

## DEVELOPMENT OF A MODEL FOR ASSESSING THE IMPACT OF AN EXPLOSION ON BUILDINGS AND FACILITIES WHEN USING BLAST WALLS

**Zdravka Mollova**

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: mollova.zdravka@gmail.com

**ABSTRACT.** This article presents the results of the first stage of developing a model for assessing the impact of the explosion on buildings and facilities of critical infrastructure using different blast walls. The main advantage of the new model developed is that it allows efficient and accurate analysis and comparison of all possible design options to select the optimal design solution that minimises the risks to the safety of personnel in buildings and structures from the threat of explosion.

**Key words:** explosion, explosives, blast wave, blast walls

### РАЗРАБОТКА НА МОДЕЛ ЗА ОЦЕНКА НА ВЪЗДЕЙСТВИЕТО НА ВЗРИВА ВЪРХУ СГРАДИ И СЪОРЪЖЕНИЯ ПРИ ИЗПОЛЗВАНЕТО НА ВЗРИВОЗАЩИТНИ СТЕНИ

**Zdravka Mollova**

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

**РЕЗЮМЕ.** В настоящата статия са представени резултатите от първия етап от разработване на модел за оценка на въздействието на взрива върху сгради и съоръжения от критичната инфраструктура при използването на различни взривозащитни стени. Основното предимство на разработения нов модел е, че той позволява ефективно и точно анализиране и сравняване на всички възможни варианти за проектиране, за да се избере оптималното проектно решение, което минимизира рисковете за безопасността на персонала в сградите и конструкциите от заплахата от взрив.

**Ключови думи:** взрив, взривни вещества, ударна вълна, взривозащитни стени

### Въведение

В опит да минимизират въздействието на взрива върху сгради и конструкции на охраняеми съоръжения, проектантите се опитват да увеличат максимално разстоянието между защитения обект и вероятния източник на взрив. Ако не е възможно да се осигури достатъчно разстояние, за да се поддържа желаното ниво на защита, е необходимо да се укрепят конструкциите и/или да се изградят допълнителни стени около конструкцията, за да се намали потенциалното въздействие на взрива (Митков, 2010). Конструкторите трябва внимателно да анализират и изберат най-ефективната комбинация от взривозащитни стени и средства за укрепване, за намаляване на риска и за безопасност на персонала в случай на срутване на сграда при несанкциониран взрив (Shishkov and Stoycheva, 2019; Митков, 2020).

В тази връзка бяха проведени редица изследвания с цел прогнозиране на въздействието на взрива върху обекти и анализ и количествена оценка на ефективността на взривозащитните стени за защита на сгради и конструкции при взрив на ВВ (Митков, 2009)

В момента има няколко метода за прогнозиране на въздействието на взрива върху обекти, използващи емпирични и числени методи.

Въпреки значителния принос на тези модели за изследване и моделиране на взрива, те не могат ефективно да прогнозират всички възможни варианти за проектиране на взривозащитни стени и строителни материали. Причината е значителното изчислително време и усилия, изисквани от числените модели за оценка на взрива, в което се включват:

- анализ на всяка възможна комбинация от типа: взривозащитна стена - строителен материал - местоположение на съоръжението;
- количествено определяне на ефективността на възможните видове взривозащитни стени, включително бетон, стомана, пясък, изпълнени с вода и дървени стени, за намаляване на отразеното налягане и импулсното натоварване върху обектите;
- визуализиране на предполагаемите области на повреди на обект въз основа на масата на взривеното ВВ, вида на взривозащитната стена и комбинациите от строителни материали. (Митков, 2007; Ivanov and Shishkov, 2020).

За да се преодолеят горните недостатъци, тази статия представя разработването на иновативен модел, който може ефективно да определи количествено и да визуализира въздействието на взрива върху обекти зад взривозащитни стени от различни материали. Така се подпомагат проектантите в тяхната критична задача за

определяне на най-ефективната структура и армировка на взривозащитната стена, както и при укрепване на сгради и съоръжения.

### Разработване на модел за анализ на ефектите от взрива

Разработеният модел е комбинация от пет основни етапа. В настоящата статия е представен първият етап, а именно етапът за анализ на взривозащитната стена, на който се разработват нови аналитични формули и набор от фактори за ефективност, за да се определи количествено пригодността на крехки взривозащитни стени, включително запълнени с пясък, напълнени с вода и дървени стени, за намаляване на отразеното налягане и импулсно натоварване върху сгради и конструкции.

Взривозащитната стена е физическа бариера, която разделя критичните обекти от заплахата при взривяване на ВВ. Взривозащитните стени функционират, като отразяват част от енергията на взрива, което дава възможност за намаляване на отразеното налягане и импулсното натоварване върху обекта. Това намаляване на взривното въздействие при наличие на твърди стени може да бъде оценено количествено, като се използват уравнения (1) и (2) за отразеното налягане и импулс, въз основа на аналитични формули, тествани в (Zhou and Hao, 2008).

$$K_{P_{max,ТВ}} = -0.1359 + \left[ 0.3272 + 0.1995 \log\left(\frac{H}{S}\right) \right] \log\frac{S}{\left(\frac{E}{P_0}\right)^{\frac{1}{3}}} - 0.5626 \log\left(\frac{H}{S}\right) + 0.4666 \left(\frac{L}{S}\right) \quad (1)$$

$$K_{I_{max,ТВ}} = 0.0274 + \left[ 0.4146 + 0.2393 \log\left(\frac{H}{S}\right) \right] \log\frac{S}{\left(\frac{E}{P_0}\right)^{\frac{1}{3}}} - 0.5044 \log\left(\frac{H}{S}\right) + 0.2538 \left(\frac{L}{S}\right) \quad (2)$$

където

$K_{P_{max,ТВ}}$  - коефициентът на корекция за максимално отразеното налягане за твърди стени;

$H$  – височината на взривозащитната стена, m;

$S$  – разстоянието между мястото на взрива и обекта, m;

$E$  – ефективна енергия на ВВ, J;

$P_0$  – атмосферно налягане, Pa;

$L$  – разстоянието на мястото на взрива до взривозащитната стена, m;

$K_{I_{max,ТВ}}$  – корекционният коефициент за максимално отразения импулс за плътни стени.

Тези уравнения обаче са ограничени до твърди стени и трябва да бъдат разширени, за да се разгледат възможните видове крехки стени като запълнени с пясък, пълни с вода и дървени стени, които са намерени в референции (Rose, T. A., et al. 1995), за да осигурят по-голямо намаляване на взривното натоварване върху обектите.

За да се премахне гореспоменатото ограничение на уравнения (1) и (2), бяха разработени аналитични формули за количествена оценка на ефективността на възможните видове крехки взривозащитни стени при намаляване на

отразеното налягане и импулсно натоварване върху обектите, както е показано в уравнения (3) и (4).

$$K_{P_{max,кр}} = K_{P_{max,ТВ}} \cdot EF_P, \quad (3)$$

$$K_{I_{max,кр}} = K_{I_{max,ТВ}} \cdot EF_I, \quad (4)$$

където

$K_{P_{max,кр}}$  – коефициент на корекция за максимално отразеното налягане за чупливи /крехки/ стени;

$EF_P$  – показател за ефективността на крехките стени при намаляване на налягането;

$K_{I_{max,кр}}$  – корекционен коефициент за максимално отразения импулс за крехките стени;

$EF_I$  – индикатор за ефективността на крехките стени при намаляване на импулса.

Тези уравнения използват разработен набор от коефициенти на ефективност, за да отчетат широк спектър от крехки типове стени, включително различни дебелини на корк; ледени стени; полистирол; полиетиленови листове; различни дебелини на пясъчни контейнери; стени от водни торби и контейнери, пълни с вода (Невская, 2018). Въз основа на експерименталните данни, представени в (Zhou and Hao, 2008), е съставена таблица на показателите за ефективност на различни материали за стени в зависимост от дебелината на самия материал (Табл. 1).

Таблица 1. Показатели на ефективност на взривозащитни стени

Материал на стената	Дебелина (m)	Показател за ефективност $EF_P$	Показател за ефективност $EF_I$	Анализ на показателите на ефективност	
Дебела трупна дървесина	0,08	0,70	1,06	++	-
Тънка трупна дървесина	0,02	1,33	1,33	-	-
Дебела ледена стена	0,60	0,80	0,86	++	+
Тънка ледена стена	0,30	0,97	0,93	+/-	+
Пенополистирол	0,05	0,78	1,01	++	-
Полиетиленов лист	<0,01	1,26	1,29	-	-
Дебела пясъчна стена	1,50	0,74	0,64	++	+
Средна пясъчна стена	1,00	0,82	0,71	+/-	+
Тънка пясъчна стена	0,50	0,86	0,78	+/-	+
Стомана, стандарт Ст3	0,20	1,00	1,00	+	+
Чували, пълни с вода	0,10	0,71	0,91	++	+
Стена, напълнена с вода	0,60	0,81	0,84	+/-	+

Показателите за ефективността на крехките взривозащитни стени за намаляване на налягането и импулса измерват тяхната работоспособност при

сравнение със стандартна, твърда взривозащитна стена. Бяха изчислени набор от коефициенти на ефективност на крехките стени за 11 възможни типа крехки стени чрез анализ на експериментални данни от предишни проучвания на взривозащитни стени.

Предишни проучвания са документирали измервания на налягане и импулс при нарастващи разстояния или височини зад взривозащитни стени. (Невская, 2018). Индикаторите за ефективността на крехката стена от уравнения (3) и (4) се изчисляват на три етапа, които са предназначени:

1. за използване на наличните експериментални данни от фиксирани измервания на взрива в различни точки (n) зад взривозащитната стена;

2. за изчисляване на съотношението на стойностите на налягането и импулса за крехки и твърди стени за всяко място;

3. за изчисляване съотношението на ефективност, като осреднява всички показатели, изчислени в предишната стъпка.

Например коефициентът на ефективност при намаляване на налягането за дебела пясъчна стена се изчислява, като се използва уравнение (5), както е показано в Табл. 2.

$$EF_P = \frac{\sum_{n=1}^N \left( \frac{P_{кр,n}}{P_{ТВ,n}} \right)}{N} \quad (5)$$

$$EF_I = \frac{\sum_{n=1}^N \left( \frac{I_{кр,n}}{I_{ТВ,n}} \right)}{N} \quad (6)$$

където

n-местоположението на измереното налягане/импулс зад взривозащитната стена на различни разстояния и/или височини, m;

N е общият брой точки за измерване на налягането и импулса зад взривозащитната стена;

$P_{кр,n}$  – налягане на взривната вълна зад крехка стена в точка n (кPa);

$P_{ТВ,n}$  – налягане на взривната вълна зад твърдата преграда в точка n (кPa);

$I_{кр,n}$  – импулс зад крехка стена в точка n (кPa · ms/kg<sup>1/3</sup>);

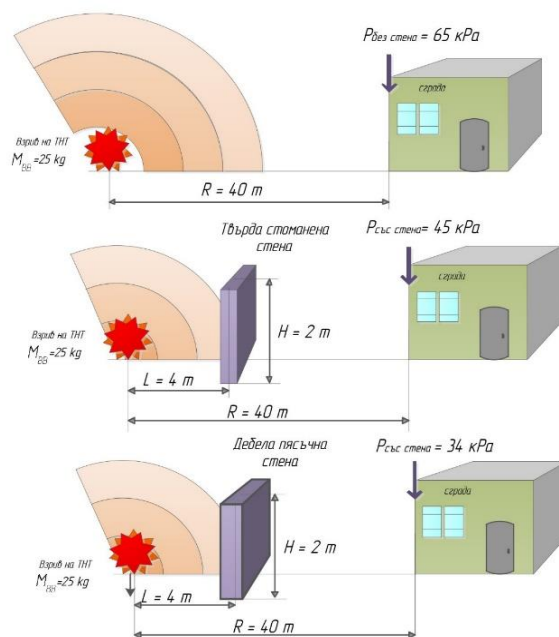
$I_{ТВ,n}$  – импулс зад твърдата преграда в точка n (кPa · ms/kg<sup>1/3</sup>).

Таблица 2. Изчисление на показателя на ефективността на дебела пясъчна стена

Точки на измерване на налягането, N	Разстояние до взривозащитната стена, S (m)	Измерено налягане, $P_{кр,n}$ (кPa) [44]	Измерено налягане, $P_{ТВ,n}$ (кPa) [43]	Пресметнатото съотношение $\left( \frac{P_{кр,n}}{P_{ТВ,n}} \right)$	Показател на ефективност $EF_P$
1	1,35	41	57	0,72	0,74
2	1,50	38	49	0,78	
3	1,65	35	46	0,76	
4	1,80	28	39	0,72	

На този етап уравнения (5) и (6) се използват за изчисляване на коефициентите на ефективност на налягане и импулс за 11 вида крехки взривозащитни стени. Стойността по-голяма от единица означава, че избраният материал ще се представи по-малко ефективно от стандартната стоманена стена, докато стойност, по-малка от единица, означава, че крехката стена ще се представи по-добре от стандартната стоманена стена, както е показано в Табл. 1.

Значимостта на тези изчислени коефициенти на ефективност може да бъде илюстрирана с опростен пример, както е показано на Фиг. 1 и Табл. 3.



Фиг. 1.- Влияние на взривозащитната стена върху нивото на отразеното налягане, възникващо на фронталната стена на сградата

- (1) няма взривозащитна стена,
- (2) твърда стоманена взривозащитна стена,
- (3) дебела пясъчна взривозащитна стена

Таблица 3. Изчисляване на показателя на ефективност на дебела пясъчна стена

Вид на стената	Показател на ефективност $EF_P$	Корекционен коефициент на максималното отразено налягане	Отразено налягане, $\Delta P_{ф2}$ (кPa)
Отсъствие на стена	-	-	65
Стоманена стена (0,2 m)	1,0	0,7	46
Пясъчна стена (1,5 m)	0,74	0,52	34

В този пример се приема, че инициирането на ВВ, намиращо се в движещо се превозно средство с маса от 25 kg тротилов еквивалент, ще се случи на разстояние 40 m от сградата. Примерът показва ефекта от използването на

2 конструкции за взривна защита: стандартна стоманена стена и дебела пясъчна стена.

Липсата на взривозащитна стена излага обекта на падащо налягане от 29 kPa и отразено налягане от 65 kPa.

Използването на твърда стоманена стена на 4 м от взрива намалява това максимално отразено налягане с 30%, което води до отразено налягане от 45 kPa, докато дебелият пясъчна стена намалява налягането с 48%, което води до налягане от 34 kPa.

Този пример показва, че използването на крехка взривозащитна стена може значително да намали максималното отразено натоварване върху обект. Това намаляване на налягането води до намаляване на щетите върху съоръжението, смъртността на персонала, имуществените щети и загубите на трети страни.

## Изводи

Основното предимство на разработения нов модел е, че той позволява ефективно и точно анализиране и сравняване на всички възможни варианти за проектиране, за да се избере оптималното проектно решение, което минимизира рисковете за безопасността на персонала в сградите и конструкциите от заплахата от взрив.

В следващ етап за количественото определяне на ефектите от взрива върху всички възможни типове стени, фокусът ще бъде върху разработването на модел за оценка на въздействието на взрива, който изчислява процентната площ на всеки обект в рамките на определени нива на щети, за да се определи общото ниво на щетите от взрива.

## Литература

Митков, В. 2010. *Безопасност при производство и употреба на експлозиви*. ИК „Св.Иван Рилски“ МГУ-София, 343 с. ISBN 978-954-353-131-8.

- Митков, В. 2020. *Взривна техника и технология*. ИК „Св. Иван Рилски“ МГУ-София, 338 с., ISBN 978-954-353-430-2.
- Митков, В. 2007. За безопасността на експлозивите за граждански цели. - *Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“ - София, 50, св. II: Добив и преработка на минерални суровини*. ИК „Св. Иван Рилски“, София, 109-114, ISSN 1312-1820.
- Митков, В., Г. Генчев. 2009. Определяне на безопасните разстояния за остъкления на сгради при взривяване на самоделни взривни устройства. - *Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“, 52, св. II: Добив и преработка на минерални суровини*. ИК „Св. Иван Рилски“, София, 157-162, ISSN 1312-1820.
- Невская, Е. 2018. *Повышение устойчивости зданий и сооружений при внешних взрывах твс на объектах нефтегазового комплекса*, Москва.
- Ivanov, N., P. Shishkov. 2020. Application of non-detonating charges for cautious blasting of concretes. *Journal of mining and geological sciences*, 63, 53-59 ISSN 2682-9525 (print) ISSN 2683-0027 (online).
- Rose, T. A., P. D. Smith, G. C. Mays. 1995. The effectiveness of walls designed for the protection of structures against airblast from high explosives. – In: *Proc. Inst. Civ. Eng., 110(1)*, 78–85.
- Shishkov P., N. Stoycheva. 2019. Application of long term stored single and double based propellants in advanced blasting methods for dimension stone extraction. – In: *Proceedings of the 22nd Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials (NTREM)*, University of Pardubice, Czech Republic, 619-629. ISBN 978-80-7560-210-7 (Print), ISBN 978-80-7560-211-4 (CD).
- Zhou, X. Q. and H. Hao. 2008. Prediction of airblast loads on structures behind a protective barrier. – In: *Int. J. Impact Eng., 35(5)*, 363–375.