

Научная статья

УДК 539.4

doi: 10.17223/19988621/94/10

Теоретическая оценка минимально необходимой скорости сквозного пробития разнесенной стальной преграды суперкавитирующим ударником

Виктор Владимирович Буркин¹, Александр Николаевич Ищенко²,
Антон Юрьевич Саммель³, Марат Варисович Хабибуллин⁴

^{1, 2, 3, 4} Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ v.v.burkin@mail.ru

² ichan@niipmm.tsu.ru

³ anton_sammel@mail.ru

⁴ lenmar07@rambler.ru

Аннотация. Проводится теоретическая оценка минимально необходимой скорости для сквозного пробития стальных разнесенных преград суперкавитирующим ударником из тяжелого сплава на основе вольфрама. Разнесенные преграды были эквивалентны монолитным толщиной 20, 30, 40, 50, 60 мм. Численное решение реализовано в осесимметричной постановке в рамках упруго-идеально-пластической модели Прандтля–Рейсса.

Ключевые слова: разнесенная стальная преграда, суперкавитирующий ударник, математическая модель, сквозное пробитие

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Для цитирования: Буркин В.В., Ищенко А.Н., Саммель А.Ю., Хабибуллин М.В. Теоретическая оценка минимально необходимой скорости сквозного пробития разнесенной стальной преграды суперкавитирующим ударником // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 94. С. 124–135. doi: 10.17223/19988621/94/10

Original article

Theoretical assessment of the minimum velocity required for the complete penetration of a supercavitating projectile into a spaced steel barrier

Viktor V. Burkin¹, Aleksandr N. Ishchenko²,
Anton Yu. Sammel³, Marat V. Khabibullin⁴

^{1, 2, 3, 4} Tomsk State University, Tomsk, Russia

¹ v.v.burkin@mail.ru

² ichan@niipmm.tsu.ru

³ anton_sammel@mail.ru

⁴ lenmar07@rambler.ru

Abstract. Nowadays, stationary objects exposed to dynamic loads in the form of various impacts are located not only on land but also in water. Therefore, this study is aimed to determine the minimum velocity required for the complete penetration of a supercavitating projectile made of a heavy tungsten-based alloy into underwater protective structures such as spaced steel barriers. The required velocity is calculated using a mathematical model based on the Prandtl–Reuss equations for elastic-perfectly plastic materials. Calculations are performed with barrier thicknesses of 15+5, 15+15, 20+20, 20+30, and 25+35 mm. Theoretical analysis has shown that monolithic barriers are more efficient than equivalent spaced barriers with a distance between plates of 10 mm. The obtained results indicate that an advanced study of this problem is required.

Keywords: spaced steel barrier, supercavitating projectile, mathematical model, complete penetration

Acknowledgments: This study was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority 2030).

For citation: Burkin, V.V., Ishchenko, A.N., Sammel', A.Yu., Khabibullin, M.V. (2025) Theoretical assessment of the minimum velocity required for the complete penetration of a supercavitating projectile into a spaced steel barrier. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 94. pp. 124–135. doi: 10.17223/19988621/94/10

Введение

В последнее время стационарные объекты, подверженные динамическим нагрузкам в виде различных воздействий, стали располагаться не только на суше, но и в воде. Для их защиты на воздухе от множества различных видов воздействий используются монолитные, гетерогенные, слоистые и разнесенные защитные конструкции. Исследования по различным видам взаимодействий с данными защитными конструкциями вызывают большой интерес [1–7]. В воде динамические нагрузки в виде разрушения и образования сквозных отверстий оказывают суперкавитирующие ударники [8–10], по своей форме напоминающие длинный усеченный конус. Создание защитных конструкций для стационарных объектов, расположенных в воде, способных противостоять таким ударникам, является одной из актуальных задач.

В данной работе проводится теоретическая оценка определения минимально необходимой скорости для сквозного пробития защитных конструкций в виде разнесенных стальных преград суперкавитирующим ударником из тяжелого сплава на основе вольфрама.

Результаты теоретических исследований

Данное исследование является продолжением работы [11], в которой определялась минимально необходимая скорость для сквозного пробития стальных монолитных преград толщиной 20, 30, 40, 50, 60 мм суперкавитирующим ударником из тяжелого сплава на основе вольфрама (рис. 1).



Рис. 1. Суперкавитирующий ударник
Fig. 1. Supercavitating projectile

Проведя анализ результатов, полученных в работе [11], можно заметить, что с повышением скорости и увеличением толщины стальной преграды наблюдается деформация ударника с изменением площади конуса в процессе взаимодействия. Это явление подтолкнуло к решению провести расчет высокоскоростного взаимодействия данного ударника с разнесенными преградами, эквивалентными монолитным, которые использовались в работе [11].

Толщина первой пластины разнесенной преграды равна глубине, на которой происходит деформация ударника при взаимодействии с монолитной преградой. Есть предположение, что с возникновением деформации головной части ударник в момент взаимодействия со второй пластиной начнет увеличивать площадь контакта за счет свойств материала и тем самым интенсивнее тормозиться в преграде. На рис. 2 показана разнесенная преграда, состоящая из двух стальных пластин, расстояние между которыми 10 мм.

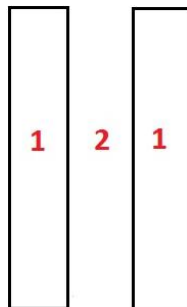


Рис. 2. Схема разнесенной преграды: 1 – пластины стальной преграды, 2 – воздух
Fig. 2. Schematic design of a spaced barrier: 1, plates of the steel barrier and 2, air

Определение минимально необходимой скорости для сквозного пробития разнесенных преград проводилось с применением математической модели. Данная модель, основой которой являются упруго-идеально-пластические соотношения Прандтля–Рейсса [12], верифицирована в работе [11] с применением испытательного стенда [13]. Для реализации численного решения применялась методика [14, 15] в осесимметричной постановке.

При взаимодействии с монолитной преградой толщиной 20 мм заметной деформации ударника не наблюдалось. Поэтому для определения минимальной скорости сквозного пробития разнесенной преграды первая пластина была выбрана толщиной 15 мм, а вторая – 5 мм. На рис. 3 показан расчет взаимодействия ударника с разнесенной преградой толщиной 15 + 5 мм при скорости 400 м/с.

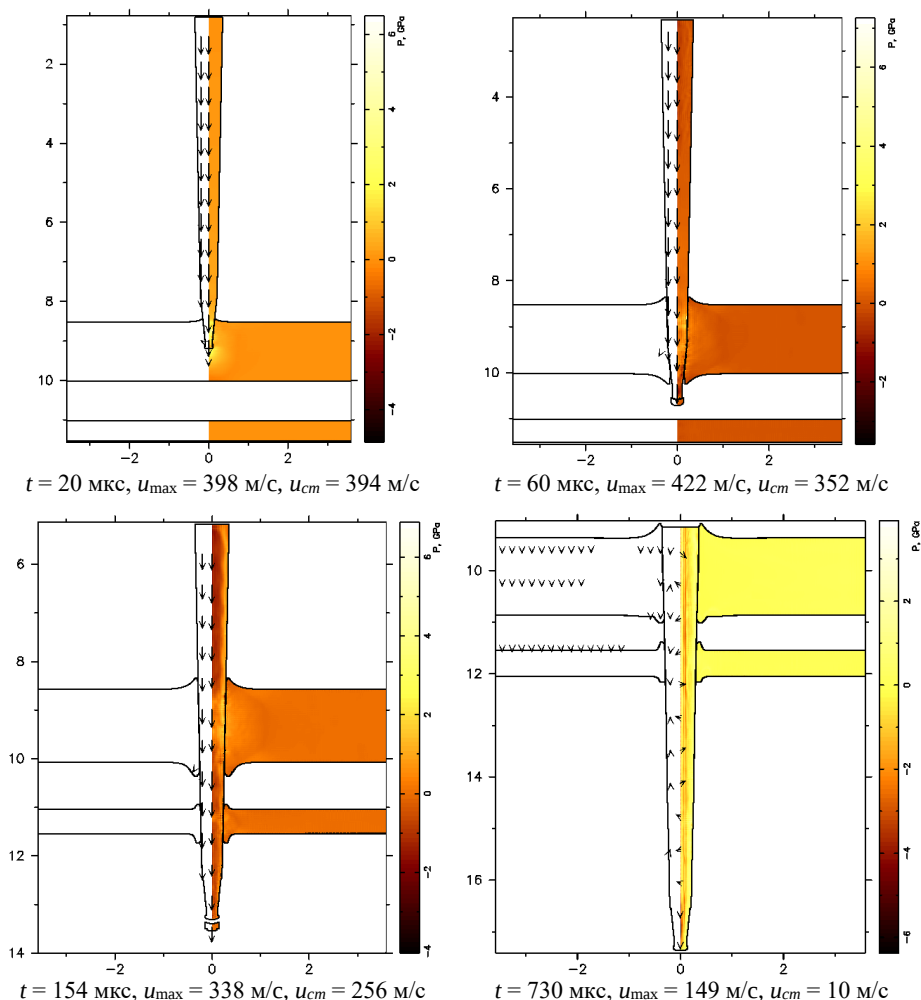


Рис. 3. Хронограмма взаимодействия ударника со стальной разнесенной преградой толщиной 15 + 5 мм при скорости 400 м/с

Fig. 3. Chronogram of the projectile interaction with a 15 + 5-mm-thick spaced steel barrier at a velocity of 400 m/s

В правой полуплоскости рисунков показано поле давления p (ГПа), в левой – поле вектора массовой скорости; t – время, $u_{\max}$ – модуль самого длинного вектора, u_{cm} – величина осевой составляющей вектора скорости центра масс ударника. Шкала дана в сантиметрах.

Ударник в процессе взаимодействия прокалывает обе пластины преграды и в итоге застревает в ней. При времени $t = 154$ мкс видно, что ударник выбивает небольшой фрагмент преграды.

Для определения минимальной скорости сквозного пробития повысим скорость до 500 м/с. Процесс взаимодействия ударника с преградой 15 + 5 мм показан на рис. 4.

Ударник при скорости 500 м/с разнесенную стальную преграду 15 + 5 мм пробивает насквозь. Скорость после пробития равна 152 м/с. Как и в предыдущем расчете, происходит выбивание фрагмента преграды и ударник незначительно деформируется. Данную скорость можно считать минимально необходимой для сквозного пробития разнесенной стальной преграды толщиной 15 + 5 мм.

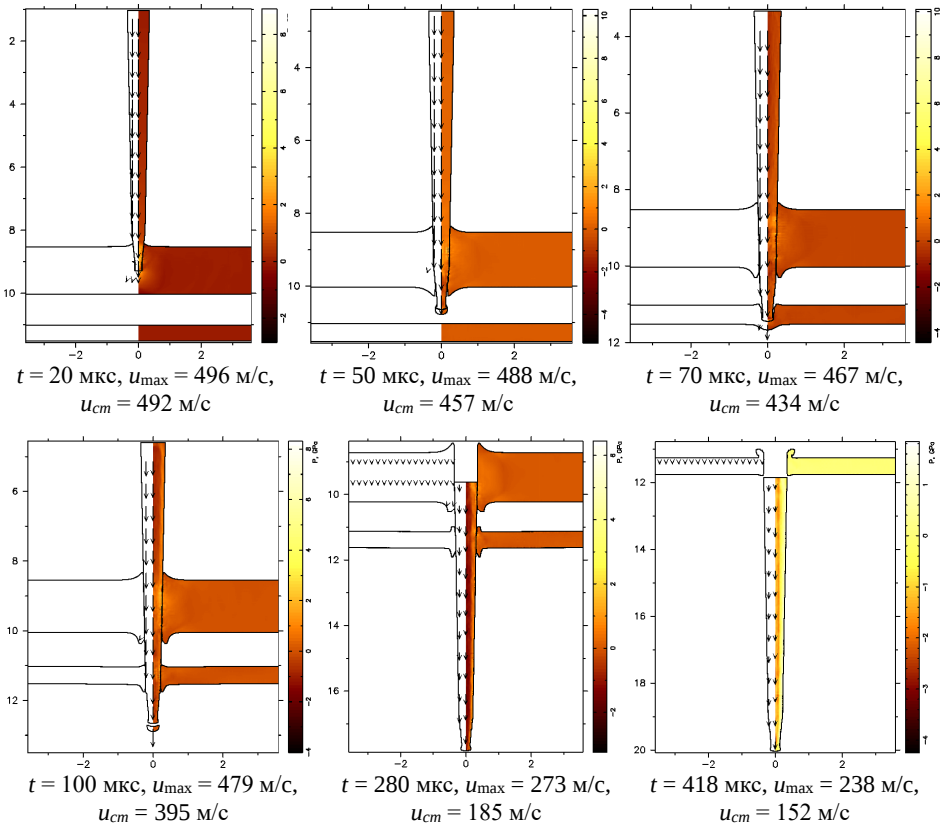


Рис. 4. Хронограмма взаимодействия ударника со стальной разнесенной преградой толщиной 15 + 5 мм при скорости 500 м/с

Fig. 4. Chronogram of the projectile interaction with a 15 + 5-mm-thick spaced steel barrier at a velocity of 500 m/s

При взаимодействии с монолитной преградой толщиной 60 мм ударник сильно деформируется на глубине 25 мм. Поэтому первая пластина разнесенной преграды была выбрана толщиной 25 мм, а вторая – 35 мм. Расчет взаимодействия ударника с разнесенной преградой 25 + 35 мм начинали с 1 300 м/с; полученные результаты представлены на рис. 5.

Разнесенную преграду при скорости 1 300 м/с ударник пробивает насквозь. В момент времени $t = 40 \text{ мкс}$ он сильно деформируется, увеличивает внутренний диаметр отверстия и создает большую выпуклость на тыльной стороне первой пластины. Та деформация, которую приобрел ударник, не способствует его сильному торможению при контакте со второй пластиной, вследствие чего он пробивает

преграду, еще больше деформируется, выбивает огромный фрагмент второй пластины и летит дальше со скоростью 507 м/с.

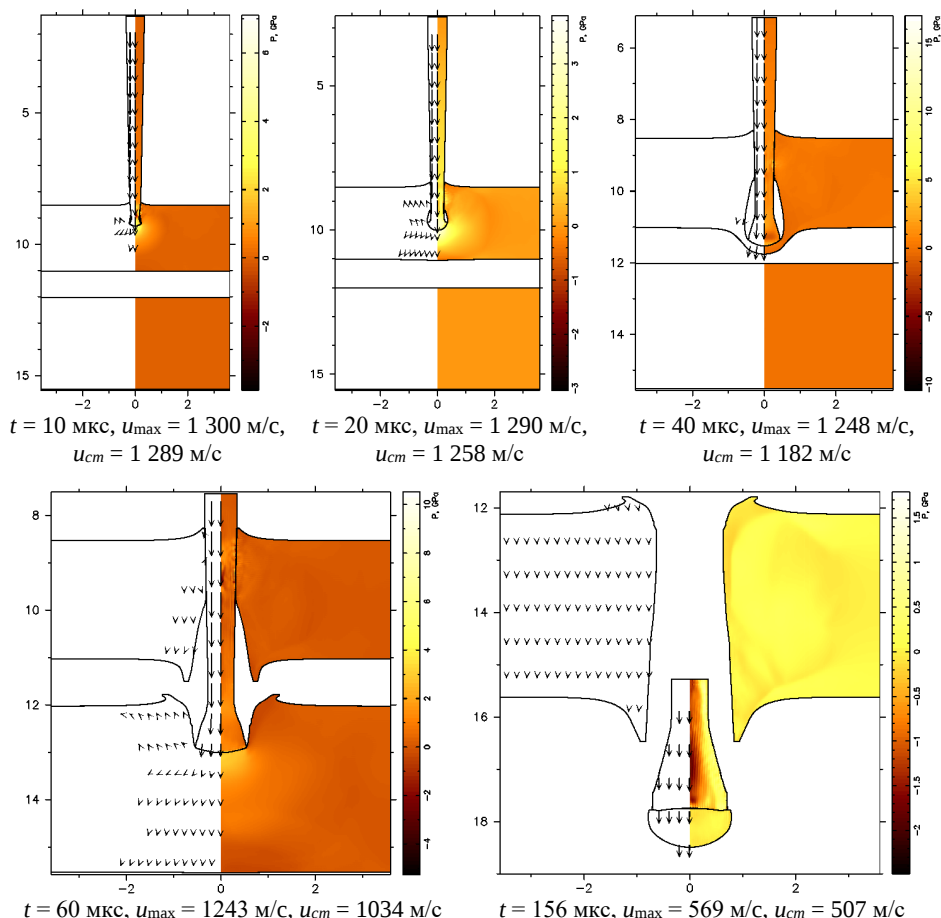


Рис. 5. Хронограмма взаимодействия ударника со стальной разнесенной преградой толщиной 25 + 35 мм при скорости 1300 м/с

Fig. 5. Chronogram of the projectile interaction with a 25 + 35-mm-thick spaced steel barrier at a velocity of 1300 m/s

Чтобы определить минимально необходимую скорость сквозного пробития разнесенной преграды 25 + 35 мм, проведена серия расчетов с шагом по скорости 100 м/с в сторону уменьшения. По результатам проведенной серии из четырех расчетов определено, что минимальная скорость, необходимая для сквозного пробития разнесенной преграды, равна 1000 м/с. Процесс взаимодействия представлен на рис. 6.

Разнесенную преграду ударник при скорости 1000 м/с пробивает насквозь. В момент времени $t = 52 \text{ мкс}$ ударник начинает деформироваться и образует большую выпуклость на тыльной стороне первой пластины. При взаимодействии со второй пластиной продолжается его деформация. Вторую пластину с выбиванием

фрагмента ударник прокалывает насквозь в момент времени $t = 198$ мкс и имеет скорость 314 м/с. Скорость взаимодействия 1 000 м/с можно считать минимально необходимой для сквозного пробития разнесенной преграды толщиной 25 + 35 мм.

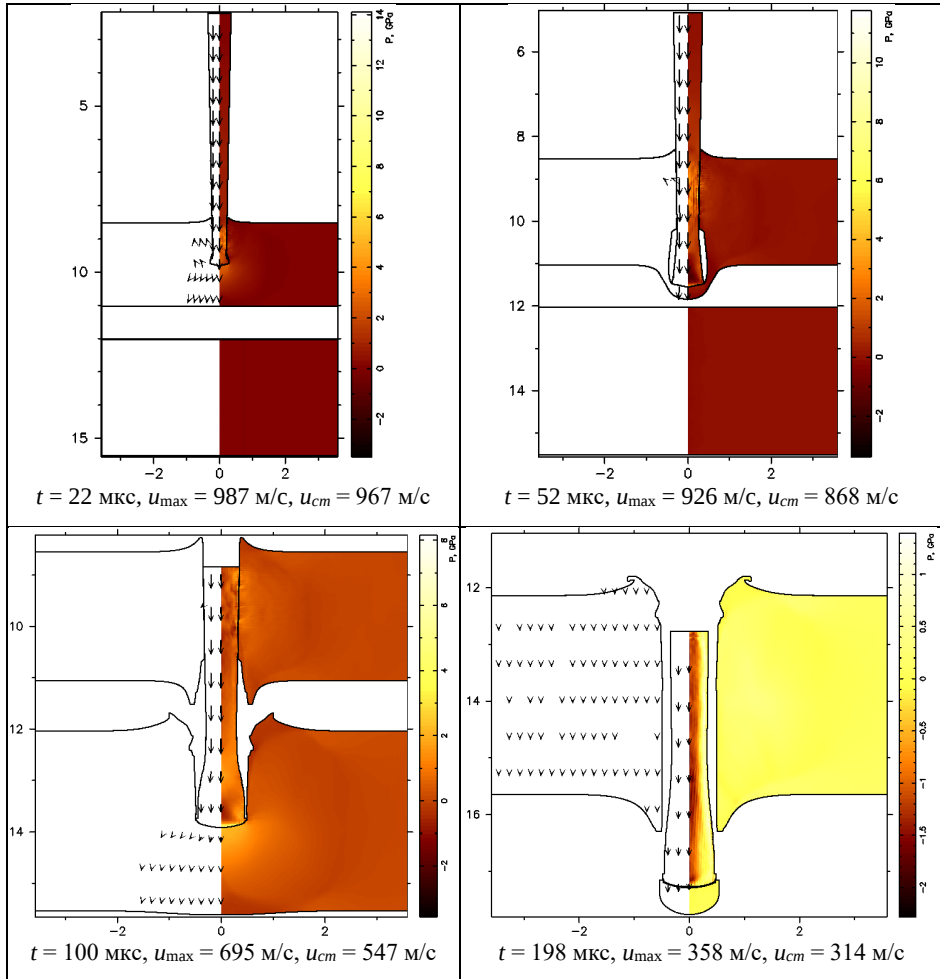


Рис. 6. Хронограмма взаимодействия ударника со стальной разнесенной преградой толщиной 25 + 35 мм при скорости 1 000 м/с

Fig. 6. Chronogram of the projectile interaction with a 25 + 35-mm-thick spaced steel barrier at a velocity of 1000 m/s

Таблица 1

Результаты расчетов разнесенных преград

Номер преграды	1	2	3	4	5
Минимальная скорость $V_{\min}$, м/с	500	600	800	900	1 000
Толщина первой пластины h_1 , мм	15	15	20	20	25
Толщина второй пластины h_2 , мм	5	15	20	30	35

В серии исследований также проводился расчет разнесенных преград толщиной 15+15 мм, 20+20 мм, 20+30 мм. В общем количестве для каждой разнесенной преграды было сделано как минимум по три расчета. Результаты проведенных расчетов с минимально необходимой скоростью представлены в табл. 1.

Данные результаты использовались для сравнения с теми, что были получены в работе [11]. Сравнение представлено в табл. 2.

Таблица 1

Сравнение разнесенных и монолитных преград

Номер преграды	1	2	3	4	5
Минимальная скорость для разнесенной (монолитной) преграды $V_{\min}$, м/с	500 (500)	600 (700)	800 (900)	900 (1 000)	1 000 (1 400)
Толщина разнесенной преграды $h_{\text{раз}}$, мм	15 + 5	15 + 15	20 + 20	20 + 30	25 + 35
Толщина монолитной преграды $h_{\text{мон}}$, мм	20	30	40	50	60

Для монолитной преграды толщиной 20 мм и эквивалентной ей разнесенной преграды толщиной 15 + 5 мм минимально необходимая скорость для сквозного пробития составляет 500 м/с. С увеличением толщины преграды минимально необходимая скорость становится меньше для разнесенной преграды по сравнению с монолитной. На рис. 7 показаны зависимости толщины монолитных и разнесенных преград от скорости.

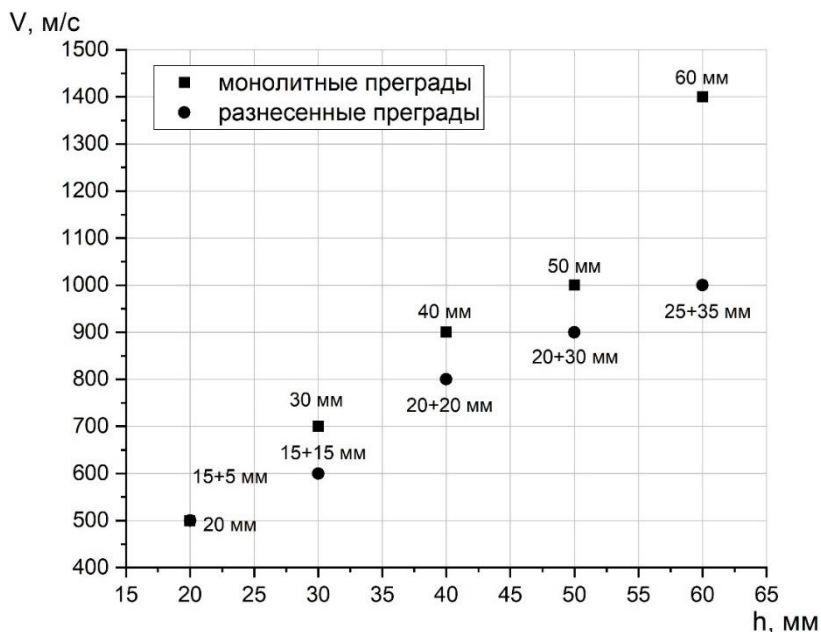


Рис. 7. Зависимости минимальной скорости сквозного пробития от толщины преград; 20...60 мм и 15 + 5 мм – толщины монолитных и разнесенных преград

Fig. 7. Minimum velocity of the complete penetration as a function of the barrier thickness. The thickness of the monolithic and spaced barriers are 20...60 mm and 15 + 5 mm, respectively

Заключение

В проведенных теоретических оценках монолитные преграды показали себя лучше, чем эквивалентные им разнесенные с расстоянием между пластинами 10 мм. Полученные сравнения говорят о том, что нужно проводить более углубленное изучение данного явления, включающее вариации расчетов с разным количеством пластин разнесенной преграды, изменением толщины пластин и расстояния между ними. Также необходимо провести эксперименты, подтверждающие расчеты.

Список источников

1. Герасимов А.В. Численное моделирование соударения длинных стержней со слоисто-разнесенными преградами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326, № 1. С. 139–145.
2. Радченко А.В., Радченко П.А. Влияние ориентации механических свойств композиционных материалов на динамическое разрушение монолитных и разнесенных преград // Вычислительная механика сплошных сред. 2011. Т. 4, № 4. С. 97–106.
3. Баничук Н.В., Иванова С.Ю., Осипенко К.Ю. Экспериментальное исследование по пробиванию хрупких слоистых преград // Проблемы прочности и пластичности. 2021. Т. 83, № 2. С. 137–150. doi: 10.32326/1814-9146-2021-83-2-137-150
4. Толкачев В.Ф., Зелепугин С.А., Козлов В.С. Механика высокоскоростного соударения стержневых ударников с комбинированными преградами // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. 2016. Т. 21, № 3. С. 1354–1357. doi: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1354-1357
5. Иванов Р.С., Зеленов А.Н., Дикий А.Е. Расчетно-экспериментальное определение внедрения проникающих с различными формами головных частей в разнесенные железобетонные преграды // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2021: материалы XI Всерос. науч. конф. с междунар. участием, Томск, 17–21 ноября 2021 г. / под ред. М.Ю. Орлова. Томск : Нац. исслед. Том. гос. ун-т, 2022. С. 44–48.
6. Акашева Е.П., Меркурьев И.Н., Хазов С.Е. Моделирование воздействия бронебойно-зажигательной пули на разнесенные преграды с учетом угла атаки // Супервычисления и математическое моделирование: труды XVII Междунар. конф., Саров, 15–19 октября 2018 г. Саров: Рос. фед. ядерный центр – Всерос. науч.-исслед. ин-т экспериментальной физики, 2019. С. 32–37. doi: 10.53403/9785951504418_32
7. Белов Н.Н., Югов Н.Т., Табаченко А.Н., Афанасьева С.А., Югов А.А., Федосов О.Ю., Архипов И.Н. Исследование особенностей деформирования и разрушения длинных стержней при наклонном соударении с конструкцией из пространственно-разнесенных преград // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2008. № 3 (20). С. 123–134.
8. Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Евтюшкин Е.В., Зыков Е.Н., Иценко А.Н., Монахов Р.Ю., Родионов А.А., Хабибуллин М.В., Югов Н.Т. Особенности высокоскоростного взаимодействия ударников с преградами, защищенными слоем воды // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 4. С. 8–15.
9. Иценко А.Н., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Рогаев К.С., Саммель А.Ю., Сидоров А.Д., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В. Взаимодействие суперкавитирующих ударников с подводными преградами // Инженерно-физический журнал. 2022. Т. 95, № 4. С. 1012–1016.
10. Афанасьева С.А., Бондарчук И.С., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Иценко А.Н., Рогаев К.С., Саммель А.Ю., Сидоров А.Д., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В. Экспериментально-теоретические исследования особенностей высокоскоростного движения в воде суперкавитирующих ударников, изготовленных из разных материалов // Инженерно-физический журнал. 2021. Т. 94, № 6. С. 1528–1537.

11. Буркин В.В., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Саммель А.Ю., Степанов Е.Ю., Хабибуллин М.В., Чупашев А.В. Экспериментально-теоретическая оценка минимальной скорости сквозного пробития подводной стальной преграды суперкавитирующим ударником // Инженерно-физический журнал. 2024. Т. 97, № 1. С. 226–231.
12. Белов Н.Н., Демидов В.Н., Ефремова Л.В., Жуков А.В., Николаев А.П., Симоненко В.Г., Трушков В.Г., Хабибуллин М.В., Шиповский И.Е., Шуталев В.Б. Компьютерное моделирование динамики высокоскоростного удара и сопутствующих физических явлений // Известия вузов. Физика. 1992. № 8. С. 5–48.
13. Пат. № 2683148 С1 Российская Федерация, МПК G01M 10/00, F41F 3/07. Гидробаллистический стенд: № 2017135871: заявл. 09.10.2017; опубл. 26.03.2019; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (ТГУ). Буркин В.В., Ищенко А.Н., Майстренко И.В., Фуфачев В.М., Дьячковский А.С., Бураков В.А., Корольков Л.В., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В., Рогаев К.С., Саммель А.Ю., Сидоров А.Д.
14. Хабибуллин М.В. Численное моделирование взаимодействия высокоскоростного ударника с системой пространственно разнесенных мишеней // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1997. Вып. 3. С. 18–24.
15. Хабибуллин М.В., Афанасьева С.А. Расчет явлений, происходящих в конденсированных средах в результате интенсивных импульсных воздействий, в осесимметричной постановке: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012617301. М.: Фед. служба по интеллектуальной собственности, 2012. 80 с.

References

1. Gerasimov A.V. (2015) Chislennoe modelirovanie soudareniya dlinnykh sterzhney so sloistozraznennymi pregradami [Numerical simulation of long rods collision with layered-spaced barriers]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 326(1), pp. 139–145.
2. Radchenko A.V., Radchenko P.A. (2011) Vliyanie orientatsii mekhanicheskikh svoystv kompozitsionnykh materialov na dinamicheskoe razrushenie monolitnykh i raznennnykh pregrad [Influence of orientation of mechanical properties of composite materials on dynamic fracture of monolithic and spaced targets]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred – Computational Continuum Mechanics*. 4(4), pp. 97–106. doi: 10.7242/1999-6691/2011.4.4.44
3. Banichuk N.V., Ivanova S.Yu., Osipenko K.Yu. (2021) Eksperimental'noe issledovanie po probivaniyu khrupkikh sloistykh pregrad [Experimental study on perforation of brittle layered obstacles]. *Problemy prochnosti i plastichnosti – Problems of Strength and Plasticity*. 83(2), pp. 137–150. doi: 10.32326/1814-9146-2021-83-2-137-150
4. Tolkachev V.F., Zelepugin S.A., Kozlov V.S. (2016) Mekhanika vysokoskorostnogo soudareniya sterzhnevnykh udarnikov s kombinirovannymi pregradami [The mechanics of high velocity impact of rod projectiles with combine targets]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series Natural and Technical Sciences*. 21(3), pp. 1354–1357. doi: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1354-1357
5. Ivanov R.S., Zelenov A.N., Dikiy A.E. (2022) Raschyotno-eksperimental'noe opredelenie vnedreniya pronikately s razlichnymi formami golovnykh chastey v raznesyonnye zhelezobetonnye pregradы [Computational and experimental determination of the penetration of impactor with various forms of warheads into spaced reinforced concrete barriers]. *Proceedings of the XI All-Russian Scientific Conference with International Participation "Current Issues of Continuum Mechanics and Celestial Mechanics – 2021"*. Tomsk: National Research Tomsk State University, pp. 44–48.
6. Akasheva E.P., Merkur'ev I.N., Khazov S.E. (2019) Modelirovanie vozdeystviya broneboynozazhigatel'noy puli na raznennnye pregradы s uchyotom ugla ataki [Modelling of the armour-

- piercing incendiary bullet impact with yaw angle on spaced targets]. *Proceedings of the XVII International Conference "Supercomputing and Mathematical Modeling"*. Sarov: Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Research Institute of Experimental Physics. pp. 32–37. doi: 10.53403/9785951504418_32
7. Belov N.N., Yugov N.T., Tabachenko A.N., Afanas'eva S.A., Yugov A.A., Fedosov O.Yu., Arkhipov I.N. (2008) Issledovanie osobennostey deformirovaniya i razrusheniya dlinnykh sterzhney pri naklonnom soudarenii s konstruktivnykh iz prostranstvenno-raznesennykh pregrad [Research of features of deformation and destruction of long cores at inclined impact with the structure from the spatially-carried barrier]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 3(20). pp. 123–134.
 8. Afanas'eva S.A., Belov N.N., Burkin V.V., D'yachkovskiy A.S., Evtyushkin E.V., Zykov E.N., Ishchenko A.N., Monakhov R.Yu., Rodionov A.A., Khabibullin M.V., Yugov N.T. (2013) Special features of high-speed projectile interaction with barriers protected by a water layer. *Russian Physics Journal*. 56(4). pp. 8–15.
 9. Ishchenko A.N., Burkin V.V., D'yachkovskii A.S., Rogaev K.S., Sammel' A.Yu., Sidorov A.D., Stepanov E.Yu., Chupashev A.V. (2022) Interaction of supercavitating strikers with underwater obstacles. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 95(4). pp. 997–1001. doi: 10.1007/s10891-022-02553-4
 10. Afanas'eva S.A., Bondarchuk I.S., Burkin V.V., D'yachkovskii A.S., Ishchenko A.N., Rogaev K.S., Sammel' A.Yu., Sidorov A.D., Stepanov E.Yu., Chupashev A.V. (2021) Experimental and theoretical investigations of the specific features of high-velocity motion of supercavitating strikers made of various materials in water. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 94(6). pp. 1494–1503. doi: 10.1007/s10891-021-02429-z
 11. Burkin V.V., D'yachkovskiy A.S., Ishchenko A.N., Sammel' A.Yu., Stepanov E.Yu., Khabibullin M.V., Chupashev A.V. (2024) Experimental-theoretical assessment of the minimum velocity of through penetration of an underwater steel barrier by a supercavitating striker. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 97(1). pp. 223–228. doi: 10.1007/s10891-024-02887-1
 12. Belov N.N., Demidov V.N., Efremova L.V., Zhukov A.V., Nikolaev A.P., Simonenko V.G., Trushkov V.G., Khabibullin M.V., Shipovskiy I.E., Shutalev V.B. (1992) Komp'yuternoe modelirovanie dinamiki vysokoskorostnogo udara i soputstvuyushchikh fizicheskikh yavleniy [Computer modeling of high-speed impact dynamics and related physical phenomena]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika – Russian Physics Journal*. 8. pp. 5–48.
 13. Burkin V.V., Ishchenko A.N., Maystrenko I.V., Fufachev V.M., D'yachkovskiy A.S., Burakov V.A., Korol'kov L.V., Stepanov E.Yu., Chupashev A.V., Rogaev K.S., Sammel' A.Yu., Sidorov A.D. (2019) *Gidroballisticheskiy stend: № 2017135871* [Hydroballistic testing unit No. 2017135871]. RF Patent 2683148.
 14. Khabibullin M.V. (1997) Chislennoe modelirovanie vzaimodeystviya vysokoskorostnogo udarnika s sistemoy prostranstvenno raznesennykh misheney [Numerical modeling of the interaction of a high-speed projectile with a system of spaced targets]. "VANT" *Seriya: Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov – VANT "Mathematical Simulation of Physical Processes"*. 3. pp. 18–24.
 15. Khabibullin M.V., Afanas'eva S.A. (2012) *Raschet yavleniy, proiskhodyashchikh v kondensirovannykh sredakh v rezul'tate intensivnykh impul'snykh vozdeystviy, v osesimmetrichnoy postanovke* [Calculation of phenomena occurring in condensed media as a result of intense pulsed impacts in an axisymmetric formulation]. Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2012617301. Moscow: Federal Service for Intellectual Property.

Сведения об авторах:

Буркин Виктор Владимирович – кандидат физико-математических наук, заведующий сектором 71 Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: v.v.burkin@mail.ru

Ищенко Александр Николаевич – доктор физико-математических наук, директор Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

Саммель Антон Юрьевич – младший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: anton_sammel@mail.ru

Хабибуллин Марат Варисович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: lenmar07@rambler.ru

Information about the authors:

Burkin Viktor V. (Candidate of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: v.v.burkin@mail.ru

Ishchenko Aleksandr N. (Doctor of Physics and Mathematics, Director, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

Sammel' Anton Yu. (Junior Researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: anton_sammel@mail.ru

Khabibullin Marat V. (Doctor of Physics and Mathematics, Leading Researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: lenmar07@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 18.12.2023; принята к публикации 10.04.2025

The article was submitted 18.12.2023; accepted for publication 10.04.2025