_v$ , кДж/кг	$T$ , °С	$P$ , Па	$A_{п}$ , кДж/кг	$КПД_{ТД}$
Состав 1	940,7	3865	2635	$3,89 \cdot 10^9$	2890	0,748
Состав 2	928,6	3973	2697	$3,74 \cdot 10^9$	2966	0,746
Состав 3	677,6	5031	3594	$1,8 \cdot 10^9$	3628	0,721
Состав 4	949	3629	2509	$2,92 \cdot 10^9$	2679	0,738
Состав 5	937	3737	2571	$2,84 \cdot 10^9$	2755	0,737
Состав 6	931	3768	2592	$2,8 \cdot 10^9$	2776	0,737
Состав 7	941	3693	2539	$3,7 \cdot 10^9$	2776	0,747
Состав 8	953,1	3482	2435	$2,3 \cdot 10^9$	2558	0,729

Приведенные данные говорят о том, что термодинамический КПД находится в пределах 72,1–74,8 %, то есть изменяется незначительно, несмотря на значительные колебания рецептурного состава ВВ. Поэтому он не может использоваться как критерий оценки влияния рецептурного состава ВВ на его энергетические характеристики.

Рассмотрим влияние компонентов ВВ на механический КПД взрыва. Механическая энергия зависит от энергии разрушения массива и кинетической энергии продуктов разрушения и определяется по выражению

$$E_{\text{мех}} = \frac{\sigma^2}{2E} \sum_{i=1}^n \left( \lg \frac{D_{\text{ср}}}{d_i} \right) \cdot \omega_i + \frac{\rho \ln k}{2} C_0^2, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – предел прочности горной породы на одноосное сжатие;  $E$  – модуль упругости горной породы;  $D_{\text{ср}}$  – средний диаметр кусков горной массы после разрушения;  $d_i$  – размер кусков  $i$ -ой фракции;  $\omega_i$  – массовая доля кусков  $i$ -ой фракции;  $\rho$  – плотность горной породы;  $k$  – коэффициент разрыхления взорванной горной массы;  $C_0$  – средняя начальная скорость разлета кусков горной породы.

По данным экспериментальных исследований [4] установлена зависимость теплоты взрыва при постоянном объеме от начальной скорости разлета кусков разрушенной породы. Эта зависимость для различных типов ВВ, представленная на рис. 2, оказалась близкой к линейной  $Q_v = 0,3C_0$ .

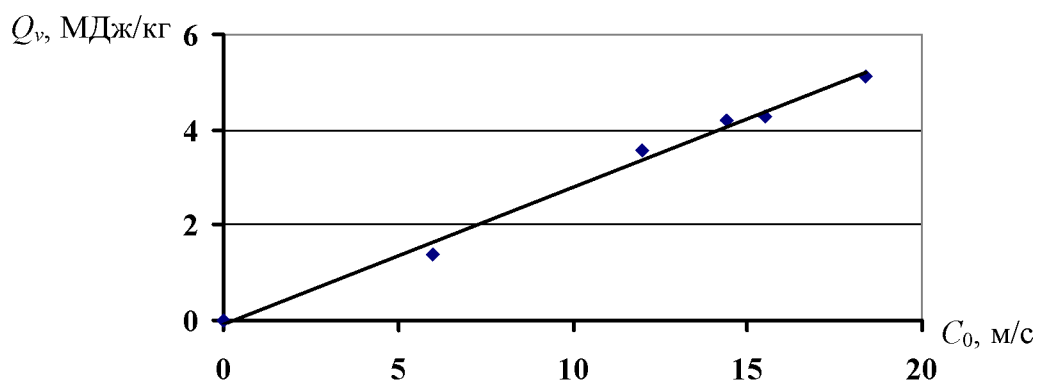


Рис. 2. Связь теплоты взрыва при постоянном объеме с начальной скоростью разлета кусков разрушенной породы

Разрушающая способность зарядов комполайтов массой 400 г различных составов исследовалась на бетонных блоках  $0,2 \times 0,3 \times 0,6$  м. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты разрушения бетонного блока зарядами комполайтов различного состава

Комполайт	$d < 1$ см, %	$1 < d < 6$ см, %	$6 < d < 12$ см, %	$d > 12$ см, %	$D_{\text{ср}}$ , м
Состав 1	10,3	18,7	16,4	55	0,1
Состав 2	12,4	29	24	35	0,08
Состав 3	22	6,8	17,2	54	0,09
Состав 4	12,3	16,2	15,2	56	0,1
Состав 5	13	21,5	14,6	51	0,09
Состав 6	0,2	0,83	3,3	96	0,13
Состав 7	7,9	11,3	16	65	0,11
Состав 8	0,17	1,33	3,3	95	0,13

Влияние компонентного состава композитов на энергетические показатели взрыва, механическая энергия ( $E_{\text{мех}}$ ) и механический КПД взрыва ( $\text{КПД}_{\text{мех}}$ ) представлены в табл. 3.

Таблица 3. Влияние компонентного состава композитов на энергетические показатели взрыва

Составы композитов	Состав 1	Состав 2	Состав 3	Состав 4	Состав 5	Состав 6	Состав 7	Состав 8
$E_{\text{разруш}}$ , кДж/м <sup>3</sup>	1889,3	2269,2	2124,4	1908,1	2057,2	975,2	1616,6	984,6
$E_{\text{кинет}}$ , кДж/м <sup>3</sup>	16,9	15	28,1	15,2	15	21,9	17,3	18,7
$E_{\text{мех}}$ , кДж/м <sup>3</sup>	1906,2	2284,2	2152,5	1923,3	2072,2	997,1	1633,9	1003,3
$\text{КПД}_{\text{мех}}$	0,044	0,052	0,039	0,048	0,05	0,024	0,04	0,026

Как следует из расчетов, влияние компонентного состава ВВ на механический КПД намного сильнее, чем на термодинамический. Таким образом, в качестве энергетического критерия при оптимизации состава ВВ принят механический КПД (см. табл. 3).

По результатам исследований были построены зависимости влияния компонентов ВВ типа композит на термодинамический и механический КПД (рис. 3).

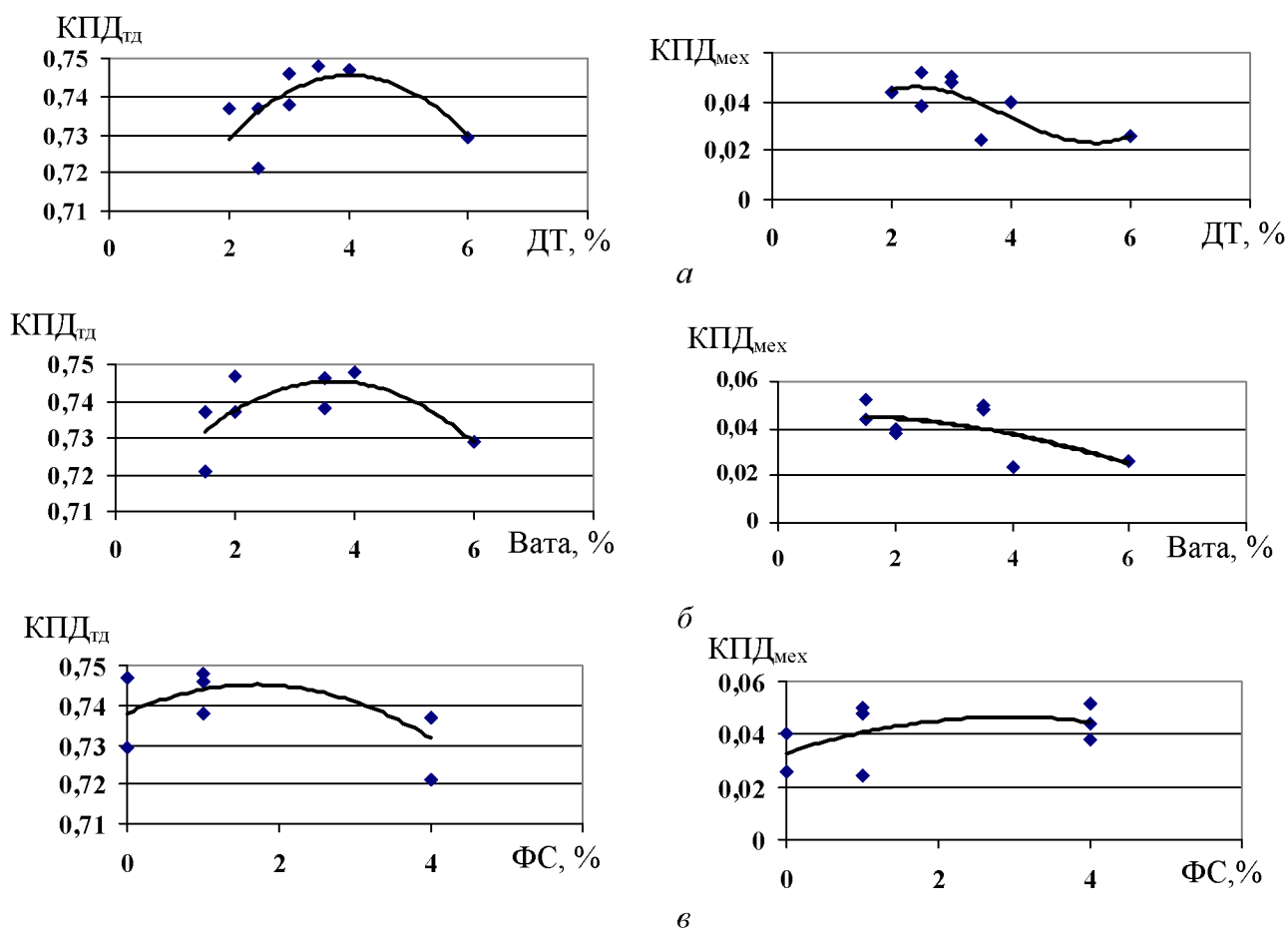


Рис. 3. Влияние компонентов ВВ типа композит на термодинамический и механический КПД: а – дизельное топливо; б – вата кордного волокна; в – ферросилиций

Зависимости, приведенные на рис. 3, свидетельствуют о наличии локальных оптимумов по выбранному критерию оптимизации.

Наличие локальных оптимумов влияния каждого компонента на механический КПД предполагает существование общего глобального оптимума, который в силу принципа эмерджентности не совпадает с локальными оптимумами. Для этого необходимо провести исследование совместного влияния всех компонентов состава ВВ на экстремальное значение КПД.

### **Выводы**

1. В качестве критерия оптимизации при подборе состава ВВ целесообразно использовать механический КПД взрыва, который обладает значительно большей чувствительностью по сравнению с термодинамическим КПД и другими энергетическими показателями.

2. Установлена линейная зависимость теплоты взрыва при постоянном объеме от начальной скорости разлета кусков разрушенной породы.

3. Установлены локальные оптимумы при изменении составов ВВ по выбранному критерию оптимизации.

4. Предполагается наличие глобального оптимума при одновременном изменении всех компонентов, которые не совпадают с локальными оптимумами и требуют системного подхода с установлением не только критерия оптимальности, но и ряда ограничений.

1. *Калякин С. А.* Повышение эффективности взрыва ВВ в горной породе / С. А. Калякин, В. И. Гришняков // Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений. – Вып. № 13 / Материалы междунар. научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Донецк: Норд-Пресс, 2007. – С. 175–177.

2. *Калякин С. А.* Энергетический подход к определению параметров взрывных работ / Калякин С. А. // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна». – № 7 (135), 2008. – С. 43–48.

3. *Филипенко Л. Г.* К вопросу о вычислении КПД взрыва / Филипенко Л. Г. // Физика горения и взрыва. – Новосибирск: Наука. – Т. 6. – № 2. – С. 259–261.

4. *Мосинец В. Н.* Энергетические и корреляционные связи процесса разрушения пород взрывом / Мосинец В. Н. – Фрунзе, 1963. – 233 с.