

УДЛИНЕННЫЕ КУМУЛЯТИВНЫЕ ЗАРЯДЫ С МЕТАЕМОЙ СЕГМЕНТНО-ПРОФИЛЬНОЙ ОБЛИЦОВКОЙ

И.Р. Мингалеев, В.Я. Базотов, А.А. Марсов, А.А. Мокеев

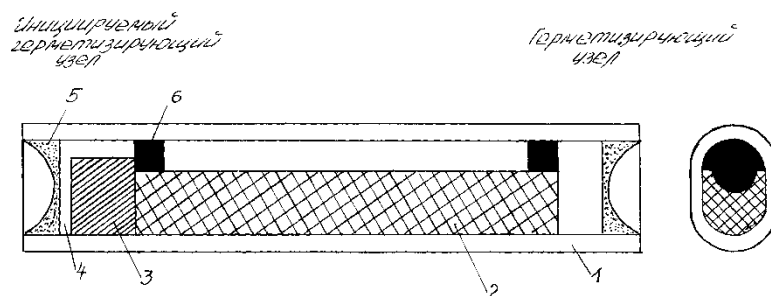
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение Высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Россия

ttxb@mail.ru, alexander_mokeev@mail.ru

Удлиненные кумулятивные заряды (УКЗ) находят применение при выполнении технологических задач, сопряженных с необходимостью разделения громоздких металлических конструкций. Примерами практического использования удлиненных кумулятивных зарядов является резка утилизируемых элементов трубопроводов, взрывная резка утилизируемых железнодорожных вагонов. Перспективно применение УКЗ в нефтедобывающей отрасли, при выполнении работ по доцементированию заколонного кондукторного пространства для изоляции кондуктора от подпочвенных вод. Такой заряд должен обеспечить отверстия (щели) с определенным сечением, через которое можно было бы закачать тампонажный цементный раствор, даже с наличием наполнителя. Сложность выполнения данной задачи связана, в первую очередь, с тем, что создавать отверстие для закачки цементного раствора необходимо в узком межтрубном пространстве между стенками обсадной колонны и трубы кондуктора, где проходное сечение составляет от 30 мм до 80 мм. Одним из возможных решений поставленной задачи является применение удлиненных кумулятивных зарядов с сегментно-профильной облицовкой. Данные заряды могли бы быть основой для разработки малогабаритного перфоратора для выполнения специфичных работ при различных ремонтно-восстановительных работах в условиях малого пространства скважин. Для создания отверстий использовать кумулятивные, пулевые и другие виды стандартных перфораторов не представляется к практическому применению, так как их невозможно использовать в ограниченных межтрубных пространствах, проходное сечение которых может составлять до 30 мм. Использование известных удлиненных кумулятивных зарядов (типа ДУЗ, ШКЗ) для данных целей является не целесообразной вследствие их основного недостатка – неустойчивости кумулятивного «ножа» от конусо-профильного заряда, действующего на преграду, особенно, в сложных скважинных условиях в присутствии жидкости под определенным давлением. В этой связи для решения поставленной задачи и повышения надежности выполнения отверстий в узком межтрубном пространстве

предлагается использовать удлиненные заряды с сегментно-профильной облицовкой. При этом с учетом ограниченных условий и необходимости выполнения щелевого отверстия с размерами по длине не менее 50 мм и шириной 5-10 мм., параметры заряда должны составлять при минимальной массе ВВ, обеспечивающей сохранность прилегающих труб (обсадная колонна и кондуктор) по длине до 100 мм, шириной 15 мм, толщина заряда не более 15 мм.

Известно, что сегментный профиль облицовки имеет отличия от конических облицовок при формировании, заключающиеся тем, что при подходе детонационной волны происходит выворачивание облицовки со сменой знака кривизны и лишь затем схлопывание в хвостовой части. При этом образуется не тонкая кумулятивная струя, а массивный ударник, масса которого составляет 80-100% массы облицовки. При дальнейшем движении поведение ударника подчиняется классической гидродинамической теории кумуляции. Исходя из этих предпосылок, была выбрана сегментно-профильная форма облицовки для формирования прорезей. Массивность ударника обеспечивает его стабильную пробивную способность, которая в меньшей степени зависит от чередования слоев преград и флуктуаций технологических параметров изготовления.



1-корпус капсулы, 2-заряд ВВ, 3-детонатор - шашка ВВ, 4 пробка из эпоксидной смолы, 5-слой герметика, 6-амортизатор (пористая резина)

Рисунок 1 – Схема заряда с сегментно-профильной облицовкой

На основании представлений о формировании «ножа» из сегментно-профильной облицовки, проведены исследования для оценки влияния на эффективность пробития удлиненного кумулятивного заряда с сегментно-профильной облицовкой, следующих факторов: величина прогиба h/d (где h – высота профиля сегмента, d – длина основания сегмента), расстояние до преграды, вес заряда. Проводилось математическое планирование эксперимента. Для данной задачи параметрами оптимизации являются глубина и ширина прорези, сформированной УКЗ в стальной преграде. Как видно из полученных результатов проведения планирования эксперимента,

все предложенные факторы вносят определенный вклад в параметр оптимизации (глубина, диаметр). Незначимым является совместное явление второго и третьего параметров. Как следует из уравнения регрессии: $Y = -1,65 + 12,1667 \cdot Z_1 + 0,1278 \cdot Z_2 + 0,2656 \cdot Z_3$, где Y – глубина пробойны; Z_1 , Z_2 , Z_3 соответствуют значениям X_1 , X_2 , X_3 в области интервала варьирования, наибольший вклад вносит прогиб облицовки, довольно значительный – фактор расстояние до преграды и несколько меньший – масса энергонасыщенного материала (толщина слоя). Из уравнения регрессии для ширины образованной пробойны $Y = -13,85 - 21,1667 \cdot Z_1 - 0,0144 \cdot Z_2 + 0,0844 \cdot Z_3$ выявлено, что прогиб и расстояние до преграды не являются значимыми, поэтому необходимо увеличить диапазон интервала варьирования. По полученным уравнениям регрессии, можно выбрать путь поиска оптимальных значений факторов, что значительно сокращает количество экспериментов. Для дальнейшего продвижения параметров в область оптимума, проведены дополнительные эксперименты, результаты которых сведены в обобщенную таблицу 1.

Предложенная гипотеза о характерных факторах влияющих на эффективность действия удлиненного метательного заряда, о том, что они подчинены тем же закономерностям, что и метательные осесимметричные заряды, требовала провести ряд дополнительных исследований.

Так, влияние прогиба h/d оценивалось в небольшом диапазоне 0,3-0,45. Выявлено, что увеличение прогиба повышает глубину пробития. Для прогиба 0,3 глубина пробития в стальной преграде, находится на уровне $1,0 D_{зар}$. Увеличение прогиба до 0,45 позволяет повысить глубину пробития до $1,5 D_{зар}$, что является существенным приростом для выполнения поставленной задачи. Наряду с увеличением глубины пробития ширина образованной пробойны (щели) снижается. Характерные значения для прогиба 0,3 находятся в пределах от $0,5 d_{обл}$ до $0,9 d_{обл}$. Для прогибов выше 0,3 характерно снижение ширины пробойны и при прогибе 0,45 она примерно равна $0,45 d_{обл}$. То есть, при увеличении прогиба заметно снижение общего размера ширины пробойны при постоянном значении других параметров.

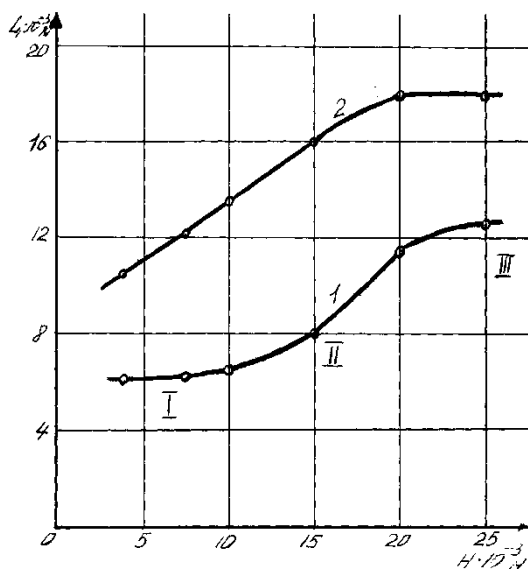
Таким образом, величина прогиба облицовки вносит существенное влияние на эффективность действия УКЗ.

При проектировании заряда перфоратора существенным фактором, требующим исследования, является расстояние до преграды, так как необходимо исследовать расстояние, на котором формируется ударник, и расстояние, на котором сформированный ударник сохраняет свою эффективность. Эти данные необходимы для разработки корпуса перфоратора и заряда и возможности оценки действия перфоратора в скважинных условиях. Поэтому при исследовании расстояния до преграды взят довольно широкий диапазон этого параметра. Минимальный параметр

исследовался с целью обеспечения минимального проходного размера корпуса перфоратора.

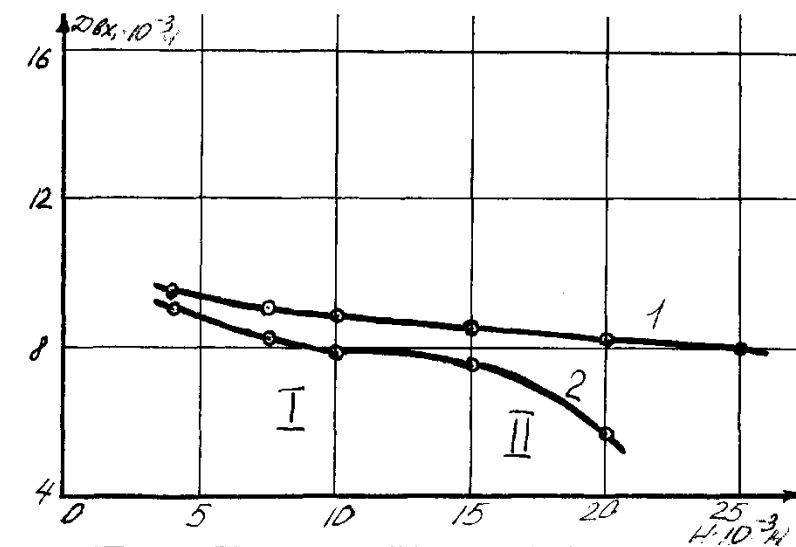
Таблица 1 - Результаты действия удлиненного кумулятивного заряда по стальной преграде

№ пп	Материал облицовки	Расстояние до преграды, Д _з	Прогиб облицовки, h/d	Толщина облицовки, мм	Масса ВВ, г	Глубина реза, мм	Ширина реза, мм
1	Алюминий	0,3	0,45	1,5	20	7,5	10,0
2		0,3	0,3	-	-	5,5	8,0
3	-	0,5	-	-	-	8,0	10,0
4	-	0,5	-	0,5	-	13,5	8,0
5	медь	0,3	-	-	-	9,5	8,0
6	-	2,0	0,45	-	-	14,0	4,7
7	-	0,5	0,45	-	-	9,3	9,5
8	-	2,0	0,3	-	-	9,7	5,0
9	-	0,5	0,3	-	-	9,5	10,1
10	-	2,0	0,45	-	12	11,7	5,4
11	-	0,5	0,45	-	-	9,0	7,7
12	-	2,0	0,3	-	-	6,5	6,5
13	-	0,5	0,3	-	-	6,8	7,0
14	-	1,3	0,45	-	20	18,0	5,7
15	-	1,0	-	-	-	16,0	7,5
16	-	0,7	-	-	-	13,5	7,8
17	-	0,5	-	-	-	12,0	8,2
18	-	0,3	-	-	-	10,5	9,0
19	-	1,7	-	1,5	-	12,5	8,0
20	алюминий	1,3	-	-	-	11,5	8,2
21	-	1,0	-	-	-	8,0	8,5
22	-	0,7	-	-	-	6,5	8,8
23	-	0,5	-	-	-	6,0	9,0
24	-	0,3	-	-	-	6,0	9,5



облицовка: 1 – из алюминия, 2 – из меди

Рисунок 4 - Зависимость глубины пробития от расстояния до преграды



облицовка: 1 – из алюминия, 2 – из меди

Рисунок 5 - Зависимость ширины прорези от расстояния до преграды

Анализируя графики зависимости расстояния до преграды на глубину пробития выявлено, что для УКЗ характерны одинаковые процессы формирования ударника с метательным элементом осевого заряда, то есть если перевести абсолютные значения расстояния относительно диаметра заряда, то формирование удлиненного ударника происходит примерно на $1,5 D_{зар}$, тогда как при метании осесимметричный элемент формируется полностью на расстоянии $3 D_{зар}$. В УКЗ с медной облицовкой характерна почти линейная зависимость глубины пробития от расстояния, и лишь на

расстоянии $2 D_{зар}$ характер кривой имеет постоянные значения. Для алюминиевых облицовок характер кривой несколько иной. Кривая имеет три участка. Первый участок $0 \div 0,6 D_{зар}$ (кривая 2, рис.4) характеризуется малым изменением глубины пробития, на втором участке $0,6 \div 1,5 D_{зар}$ происходит интенсивное увеличение глубины пробития. Третий участок характеризуется постоянством значений глубины пробития.

С изменением расстояния до преграды ширина образованной пробоины находится в обратной пропорциональности. Причем для алюминиевых облицовок кривая имеет более равномерный характер. Для медных облицовок существует довольно сильная зависимость ширины пробоины от расстояния до преграды, но общая закономерность проявляется в уменьшении ширины пробоины с увеличением расстояния до преграды. Для кривой 2 (Рис.5) можно выделить два участка. Первый участок: до $1 D_{зар}$ – кривая имеет пологий характер. Второй участок характеризуется резким снижением диаметра пробоины.

Исследование толщины слоя ЭНМ в заряде имеет практический характер и связан, прежде всего, с массой энергонасыщенного материала обеспечивающий минимальное воздействие на прилегающие к заряду конструкции.

Исследования влияния толщины слоя на эффективность действия заряда перфоратора обеспечивают заданную критическую толщину ЭНМ в нижнем пределе и создают устойчивый детонационный фронт, а в верхнем пределе – минимальное фугасное и бризантное действие на элементы конструкции скважин.

Этими исследованиями, которые оценивались визуальным наблюдением по степени детонации или воздействию на элементы макета скважины, найден диапазон, ограниченный выше перечисленными условиями, равный по массе навески от 12 до 20 г. Исследования в этом диапазоне позволили оценить влияние толщины слоя на эффективность пробития. Величина глубины, при изменении навески, возросла примерно на 20 %, при незначительном снижении ширины пробоины

В заряде ЭНМ материал метаемого взрывом тела вносит определенное влияние на эффективность действия.

На основании графика зависимости глубины пробития от расстояния до преграды (Рис. 2) наилучшим материалом, который обеспечивал максимальную глубину пробития, как и для кумулятивных зарядов, является медь. Алюминиевые облицовки уступают медным по глубине пробития, но имеют более широкий профиль пробоины.

Для качественной и количественной оценки процесса детонационного метания сегментно-профильной облицовки удлиненным кумулятивным зарядом проведены исследования методом импульсной рентгено съемки. На рисунке 1 представлена схема исследуемого заряда.

На рисунках 2,3 представлены результаты импульсной рентгено съемки процесса детонационного метания сегментно-профильной

облицовки зарядом энергонасыщенного материала плотностью $1,65 \text{ г/см}^3$. Снимки представлены в двух проекциях: вид спереди и вид сбоку. На виде спереди инициирование заряда осуществляется с левой стороны. На виде спереди заметна асимметрия формируемого «ножа», обусловленная разновременностью подхода детонационной волны к поверхности облицовки. Обработка полученных снимков показывает, что скорость головной части «ножа» составляет на данном этапе 5124 м/с , хвостовой части с левой и правой стороны соответственно 2447 и 1529 м/с . При этом структура «ножа» целостная без видимых разрывов.

На следующем этапе ($10,4 \text{ мкс}$) скорость головной части продолжает возрастать и составляет 5480 м/с , что свидетельствует о протекании интенсивных деформационных процессов в теле «ножа». При этом в левой части «ножа» наблюдается нарушение сплошности материала, которое заметно в виде фрагментированных элементов, состоящих из периферийных частей облицовки. И их скорости начинают снижаться (в левой части 2005 м/с и в правой части 534 м/с), но основная масса «ножа» сохраняет целостность структуры.

Далее ($17,0-17,8 \text{ мкс}$) наблюдается нарушение сплошности материала по всему объему «ножа». Хотя под воздействием детонационной волны периферийные слои продолжают двигаться в направлении оси симметрии и натекая на движущиеся центральные части придают им дополнительный импульс, что выражается в дальнейшем росте скорости головной части, которая составляет 6468 м/с и приобретении удлиненной формы на виде сбоку. Скорость хвостовой части продолжает уменьшаться и составляет на данном этапе 1255 м/с .

Как показывают снимки через $23,6-41,2 \text{ мкс}$ после начала детонационного метания «нож» практически полностью рассеивается. Таким образом, как показали рентгено-импульсные снимки. Действие сформированного «ножа» на преграду должно происходить в течении не более 4 мкс после начала инициирования. При этом, по снимкам можно оценить расстояния от УКЗ до преграды, которые необходимо обеспечить для формирования прорези заданных геометрических параметров. Приблизительно это расстояние должно составлять $2,0$ диаметра облицовки. Знание этих параметров важно при проектировании перфоратора на основе УКЗ.



а

б

Рисунок 2 - Процесс формирования «ножа» из сегментно-профильной облицовки по результатам импульсной рентгено съемки (а – вид спереди; б – вид сбоку)

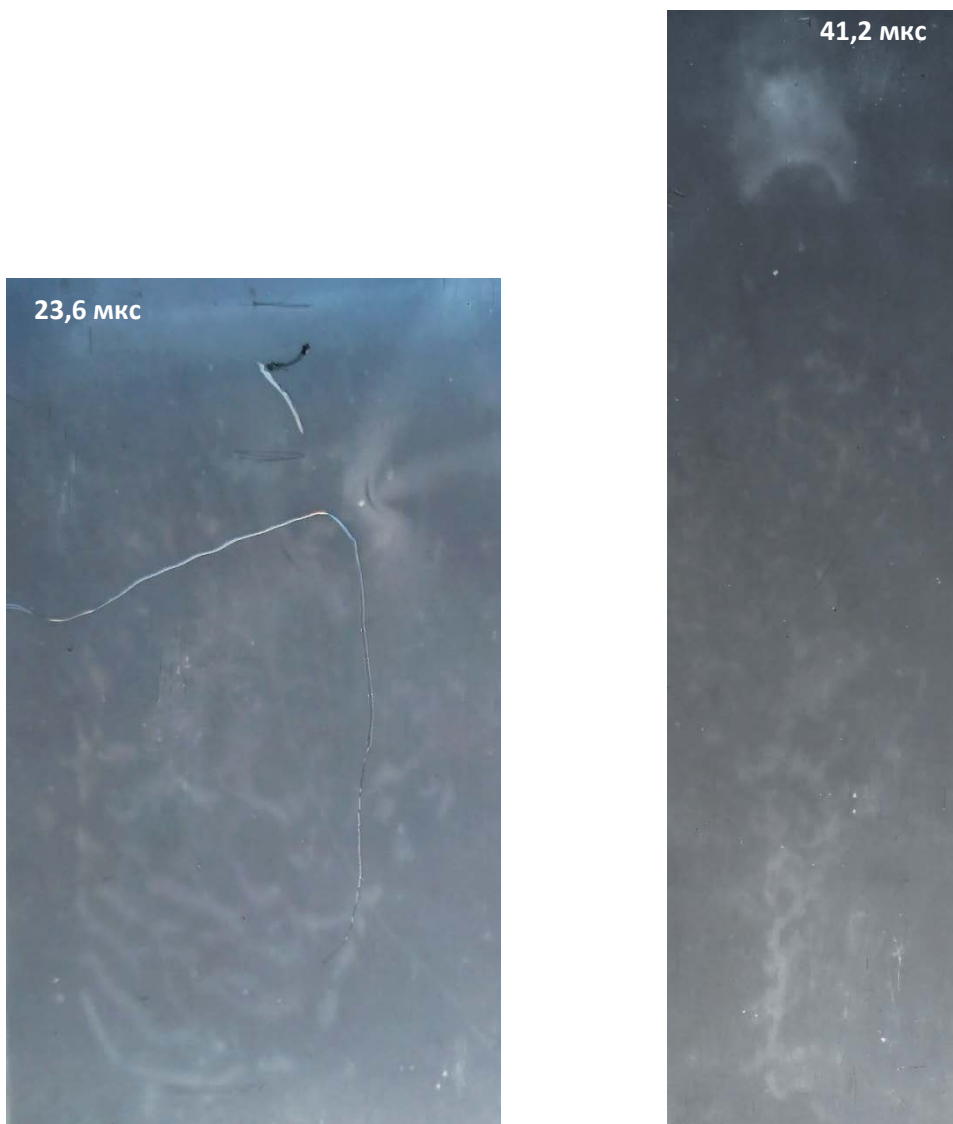


Рисунок 3 - Процесс формирования «ножа» из сегментно-профильной облицовки по результатам импульсной рентгено съемки (а – вид спереди; б – вид сбоку)

Для отработки оптимальных параметров заряда, при использовании его в составе перфоратора, необходимо также учитывать особенности его конструкции. К таким параметрам можно отнести материал корпуса заряда для среднего (до 3 МПа) и высокого давления (до 20 МПа).

Исследования различных материалов показали, что наименьшее влияние на снижение эффективности действия заряда оказывает пластмасса, несколько выше дюралюминиевые и алюминиевые капсулы, и довольно существенное влияние вносит стальной материал. Поэтому для того чтобы выполнить задачу проектирования перфоратора, оценивалась возможная толщина корпуса капсулы при различных компоновках материала. В

результате для перфораторов предложены корпуса среднего давления из дюралюминиевых трубок, толщиной 2-3 мм и корпуса высокого давления из стальных трубок толщиной 1-1,5 мм. Пластмассовый материал не может быть использован вследствие его низкой прочности при повышенных давлениях.

При оценке эффективности действия заряда в реальных условиях выявлено, что снижение эффективности действия заряда в скважине по сравнению с воздушным взрывом (на поверхности), составляет приблизительно 20 %, что должно учитываться при разработке данных зарядов.

Таким образом, по результатам проведенных исследований о влиянии предложенных факторов на эффективность действия УКЗ, можно отметить следующее: прогиб h/d оказывает определенное влияние как на глубину пробития, так и на ширину пробоины. Увеличение глубины пробития с увеличением прогиба очевидно связано с увеличением общего импульса, приходящегося на поверхность облицовки, вследствие чего образуется ударник практически с одинаковыми скоростями, но разными по массе, что предопределяет повышение эффекта. Для зависимости ширины образованной пробоины от величины прогиба, наблюдается обратная зависимость. Это связано с тем, что при увеличении прогиба облицовка испытывает большие деформационные превращения, появляется значительное радиальное истечение материала к центру, что в конечном итоге приводит к образованию ударника малой толщины.

Исследования влияния расстояния до преграды позволила установить, что для УКЗ существуют определенные интервалы расстояния до пробиваемой преграды, ближе которых значительно снижается глубина пробития. Это связано, прежде всего с наличием пространства, на котором происходит формирование ударника из облицовки. В этот период происходят различные превращения, и весь процесс формирования можно разделить на три этапа.

1. При подходе детонационной волны к облицовке происходит ее выворачивание в обратную сторону.
2. С момента, когда вершина облицовки будет находиться в одной плоскости с ее периферийными частями за счет воздействия детонационной волны, периферийные слои устремляются к центральной части. Вследствие перечисленных процессов центральная часть облицовки утолщается и движение центральных слоев замедляется. В противном случае происходит разрушение облицовки, так как имея большую скорость по отношению к периферии, возможен отрыв центральных слоев металла облицовки.
3. Облицовка за счет боковых течений продолжает свое формирование и образуется ударник клиновидной формы, который за счет деформационного течения металла стремится к уменьшению поперечного размера и удлинению в сторону движения. На определенном периоде происходит фрагментация и разрушение ударника. Именно третий этап

формирования является ответственным за ширину образующейся пробоины. Поэтому для решения тех или иных задач важен результат длительности того или иного этапа.

Практически для пробития требуемой преграды, по результатам эксперимента установлено расстояние, на котором завершаются два этапа, равное $0,5 D_{зар}$. При дальнейшем движении ударник будет уменьшать свой поперечный размер, вытягиваясь в узкий клин.

Данными исследованиями удалось установить, что на расстоянии от торца заряда $2 D_{зар}$, ударник имеет целостную структуру и способен к пробитию преграды, что подтверждено рентгено-импульсной съемкой процесса формирования. Таким образом, основываясь на механизме формирования, можно объяснить зависимость глубины пробития и ширины образованной пробоины от расстояния.

Влияние на эффективность действия толщины слоя взрывчатого вещества в предложенном диапазоне носит незначительный характер. В данном исследовании оценивалась та величина слоя, при которой образуется устойчивая детонация, ее боковая составляющая, действующая на облицовку. Поэтому и наблюдается некоторое увеличение эффекта пробития при возрастании массы ВВ. Эти данные подтверждают данные о правильности выбранного нижнего предела, обеспечивающего необходимый эффект.