

Экспериментальное исследование влияния канала малого диаметра на пробивное действие кумулятивной струи

© С.В. Федоров, А.В. Бабкин, С.В. Ладов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Проведены эксперименты по определению влияния канала малого диаметра, проходимо кумулятивной струей перед взаимодействием с преградой, на ее пробивное действие. Данные опыты проводились применительно к исследованию особенностей движения кумулятивной струи через полость удлиненного соленоида при электромагнитной стабилизации процесса растяжения струи. С этой целью перед кумулятивным зарядом размещали стальные втулки с каналом, что позволяло моделировать механические факторы, воздействующие на кумулятивную струю при ее движении в воздушном канале. Для реализованных в экспериментах условий установлено, что при отсутствии столкновений кумулятивной струи со стенками канала глубина пробития уменьшается незначительно (в пределах 5 %). В опытах, в которых на поверхности канала имелись следы контактного взаимодействия с кумулятивной струей, зафиксировано существенное снижение пробивного действия.

Ключевые слова: кумулятивный заряд, кумулятивная струя, стальная втулка, канал, электромагнитное воздействие, пробивное действие, моделирование, эксперимент

Введение. Известно, что осесимметричные кумулятивные заряды (КЗ), формирующие при взрыве высокоскоростные металлические кумулятивные струи (КС), обладают значительным пробивным действием [1–3]. Такие заряды используются как в военных целях (поражение бронетанковой техники, железобетонных укреплений и других сильно защищенных целей) [4], так и для решения технологических задач, связанных с пробитием отверстий и разрушением материалов, в строительстве, металлургии, нефтегазовой, горнодобывающей и других отраслях промышленности [5, 6].

В силу различных причин конструктивного и эксплуатационного характера при функционировании некоторых взрывных устройств с кумулятивными узлами возникает ситуация, когда сформированная КС должна пройти либо сквозь узкий канал в элементе конструкции, расположенном перед КС на пути ее движения, либо сквозь предварительно сделанную в преграде пробоину (глухую или сквозную). Подобная ситуация типична, например, для тандемных кумулятивных боеприпасов, содержащих два соосно расположенных один за другим КЗ [4, 7]. В этом случае, если первым должен срабатывать задний заряд, для обеспечения нормальной работы боеприпаса в его

конструктивную схему включают элемент в виде трубки с узким каналом, соединяющим полости облицовок заднего и переднего КЗ. По этому каналу КС заднего заряда движется к преграде. Движение струи по узкому каналу может быть реализовано в тандемном боеприпасе и после срабатывания первым переднего заряда, когда в сформированную им пробойну (каверну) попадает и движется в ней КС заднего заряда.

Очевидно, что при движении в канале малого диаметра, сравнимого с поперечным размером КС, могут проявляться факторы, способные оказать влияние на пробивную способность струи. Работы, посвященные изучению этого явления, проводились ранее сотрудниками ряда отраслевых и академических организаций (А.С. Пономарев, М.В. Сорокин, В.Ф. Минин, В.В. Мусатов, В.М. Маринин, А.В. Коновалов и др.). В отличие от их исследований, в представленной работе влияние на пробивное действие КС ее движения сквозь узкий канал рассматривается применительно к реализации нетрадиционного способа увеличения эффективной длины КС путем воздействия на нее электромагнитного поля [2, 8–10].

Идея использования такого воздействия для стабилизации растяжения металлической КС, предложенная учеными Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения РАН и МГТУ им. Н.Э. Баумана, заключается в создании в материале КС при ее деформировании в магнитном поле дополнительных электромагнитных усилий, способных замедлить развитие естественной пластической неустойчивости [11–13]. При этом воздействовать на КС магнитное поле должно во время ее прохождения через полость соленоида, располагаемого перед КЗ на пути движения струи [11]. Проведенные оценки показали, что на заметное проявление стабилизирующего эффекта можно рассчитывать при довольно высокой магнитной индукции воздействующего на КС поля (несколько десятков тесла) [12]. Создание магнитных полей такой интенсивности в больших объемах сопряжено со значительными энергозатратами, в связи с чем возникает задача минимизации диаметра соленоида, а также проблема свободного пропуска КС через узкий канал, что и является предметом исследования в настоящей статье.

Постановка эксперимента. Специфичность рассматриваемой задачи, в ходе решения которой потребовалась постановка экспериментов с изучением движения КС в воздушном канале малого диаметра, предопределила некоторые отличия реализуемых в них условий от условий ранее выполненных исследований (выбор диаметра и длины канала, удаление втулки с каналом от основания КЗ и др.). При проведении экспериментов важно было четко зафиксировать эффект влияния канала на КС с тем, чтобы впоследствии можно было отделить это влияние от эффекта воздействия на КС магнитного

поля. При ограничениях, накладываемых на достигаемый уровень магнитной индукции возможностями экспериментальной базы (в пределах 10 Тл), эти эффекты могли оказаться однопорядковыми.

К числу факторов механического влияния на КС при ее движении в узком канале относится прежде всего баллистическая ударная волна, генерируемая в воздухе головной частью КС. Очевидно, что за счет отражения от стенок канала параметры течения за фронтом этой волны могут существенно возрасти. Нельзя также исключить и возможность дополнительной «накачки» давления в канале за счет затекания в него продуктов детонации заряда взрывчатого вещества (ВВ). Наконец, если канал контактирует с поверхностью преграды, струя может подвергнуться воздействию потока микроосколков, образующихся в момент соударения ее головного элемента с преградой. Попадая внутрь канала и отражаясь от его стенок, эти осколки могут наносить боковые удары по струе и привести к ее частичному разрушению.

Необходимо отметить, что в реальных условиях в связи с невозможностью обеспечить движение КС строго вдоль оси канала воздействие на нее отмеченных факторов будет носить явно несимметричный характер. Кроме того, при достаточно малом диаметре канала боковое отклонение струи, обусловленное технологическими неточностями, может привести к ее «скользящему» столкновению со стенками канала.

Спрогнозировать, насколько существенным окажется влияние «канальных» эффектов на пробивное действие КС, довольно сложно, причем не только в количественном плане, но и в отношении того, в какую сторону оно изменится: увеличится или уменьшится. Несмотря на то что отрицательное влияние канала представляется гораздо более вероятным, при исследовании этой проблемы отмечалась возможность достижения и положительного результата. Такое предположение основывалось на представлении о «фокусирующей» роли канала. По-видимому, характер влияния канала на пробитие КС в значительной степени зависит от конкретных условий, реализуемых в экспериментах.

В проведенных экспериментах по определению пробивного действия КС, прошедшей узкий канал (рис. 1), применялся лабораторный КЗ 1 диаметром 50 мм с медной конической облицовкой с углом раствора 50° , устанавливаемый на расстоянии F от преграды. В качестве материала преграды 4 использовалась сталь. Перед КЗ соосно с ним располагалась стальная цилиндрическая втулка 3 со сквозным каналом, внешний диаметр которой равен диаметру КЗ. Предполагалось, что по сравнению с другими материалами, из которых могут изготавливаться корпуса соленоидов (текстолит, пластмасса), в стальных втулках, ввиду их более высокой прочности и жесткости, «канальные» эффекты должны проявляться в наибольшей степени.

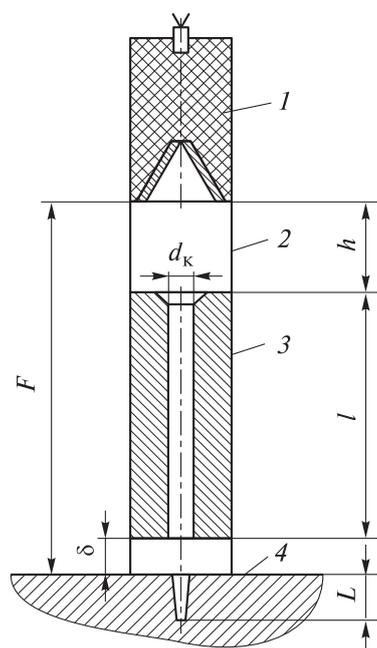


Рис. 1. Схема эксперимента с проходом КЗ через узкий канал: 1 — КЗ; 2 — бумажный тубус; 3 — стальная цилиндрическая втулка; 4 — стальная преграда

втулки на преграде без зазора воздействие, испытываемое КЗ в канале, должно возрастать (за счет исключения возможности разгрузки в нижней части канала, особенно в момент начала проникания головной части КЗ). Кроме того, введение зазора позволяло исключить попадание внутрь канала микроосколков, образующихся при соударении головной части КЗ с преградой и разлетающихся под некоторым углом от нормали к ней (в опытах с наличием зазора вокруг выходного отверстия канала на нижнем торце втулки наблюдалась кольцевая зона мелких кратеров от действия микроосколков).

Результаты экспериментальных исследований. Пробивное действие КЗ (глубина L пробития преграды) в отсутствие втулки с каналом при различном удалении F заряда от преграды характеризуется следующими данными (средние значения по пяти опытам):

F , мм	200	250	300
L , мм	240	244	236

В экспериментах с пропуском КЗ через канал было зафиксировано, что для всех исследованных диаметров канала ($d_k = 10, 15$ и 20 мм) в том случае, если КЗ не задевает за стенки канала, наблюдается незначительное уменьшение глубины пробития преграды

Диаметры d_k каналов для прохода КЗ в применявшихся втулках составляли 10, 15 и 20 мм; со стороны торца, обращенного к КЗ, канал имел небольшую коническую заходную часть. Длина l втулок в основной части опытов составляла 150 мм; было проведено также несколько опытов со втулками длиной 100 и 200 мм. Соосная установка КЗ над втулкой осуществлялась с помощью бумажного тубуса 2. При этом во всех опытах КЗ отстоял от верхнего торца втулки на расстоянии h не менее 50 мм, что с запасом обеспечивало возможность беспрепятственного схлопывания кумулятивной облицовки и нормального формирования КС.

Были проведены опыты как с установкой втулок непосредственно на преграду, так и с введением небольшого зазора δ (до 30 мм) между нижним торцом втулки и преградой.

Предполагалось, что при размещении

(в среднем примерно на 5 %). Заметного предполагаемого усугубления отрицательного влияния «канального» эффекта при размещении втулки непосредственно на преграде (без зазора) обнаружено не было. Напротив, вопреки ожиданиям, для втулки с 20-миллиметровым каналом пробитие в опытах с зазором и созданием условий для разгрузки в нижней части канала оказалось чуть меньше, чем в опытах без зазора.

Результаты экспериментов, в которых не наблюдалось контактного взаимодействия КС со стенками канала, приведены в табл. 1. Следует отметить, что при использовании втулок с каналом диаметром 10 мм пест в подавляющем большинстве случаев застревал в верхней части канала, чего не происходило при других диаметрах канала.

Таблица 1

Результаты экспериментов для случая прохода КС без взаимодействия со стенками канала при $l = 150$ мм

F , мм	d_k , мм	h , мм	δ , мм	L , мм
200	20	50	0	235
210			10	223
200	15	50	0	232
215			15	235
200	10	50	0	223
250		70	30	235

Примечание. Для каждого варианта условий приведены средние значения глубины пробития по данным пяти опытов.

Факт соударения элементов КС со стенками канала легко идентифицировался по наличию на поверхности канала протяженных омедненных борозд. Случаи, когда струя задевала стенки канала, были зафиксированы только при диаметре канала 10 мм. По результатам четырех опытов с таким исходом (табл. 2) видно, что контактное взаимодействие КС со стенкой канала приводит к существенному уменьшению проникания струи в преграду.

Таблица 2

Результаты экспериментов для случая столкновения КС со стенками канала диаметром 10 мм

Номер опыта	F , мм	h , мм	l , мм	δ , мм	L , мм
1	200	50	150	0	130
2	250	120	100	30	70
3	250	120	100	30	155
4	300	70	200	30	125

Анализ этих случаев позволяет сделать следующий вывод: вероятность столкновений возрастает не только при уменьшении диаметра канала и увеличении его длины, но и при удалении втулки от КЗ, даже если оно сопровождается соответствующим уменьшением длины l втулки. Об этом свидетельствуют результаты опыта 2 со втулкой длиной 100 мм с 10-миллиметровым каналом, отстоявшим от КЗ на расстоянии 120 мм (см. табл. 2). В этом случае вероятность задевания струей стенок канала оказалась заметно выше, чем в опыте со втулкой длиной 150 мм и тем же 10-миллиметровым каналом, но расположенной на расстоянии 50 мм от КЗ. Возможно, данный факт обусловлен недостаточной жесткостью экспериментальной сборки (бумажного тубуса), что приводит к увеличению перекоса оси КЗ относительно оси канала с возрастанием разнесения втулки и КЗ.

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- для реализованных в экспериментах условий применение соленоидов, стабилизирующих электромагнитное воздействие на КС, с диаметром канала для прохода струи менее 10 мм нецелесообразно ввиду большой вероятности столкновений КС со стенками канала, приводящих к существенному снижению пробивного действия КЗ;
- при диаметре канала более 10 мм столкновения практически исключаются и отрицательное влияние «канального» эффекта очень незначительно;
- положительного влияния канала при реализованных в экспериментах условиях не обнаружено.

Дополнительные оптические исследования. Для выяснения влияния втулки с каналом на физическую картину процессов при кумулятивном взрыве были проведены дополнительные эксперименты с использованием оптической съемки, осуществляемой высокоскоростной камерой ЖЛВ-2 [14]. Для подсветки использовали импульсную лампу-вспышку при разряде на нее конденсаторной батареи.

Полученные фоторегистрации процесса для взрыва КЗ в свободном пространстве (при отсутствии втулки), при входе и выходе из втулки с каналом приведены на рис. 2–4 (отсчет времени t для последовательности фоторегистраций на каждом рисунке свой и ведется от момента, соответствующего первому из представленных на данном рисунке кадров).

Для фиксации картины взрыва лабораторного КЗ при отсутствии втулки заряд устанавливался над стальной преградой на расстоянии 250 мм от нее с помощью трех проволочных стоек. На фоторегистрациях (см. рис. 2) хорошо видна КС, опережающая в своем движении разлет продуктов детонации ВВ, а также связанная с ее головной частью баллистическая ударная волна, которая создает постепенно

развивающуюся область свечения воздуха, движущуюся вместе с КС. Свечение, появляющееся в нижней части кадра при $t > 60$ мкс (см. рис. 2, в), связано с соударением головной части КС с преградой.

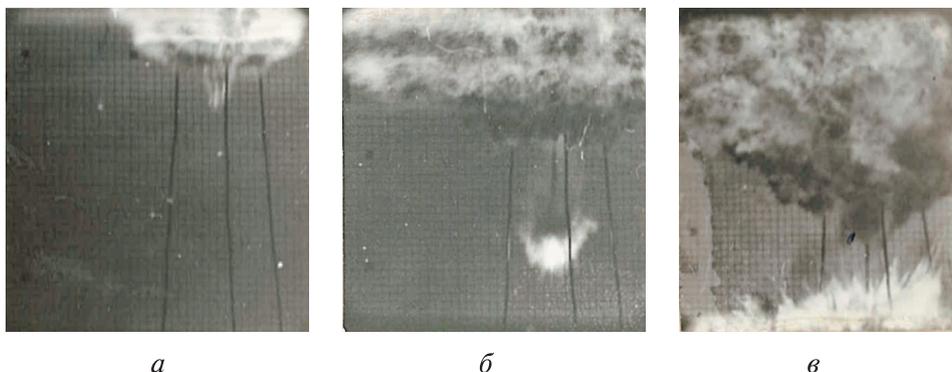


Рис. 2. Фоторегистрации взрыва лабораторного КЗ в свободном пространстве (при отсутствии втулки с каналом) в момент времени $t = 5,2$ мкс (а), 23,4 (б) и 63,7 мкс (в)

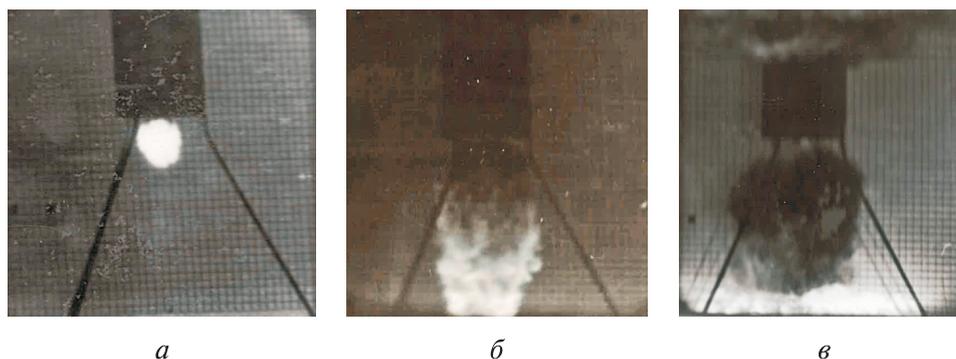


Рис. 3. Фоторегистрации взрыва лабораторного КЗ при выходе КС из втулки длиной 150 мм с диаметром канала 10 мм в момент времени $t = 5,2$ мкс (а), 23,4 (б) и 54,6 мкс (в)

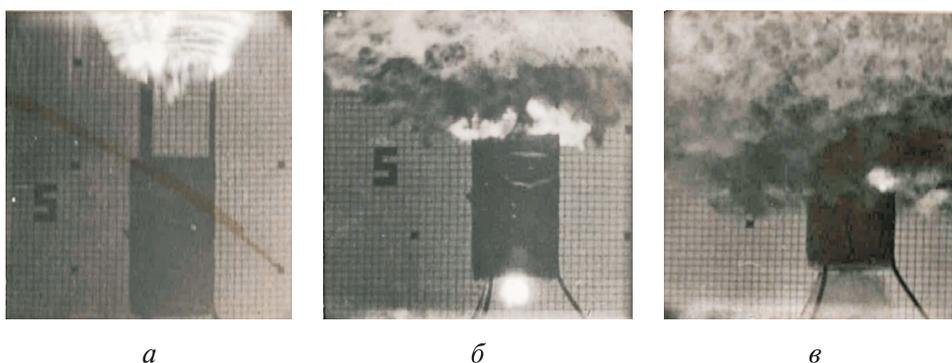


Рис. 4. Фоторегистрации взрыва лабораторного КЗ при входе КС во втулку длиной 100 мм с диаметром канала 10 мм и при выходе из нее в момент времени $t = 5,2$ мкс (а), 27,3 (б) и 61,1 мкс (в)

На рис. 3 представлен процесс выхода КС из втулки длиной 150 мм с диаметром канала 10 мм, установленной на проволочных стойках над стальной преградой на расстоянии 150 мм от нее, а на рис. 4 — процессы входа КС в канал и выхода из него для втулки длиной 100 мм также с 10-миллиметровым каналом. В обоих случаях КЗ был расположен на расстоянии 50 мм от верхнего торца втулки, однако в первом случае КЗ и втулка фиксировались с помощью бумажного тубуса, а во втором случае КЗ был установлен над втулкой на проволочных стойках.

Сравнив фоторегистрации, приведенные на рис. 3 и 4, видим, что при использовании бумажного тубуса истечение газообразных продуктов из канала, происходящее после выхода головной части КС, носит более интенсивный характер. По-видимому, это связано с «канализирующим» влиянием тубуса на течение продуктов детонации заряда ВВ, что способствует их затеканию в канал для прохода КС во втулке. Как и в случае фиксации взрыва лабораторного КЗ в свободном пространстве (см. рис. 2), светящаяся область, возникающая в нижней части кадра на рис. 3, образуется при соударении головной части КС с преградой. Свечение в этой области создается, по-видимому, воздухом, сильно сжатым и нагретым при отражении баллистической ударной волны от преграды, и раскаленной металлической плазмой, образующейся из материалов струи и преграды в результате их испарения в зоне соударения.

Заключение. По результатам проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод о том, что при движении кумулятивной струи в воздушном канале малого диаметра, имеющемся в стальной втулке, установленной перед основной преградой, пробивное действие струи практически не уменьшается при отсутствии ее столкновения со стенками канала и существенно уменьшается при наличии следов столкновения. Оценено влияние таких факторов, как диаметр канала, расстояние от торца кумулятивного заряда до входа струи в канал, длина канала и наличие зазора между втулкой с каналом и основной преградой.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Walters W.P., Zukas J.A. *Fundamentals of Shaped Charges*. New York, John Wiley and Sons, 1989, 398 p.
- [2] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. 3-е изд. Т. 2. Москва, Физматлит, 2004, 656 с.
- [3] Минин И.В., Минин О.В. *Кумулятивные заряды*. Новосибирск, СГГА, 2013, 200 с.
- [4] Селиванов В.В., ред. *Боеприпасы*. Т. 1. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 506 с.
- [5] Ладов С.В., Кобылкин И.Ф. *Использование кумулятивных зарядов во взрывных технологиях*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1995, 47 с.

- [6] Селиванов В.В., Кобылкин И.Ф., Новиков С.А. *Взрывные технологии*. 2-е изд. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 519 с.
- [7] Колпаков В.И., Ладов С.В., Федоров С.В. О возможности использования формируемых взрывом компактных поражающих элементов для пробития подводных преград. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 3. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-3-1961>
- [8] Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В. Электрическая защита перспективной боевой машины XXI века. *Оборонная техника*, 2000, № 1–2, с. 19–25.
- [9] Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В., Швецов Г.А., Матросов А.Д. О возможностях управления кумулятивным эффектом взрыва с помощью электромагнитных воздействий. *Физика горения и взрыва*, 2000, т. 36, № 6, с. 126–145.
- [10] Shvetsov G.A., Matrosov A.D., Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. Effect of external magnetic fields on shaped-charge operation. *International J. of Impact Engineering*, 2011, vol. 38, no. 6, pp. 521–526. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.10.024>
- [11] Бабкин А.В., Маринин В.М., Федоров С.В. Воздействие продольного низкочастотного магнитного поля на растягивающуюся кумулятивную струю. *Оборонная техника*, 1993, № 9, с. 40–46.
- [12] Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В. О возможности стабилизации растяжения кумулятивной струи в продольном низкочастотном магнитном поле. *Оборонная техника*, 1999, № 1–2, с. 48–55.
- [13] Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В. Особенности инерционного удлинения высокоградиентного проводящего стержня в продольном низкочастотном магнитном поле. *Инженерно-физический журнал*, 2001, т. 74, № 2, с. 79–86.
- [14] Андреев С.Г., Бойко М.М., Селиванов В.В. *Экспериментальные методы физики взрыва и удара*. Селиванов В.В., ред. Москва, Физматлит, 2013, 752 с.

Статья поступила в редакцию 16.12.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В. Экспериментальное исследование влияния канала малого диаметра на пробивное действие кумулятивной струи. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 1.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-1-2044>

Федоров Сергей Владимирович — старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 300 научных работ в области физики взрыва и высокоскоростного удара. e-mail: sergfed-64@mail.ru

Бабкин Александр Викторович — чл.-корр. РАЕН, д-р техн. наук, профессор кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 250 научных работ в области физики взрыва. e-mail: pc-os@bmstu.ru

Ладов Сергей Вячеславович — чл.-корр. РАЕН, канд. техн. наук, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 350 научных работ в области физики взрыва. e-mail: ladovsv@bmstu.ru

Experimental study of the small-diameter channel and shaped-charge jet penetration effect

© S.V. Fedorov, A.V. Babkin, S.V. Ladov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper focuses on experiments carried out to determine the effect of a small-diameter channel, passed by a shaped-charge jet before interacting with an obstacle, on its penetrating action. These experiments were conducted in relation to the study of the features of shaped-charge jet motion through the cavity of an elongated solenoid with electromagnetic stabilization of the jet stretching process. For this purpose, steel sleeves with a channel were installed in front of the shaped charge, which made it possible to simulate the mechanical factors affecting the shaped-charge jet when it moves in the air channel. For the conditions implemented in the experiments, it was found that in the absence of collisions of the shaped-charge jet with the channel walls, the penetration depth decreases insignificantly, i.e. within 5%. In experiments in which there were traces of contact interaction with the shaped-charge jet on the channel surface, a significant decrease in the penetrating action was recorded.

Keywords: *shaped charge, shaped-charge jet, steel sleeve, channel, electromagnetic action, penetrating action, modeling, experiment*

REFERENCES

- [1] Walters W.P., Zukas J.A. *Fundamentals of Shaped Charges*. New York, John Wiley and Sons, 1989, 398 p.
- [2] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva* [Physics of explosion]. 3rd ed., vol. 2. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 656 p.
- [3] Minin I.V., Minin O.V. *Kumulyativnye zaryady* [Shaped charges]. Novosibirsk, SSUGT Publ., 2013, 200 p.
- [4] Selivanov V.V., ed. *Boepripasy* [Ammunition]. Vol. 1. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 506 p.
- [5] Ladov S.V., Kobylkin I.F. *Ispolzovanie kumulyativnykh zaryadov vo vzryvnykh tekhnologiyakh* [The use of shaped charges in explosive technologies]. Moscow, BMSTU Publ., 1995, 47 p.
- [6] Selivanov V.V., Kobylkin I.F., Novikov S.A. *Vzryvnye tekhnologii* [Explosive technologies]. 2nd ed. Moscow, BMSTU Publ., 2014, 519 p.
- [7] Kolpakov V.I., Ladov S.V., Fedorov S.V. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2020, iss. 3. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-3-1961>
- [8] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. *Oboronnaya tekhnika (Defense technology)*, 2000, no. 1–2, pp. 19–25.
- [9] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V., Shvetsov G.A., Matrosov A.D. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2000, vol. 36, no. 6, pp. 126–145.
- [10] Shvetsov G.A., Matrosov A.D., Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. Effekt of external magnetic fields on shaped-charge operation. *Internation J. of Impact Engineering*, 2011, vol. 38, no. 6, pp. 521–526. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.10.024>
- [11] Babkin A.V., Marinin V.M., Fedorov S.V. *Oboronnaya tekhnika (Defense technology)*, 1993, no. 9, pp. 40–46.

- [12] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. *Oboronnaya tekhnika (Defense technology)*, 1999, no. 1–2, pp. 48–55.
- [13] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2001, vol. 74, no. 2, pp. 79–86.
- [14] Andreev S.G., Boyko M.M., Selivanov V.V. *Ekspperimentalnye metody fiziki vzryva i udara* [Experimental methods of physics of explosion and shock]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013, 752 p.

Fedorov S.V., Assist Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University; author of over 300 research papers in the field of physics of explosion and high-speed shock. e-mail: sergfed-64@mail.ru

Babkin A.V., Dr. Sc. (Eng.), Corresponding Member RANS, Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University; author of over 250 research papers in the field of physics of explosion. e-mail: pc-os@bmstu.ru

Ladov S.V., Cand. Sc. (Eng.), Corresponding Member RANS, Assoc. Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University; author of over 350 research papers in the field of physics of explosion. e-mail: ladovsv@bmstu.ru