

Научная статья

УДК 531.3, 532.1

doi: 10.17223/19988621/86/5

О влиянии жесткой границы на профиль суперкаверны

Александр Николаевич Ищенко¹, Илья Михайлович Бирюков²,
Виктор Владимирович Буркин³, Алексей Сергеевич Дьячковский⁴,
Антон Юрьевич Саммель⁵, Алена Сергеевна Шестопалова⁶,
Андрей Владимирович Чупашев⁷

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ ichan@niipmm.tsu.ru

² ilya.biryukov.2072@mail.ru

³ v.v.burkin@mail.ru

⁴ lex_okha@mail.ru

⁵ anton_sammel@mail.ru

⁶ shestopalova@ftf.tsu.ru

⁷ chupashevav@gmail.ru

Аннотация. При высокоскоростном движении тела в воде вокруг него образуются свободные границы, замкнутые в удлиненную газопаровую полость, называемую суперкаверной. В работе приводятся качественные и количественные результаты экспериментального исследования явлений, сопутствующих высокоскоростному суперкавитирующему движению твердых тел в воде вблизи жесткой границы в потоке при числе кавитации порядка 10^{-3} . Получены детальные видеоматериалы, показывающие динамику суперкаверны при наличии жесткой стенки в период своего расширения и сужения. Эти результаты могут быть использованы для верификации математических моделей, описывающих движение твердого тела в условиях суперкавитационного обтекания.

Ключевые слова: гидробаллистическая трасса, суперкавитация, ударник, кавитатор, суперкаверна, свободная граница, жесткая граница

Благодарности: Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0032.

Для цитирования: Ищенко А.Н., Бирюков И.М., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Саммель А.Ю., Шестопалова А.С., Чупашев А.В. О влиянии жесткой границы на профиль суперкаверны // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 86. С. 70–78. doi: 10.17223/19988621/86/5

Original article

On the effect of a rigid boundary on the supercavity profile

Aleksandr N. Ishchenko¹, Il'ya M. Biryukov², Viktor V. Burkin³,
Aleksey S. D'yachkovskiy⁴, Anton Yu. Sammel⁵, Alena S. Shestopalova⁶,
Andrey V. Chupashev⁷

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ ichan@niipmm.tsu.ru

² ilya.biryukov.2072@mail.ru

³ v.v.burkin@mail.ru

⁴ lex_okha@mail.ru

⁵ anton_sammel@mail.ru

⁶ shestopalova@ftf.tsu.ru

⁷ chupashevav@gmail.ru

Abstract. The features of cavity formation during striker motion near a rigid boundary are considered. Experimental results demonstrating cavity development in the presence of the rigid wall are presented. The time dependences of the supercavity cross-sectional diameters and the vertical displacement of the supercavity cross-sectional centers are plotted. Qualitative and quantitative analysis of the rigid boundary effect on the supercavity profile behind the striker moving in water is performed. It has been shown that the supercavity is repelled from the rigid wall during the expansion phase and it is attracted to the wall during the contraction and collapse phases. Distortion of the supercavity boundary is observed not only when the striker has overpassed the rigid wall but also when it is moving above the wall. In some cases, this may affect the striker trajectory. The obtained results can be used to verify mathematical models describing the motion of a solid body under conditions of supercavitating flow.

Keywords: hydroballistic track, supercavitation, striker, cavitator, supercavity, free boundary, rigid boundary

Acknowledgments: These results were obtained within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 0721-2020-0032).

For citation: Ishchenko, A.N., Biryukov, I.M., Burkin, V.V., D'yachkovskiy, A.S., Sammel, A.Yu., Shestopalova, A.S., Chupashev, A.V. (2023) On the effect of a rigid boundary on the supercavity profile. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 86. pp. 70–78. doi: 10.17223/19988621/86/5

Введение

На данный момент сохраняют свою актуальность вопросы, связанные с высокоскоростным движением в воде твердых тел [1–8]. Основным критерием, характеризующим такие процессы в жидкости, является число кавитации $\sigma = 2\Delta p/\rho V^2$, где V – скорость ударника, ρ – плотность воды, Δp – разница между давлением в невозмущенной среде и давлением внутри каверны. При $\sigma < 1$ в потоке наблюдаются кавитационные явления, причем чем меньше величина числа кавитации, тем эти явления становятся более выраженными, и в потоке могут образовываться

обширные полости – каверны и суперкаверны, способные многократно превосходить размеры движущегося тела. С одной стороны, это позволяет существенно повысить дальность движения, с другой – существенно усложняется картина взаимодействия тела с потоком и распределения сил, действующих на тело в процессе движения [9–11]. Для построения профиля каверны за телом, движущимся в невозмущенном потоке жидкости, существуют различные подходы [9, 12–16]. При появлении в среде неоднородностей, свободных или твердых границ вблизи траектории движения можно ожидать наличия локальных возмущений, способных повлиять на форму каверны и, как следствие, на дальнейшее движение тела. В этом случае представление о форме границ образующейся каверны необходимо для прогнозирования поведения движущегося тела в условиях несплошного обтекания. Цель работы состоит в получении качественных и количественных данных о профиле суперкаверны при движении ударника вдоль жесткой границы.

Постановка и проведение эксперимента

Требовалось произвести моделирование движения ударника в режиме суперкавитации параллельно горизонтальной плоской жесткой границе, для имитации которой использовался стальной прямоугольный брус. Исследуемые процессы протекают внутри гидробаллистической трассы, которую упрощенно можно представить в виде горизонтального цилиндрического тоннеля с иллюминаторами для наблюдения [17]. Ударник длиной $l_{уд}$ с усеченной конической носовой частью (кавитатором) радиусом R_n ускоряется в баллистической установке, дульный срез которой погружен в воду и загерметизирован. Процесс выстрела из баллистической установки, а также взаимодействие ударника с пулеуловителем в конце траектории сопровождаются существенным возмущением окружающей среды, поэтому область наблюдаемых процессов находится на расстоянии не менее 1 м от дульного среза, расстояние до пулеуловителя составляет 10 м. На рис. 1 приведена схема постановки эксперимента.

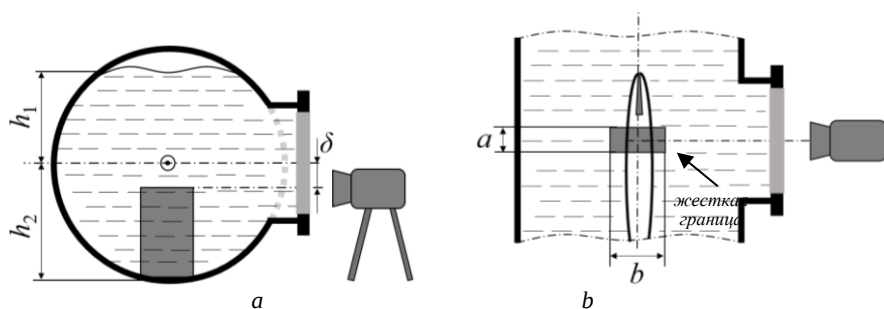


Рис. 1. Схема эксперимента: *a* – вид с торца трассы (в разрезе); *b* – вид сверху
Fig. 1. Experimental design with a rigid boundary: (a) cross-sectional view from the end of the track and (b) top view

Ось метания совпадает с продольной осью трассы, проходящей на расстоянии $h_2 = 0.3$ м от дна тоннеля, сверху присутствует свободная поверхность на расстоянии $h_1 = 0.25$ м от оси (см. рис. 1, *a*). Ниже оси метания на расстоянии δ устанавливается стальной брус со сторонами $a = 0.05$ м, $b = 0.1$ м (см. рис. 1, *b*). Камера

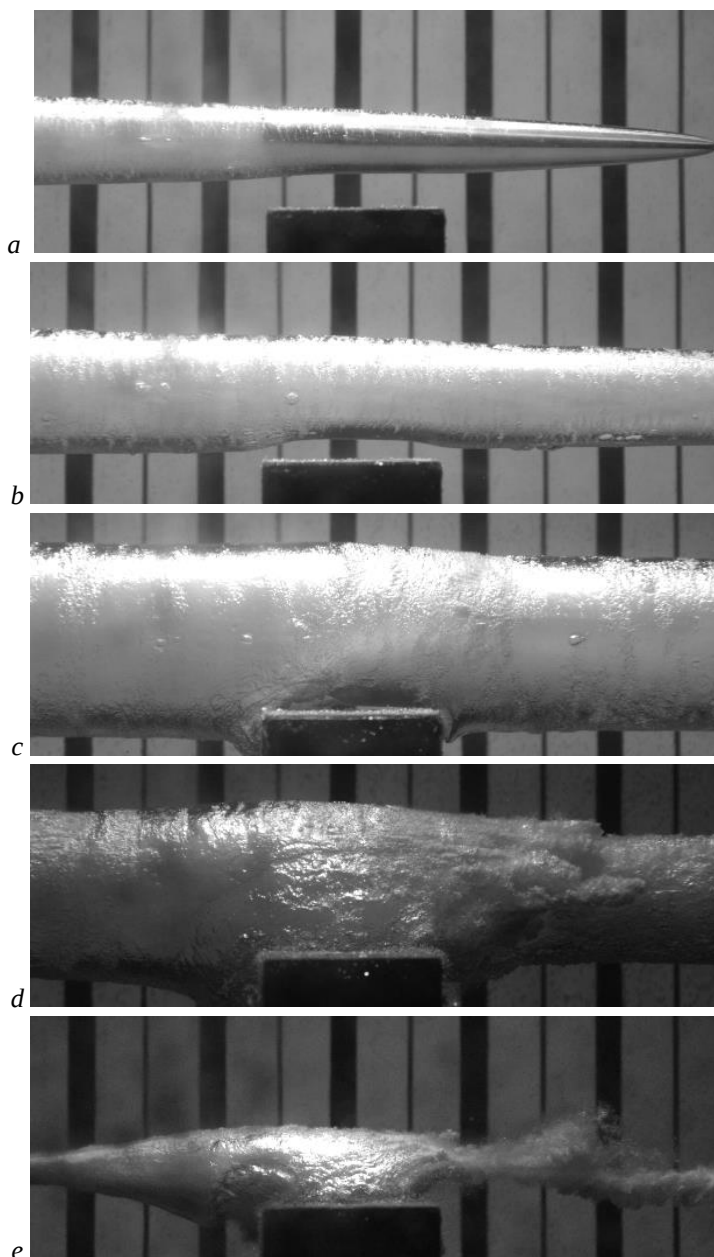


Рис. 2. Основные фазы развития суперкаверны вблизи жесткой границы ($\delta = 7.9R_n$):
 а – ударник в суперкаверне; б – расширение суперкаверны, с – максимум,
 д – сужение, е – схлопывание

Fig. 2. The main stages of supercavitation development near the rigid boundary ($\delta = 7.9R_n$):
 (a) striker in a supercavity; (b) expansion, (c) maximum, (d) contraction,
 and (e) collapse of the supercavity

смонтирована в один уровень с верхней горизонтальной плоскостью бруса, имитирующей жесткую границу. Темп съемки составляет 10^4 кадров в секунду, время экспонирования – 1 мкс.

Измерение скорости ударника и геометрических параметров суперкаверны производится по фотографиям, исходя из известного масштаба в плоскости наблюдаемого явления. Ударник в процессе движения может немного отклоняться от намеченной траектории, поэтому после проведения эксперимента величина δ также уточняется по фотографиям.

На рис. 2 показаны характерные кадры из видеозаписи, полученной в эксперименте ($\delta = 7.9R_n$), на которых запечатлен ударник в суперкаверне в момент прохождения над жесткой границей и последующие фазы существования суперкаверны.

Из данных видеосъемки следует, что над жесткой границей профиль суперкаверны искривлен: нижняя ее граница «отодвигается» от жесткой стенки в фазе расширения (см. рис. 2, *a, b*). Верхняя граница полости также смещена выше, что говорит о смещении всего сечения суперкаверны над жесткой границей. В фазе максимального расширения (см. рис. 2, *c*) радиус суперкаверны над жесткой границей превышает расстояние до нее, однако разрыва контура полости не происходит, и сохраняется некоторый зазор между ее границами и стенками бруска до наступления фазы сужения (см. рис. 2, *d*), в которой происходит обратное: суперкаверна притягивается к бруску, обхватывает его, и часть полости остается на поверхности жесткой границы до схлопывания (см. рис. 2, *e*).

Обсуждение результатов

Рассмотрим суперкаверну как последовательность бесконечно тонких радиальных сечений, развивающихся по некоторому закону во времени независимо друг от друга от момента прохождения кавитатора в данной точке до схлопывания. Центр каждого сечения в момент его зарождения совпадает с центром кавитатора ударника. В таком случае выберем характерное сечение над жесткой границей и сравним его динамику во времени t с характерным сечением, расположенным вдали от жесткой границы (на расстоянии $l_{уд}$ от центра бруска). Обозначим переменной T полное время существования рассматриваемого сечения суперкаверны: от момента прохождения кавитатора в координате сечения до схлопывания. Через D_m обозначим диаметр рассматриваемого сечения каверны в фазе его максимального расширения. На рис. 3, *a* в безразмерном виде представлены зависимости диаметров D_m рассматриваемых сечений суперкаверны от времени в двух экспериментах: $\sigma = 9.8 \cdot 10^{-4}$, $\delta = 7.9R_n$ и $\sigma = 8.7 \cdot 10^{-4}$, $\delta = 4.9R_n$. Данные графики показывают схожий характер развития рассматриваемых сечений во времени. В период $0 < t/T < 0.5$ каждое сечение находится в фазе расширения, промежутки $0.5 < t/T < 1$ соответствует фазе сужения. В условиях проведенных экспериментов фаза максимального расширения рассмотренных сечений суперкаверны близко совпадает с серединой временной шкалы ($t/T = 0.5$) процесса их развития. Наличие жесткой границы существенного воздействия на этот фактор не оказало.

Обозначим величиной h вертикальное смещение центра сечения суперкаверны от его первоначального положения. На рис. 3, *b* приведены зависимости безразмерного вертикального смещения центров рассматриваемых сечений суперка-

верны от своих начальных положений во времени. Наблюдается схожий характер перемещения центров сечений, который говорит о всплытии всей суперкаверны в фазе расширения ($0 < t/T < 0.5$), а после преодоления фазы максимального расширения, наоборот, происходят погружение суперкаверны и схлопывание на оси, расположенной ниже ее первоначального положения.

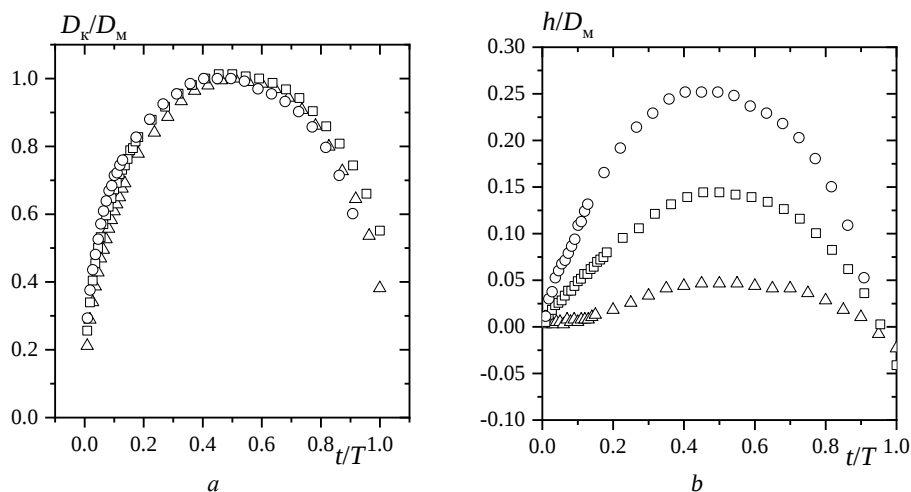


Рис. 3. Зависимость от времени: *a* – диаметров сечений суперкаверны;

b – вертикального смещения центров сечений суперкаверны

(□ / ○ – над жесткой границей ($\delta = 7.9R_n$ / $\delta = 4.9R_n$); △ – вдали от жесткой границы)

Fig. 3. Time dependence of the: (a) diameters of supercavity sections

and (b) vertical displacement of supercavity section centers

(□ / ○ – above the rigid boundary ($\delta = 7.9R_n$ / $\delta = 4.9R_n$); △ – away from the rigid boundary)

Максимальное вертикальное смещение оси сечения суперкаверны над жесткой границей от общей оси суперкаверны составило: $0.1h/D_M$ при $\sigma = 9.8 \cdot 10^{-4}$, $\delta = 7.9R_n$ и $0.2h/D_M$ для случая $\sigma = 8.7 \cdot 10^{-4}$, $\delta = 4.9R_n$. Полученные результаты качественно согласуются с теоретическими данными для σ порядка 10^{-2} , приведенными в [12].

Заключение

В работе получены качественные и количественные данные о профиле суперкаверны при движении ударника вдоль жесткой границы, характеризующие характер влияния жесткой границы на суперкаверну за движущимся в воде ударником:

- на расстоянии $\delta = 7.9R_n$ от жесткой стенки вертикальное смещение центра сечения от общей оси суперкаверны в пике составило $0.1h/D_M$, на расстоянии $\delta = 4.9R_n$ получено смещение центра сечения $0.2h/D_M$;

- показано, что суперкаверна смещается от жесткой стенки в период своего расширения и приближается к ней в период сужения и при схлопывании;

- зарегистрировано искривление границы суперкаверны не только после прохождения ударника, но и в процессе его движения над жесткой стенкой.

Список источников

1. Савченко Г.Ю., Савченко Ю.Н. Глиссирование цилиндра в суперкаверне // Прикладна гідромеханіка. 2013. Т. 15, № 3. С. 79–84.
2. Савченко Ю.Н., Власенко Ю.Д., Семенов В.Н. Экспериментальные исследования высокоскоростных кавитационных течений // Гидромеханика. 1998. № 72. С. 103–111.
3. Yang D., Xiong Y., Guo X. Drag reduction of a rapid vehicle in supercavitating flow // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2017. V. 9, № 1. P. 35–44. doi: 10.1016/j.ijnaoe.2016.07.003
4. Guo Z., Zhang W., Xiao X., Wei G., Ren P. An investigation into horizontal water entry behaviors of projectiles with different nose shapes // International Journal of Impact Engineering. 2012. V. 49. P. 43–60.
5. Vlasenko Y. Experimental investigation of supercavitation flow regimes at subsonic and transonic speeds // Proc. In Fifth Int. Symp. on Cavitation (Osaka, Japan) 2003. Cav03-GS-6-006.
6. Пирсол И. Кавитация / пер. с англ. Ю.Ф. Журавлева. М. : Мир, 1975. 95 с.
7. Ищенко А.Н., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Майстренко И.В., Погаев К.С., Саммель А.Ю., Чупашев А.В. Одиночное и совместное движение суперкавитирующих ударников в сверхзвуковом режиме в воде // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46, № 23. С. 22–24.
8. DeLei Yu, YingJie Wei, Cong Wang, WeiXue Xia, JiaXing Lu, WenHui Zhang. Experimental investigation on interaction modes and geometric features of two ventilated cavities // Ocean Engineering. 2022. V. 264. Art. 112479. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112479
9. Логвинович Г.В. Некоторые вопросы глиссирования и кавитации // Труды ЦАГИ. 1980. № 2052. С. 250–270.
10. Ahn S.S. An integrated approach to the design of supercavitating underwater vehicles : Ph.D. Thesis. Georgia Institute of Technology, 2007.
11. Буркин В.В., Акиншин Р.Н., Афанасьева С.А., Борисенков И.Л., Ищенко А.Н., Хабибуллин М.В., Чупашев А.В., Югов Н.Т. Особенности высокоскоростного проникания и движения суперкавитирующих кинетических ударников в воде // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91, № 3. С. 701–708.
12. Буйвол В.Н. Тонкие каверны в течениях с возмущениями. Киев : Наукова думка, 1980. 296 с.
13. Савченко Ю.Н. Моделирование суперкавитационных процессов // Прикладная гидромеханика. 2000. Т. 2, № 3. С. 75–86.
14. Васин А.Д. Задачи гидродинамики и гидроупругости высокоскоростного движения в воде : дис. ... д-ра техн. наук. М. : ЦАГИ, 1999. 282 с.
15. Шахтин А.А. Численный метод расчета суперкаверн // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2013. Т. 2, № 22. С. 105–109.
16. Ischenko A.N., Burkin V.V., Diachkovskiy A.S., Chupashev A.V. Researching acceleration and deceleration processes of supercavitating strikers under the conditions of hydroballistic track // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1709. P. 012014-1–012014-9. doi: 10.1088/1742-6596/1709/1/012014
17. Буркин В.В., Ищенко А.Н., Майстренко И.В. и др. Гидробаллистический стенд. Патент на изобретение № 2683148 РФ, G01M 10/00 (2006.01), F41F 3/07 (2006.01). Оpubл. 26.03.2019.

References

1. Savchenko G.Yu., Savchenko Yu.N. (2013) Glissirovanie tsilindra v superkaverne [Planing a cylinder in a supercavern]. *Prikladna gidromekhanika*. 15(3). pp. 79–84.
2. Savchenko Yu.N., Vlasenko Yu.D., Semenenko V.N. (1998) Eksperimental'nye issledovaniya vysokoskorostnykh kavitatsionnykh techeniy [Experimental studies of high-speed cavitation flows]. *Gidromekhanika*. 72. pp. 103–111.

3. Yang D., Xiong Y., Guo X. (2017) Drag reduction of a rapid vehicle in supercavitating flow. *International Journal Naval Architecture Ocean Engineering*. 9(1) pp. 35–44. doi: 10.1016/j.ijnaoe.2016.07.003
4. Guo Z., Zhang W., Xiao X., Wei G., Ren P. (2012) An investigation into horizontal water entry behaviors of projectiles with different nose shapes. *International Journal Impact Engineering*. 49. pp. 43–60. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2012.04.004
5. Vlasenko Y. (2003) Experimental investigation of supercavitation flow regimes at subsonic and transonic speeds. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan*. Cav03-GS-6-006.
6. Pirsol I. (1975) *Kavitatsiya* [Cavitation]. Moscow: Mir.
7. Ishchenko A.N., Burkin, V.V., Diachkovskii A.S., Maystrenko I.V., Rogaev K.S., Sammel A.Yu., Chupashev A.V. (2020) Single and joint movement of supercavitating strikers in the supersonic mode in water. *Technical Physics Letters*. 46. pp. 1177–1179. doi: 10.1134/S1063785020120081
8. Yu D.L., Wei Y.J., Wang C., Xia W.X., Lu J.X., Zhang W.H. (2022) Experimental investigation on interaction modes and geometric features of two ventilated cavities. *Ocean Engineering*. 264. Article 112479. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112479
9. Logvinovich G.V. (1980) Nekotorye voprosy glissirovaniya i kavitatsii [Some issues of planing and cavitation]. *Trudy TsAGI – TsAGI Science Journal*. 2052. pp. 250–270.
10. Ahn S.S. (2007) *An Integrated Approach to the Design of Supercavitating Underwater Vehicles*. Dissertation. Georgia: Institute of Technology.
11. Burkin V.V., Akinshin R.N., Afanas'eva S.A., Borisenkov I.L., Ishchenko A.N., Khabibulin M.V., Chupashev A.V., Yugov N.T. (2018) Features of high-velocity penetration and motion of supercavitating kinetic strikers in water. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 91(3). pp. 655–662. doi: 10.1007/s10891-018-1787-y
12. Buyvol V.N. (1980) *Tonkie kaverny v techeniyakh s vozmushcheniyami* [Thin cavities in disturbed flows]. Kyiv: Naukova dumka.
13. Savchenko Yu.N. (2000) Modelirovanie superkavitatsionnykh protsessov [Modeling of supercavitation processes]. *Prikladnaya gidromekhanika*. 2(3). pp. 75–86.
14. Vasin A.D. (1999) *Zadachi gidrodinamiki i gidrouprugosti vysokoskorostnogo dvizheniya v vode* [Problems of hydrodynamics and hydroelasticity of high-speed motion in water]. Dissertation. Gosudarstvennyy nauchno-issledovatel'skiy tsentr TsAGI.
15. Shakhtin A.A. (2013) Chislennyy metod rascheta superkavern [Numerical analysis of supercavitation]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2(22). pp. 105–109.
16. Ischenko A.N., Burkin V.V., Diachkovskiy A.S., Chupashev A.V. (2020) Researching acceleration and deceleration processes of supercavitating strikers under the conditions of hydroballistic track. *Journal of Physics: Conference Series*. 1709. Article 012014. pp. 1–9. doi: 10.1088/1742-6596/1709/1/012014
17. 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) *Gidrobballisticheskiy stend* [Hydroballistic testing facility]. RF Patent № 2683148.

Сведения об авторах:

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

Бирюков Илья Михайлович – лаборант кафедры динамики полета физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: ilya.biryukov.2072@mail.ru

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

Дьячковский Алексей Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: lex_okha@mail.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

Шестопалова Алена Сергеева – техник лаборатории 72 Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: shestopalova@ftf.tsu.ru

Чупашев Андрей Владимирович – младший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: chupashevav@gmail.ru

Information about the authors:

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

Biryukov Il'ya M. (Laboratory Assistant, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ilya.biryukov.2072@mail.ru

Burkin Viktor V. (Candidate of Physics and Mathematics, Head of 71 Department, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: v.v.burkin@mail.ru

D'yachkovskiy Aleksey S. (Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: lex_okha@mail.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

Shestopalova Alena S. (Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: shestopalova@ftf.tsu.ru

Chupashev Andrey V. (Junior Researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: chupashevav@gmail.ru

Статья поступила в редакцию 17.11.2023; принята к публикации 04.12.2023

The article was submitted 17.11.2023; accepted for publication 04.12.2023