

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 532.5

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.422-434

Параметры ударного воздействия при аварийном падении тела на жидкость

Александр Андреевич Комаров, Юлия Вадимовна Брянская

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В ряде прикладных инженерных задач часто возникают вопросы, связанные с ударом массивных тел о жидкость и их движением после удара, например, определение динамических нагрузок при расследовании или прогнозировании аварийных ситуаций. Рассмотрена аварийная ситуация, вызванная транспортировкой контейнера, содержащего радиоактивные отходы, над бассейном выдержки, которыми оборудованы все атомные электростанции, обрыв крепления контейнера и его падение в бассейн с водой.

Материалы и методы. Изучены физические процессы, сопровождающие удар тяжелого тела о поверхность воды, общие принципы формирования и расчета гидродинамических нагрузок. Проанализирована возможность использования понятия «присоединенная масса» при физической трактовке данного явления. Приведены результаты модельных экспериментальных исследований и численного моделирования.

Результаты. Опираясь на данные модельных экспериментов и результаты численных расчетов, выделены четыре основные фазы движения тела при его падении в жидкость, сформулирована методология по определению зависимости от времени присоединенной массы, участвующей в ударе. Показано, что при ударе тела о воду существует зависимость от времени присоединенной массы, которая устанавливается геометрическими параметрами бассейна.

Выводы. В ходе модельных экспериментов выявлено, что ударное давление, реализуемое при касании плоского тела о воду, значительно меньше, чем это следует из решения задачи о распаде произвольного разрыва. Максимальное давление, полученное расчетным путем, в 3–4 раза больше, чем давление, полученное опытным путем, что можно объяснить наличием воздушной прослойки между плоским дном тела и свободной поверхностью воды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ударное воздействие, аварийная ситуация, задача о распаде произвольного разрыва, присоединенная масса, нестационарные нагрузки, разностные методы расчета, граничные условия

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Комаров А.А., Брянская Ю.В. Параметры ударного воздействия при аварийном падении тела на жидкость // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 3. С. 422–434. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.422-434

Автор, ответственный за переписку: Юлия Вадимовна Брянская, mgsu-hydraulic@yandex.ru.

Impact parameters in case of an emergency fall of a body onto a liquid

Alexandr A. Komarov, Yuliya V. Bryanskaya

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. In a number of applied engineering problems, questions related to the impact of massive bodies on water and their motion in the water after the impact often arise. Renowned Russian and international scientists, including L.I. Sedov, M.V. Keldysh, G. Wagner, T. Karman, and others, conducted theoretical and practical research in this area of hydrodynamics. Problems involving determining the dynamic loads arising in liquid-filled containers when various large objects fall into them often arise during the investigation or prediction of emergency situations. This paper examines the problem of an emergency involving the transportation of a container containing radioactive waste over a spent fuel pool, which is found at all nuclear power plants. The container's attachment breaks, and it falls into the pool. Determining the loads arising in such a scenario is a mandatory task for all nuclear power plants.

Materials and methods. This paper describes in detail the physical processes accompanying the impact of a heavy, flat-bottomed body on a water surface and formulates general principles for the formation and calculation of hydrodynamic loads arising in a fluid. The feasibility of using the concept of “added mass” in the physical interpretation of this phenomenon is analyzed. The limits of its validity in considering various problems of unsteady hydrodynamics are indicated. The results of model experimental studies aimed at studying the impact pressure arising in water when a heavy, flat-bottomed body falls into it are presented. The well-known Godunov method, based on the problem of the decay of an arbitrary discontinuity, was

used in the mathematical description of the hydrodynamic phenomena under consideration. This method allows one to determine the dynamic parameters of pressure and velocity of a fluid in the presence of significant discontinuities in the initial and boundary conditions.

Results. Based on data from model experiments and the results of numerical calculations, the authors identified four main phases of a body's motion as it falls into a liquid. A series of computational experiments was used to formulate a methodology for determining the time dependence of the added mass involved in the impact. It was shown that when a body impacts water contained in a confined pool, there is a time dependence of the added mass, which is determined by the geometric parameters of the pool. As an example, the paper presents several instantaneous impact pressure profiles generated in a pool when a flat body impacts water. Examples of maximum pressure fields generated in a pool when a massive body impacts water are also given.

Conclusions. Model experiments revealed that the shock pressure generated when a flat body impacts water is significantly lower than predicted by the solution to the problem of the decay of an arbitrary discontinuity. The maximum pressure obtained through calculations is 3–4 times greater than that obtained experimentally. The significant reduction in shock load is caused by the presence of an air gap between the flat bottom of the body and the free surface of the water. The presence of an air bubble (air gap) beneath the body leads to an increased time for the formation of a stable hydrodynamic flow around the body and, consequently, a decrease in the intensity of the shock wave.

KEYWORDS: impact action, emergency situation, problem of decay of an arbitrary discontinuity, added mass, non-stationary loads, difference calculation methods, boundary conditions

FOR CITATION: Komarov A.A., Bryanskaya Yu.V. Impact parameters in case of an emergency fall of a body onto a liquid. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(3):422-434. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.422-434 (rus.).

Corresponding author: Yuliya V. Bryanskaya, mgsu-hydraulic@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Темой удара тела о поверхность жидкости начала интересоваться в первые десятилетия XX в. в связи с посадкой гидросамолетов на воду. Основу этого научного направления заложили известные российские ученые Л.И. Седов и М.В. Келдыш, а за рубежом известные исследователи Г. Вагнер и Т. Карман.

С развитием техники произошло значительное расширение вопросов, касающихся ударных воздействий тел о поверхность жидкости. Большое внимание этой проблематике уделяет оборонная промышленность. Например, вопрос входа в воду объектов, направленных на поражение подводных лодок противника, не теряет своей актуальности и требует постоянных уточнений. В гражданской деятельности с задачами подобного рода приходится сталкиваться при проектировании и расчетах на прочность объектов судостроения. При этом, несмотря на достаточную проработанность рассматриваемой задачи [1–17], определенные проблемы в ее разрешении остаются.

Особое положение в решении задач о входе тела в воду занимают вопросы, связанные с аварийным падением массивных тел в жидкость и с прогнозированием динамических нагрузок, возникающих при этом в жидкости. Обусловлено это тем, что в приложениях к эксплуатационным ситуациям основное внимание уделяется динамическому воздействию жидкости на входящий в нее объект для обеспечения его эксплуатационных характеристик. При решении указанных задач начальные и граничные условия известны достаточно точно и подробно. В приложениях, связанных с аварийными ситуациями, начальные и граничные условия известны довольно приблизительно, а наибольший интерес представляют динамические параметры нагрузок, возникающих в самой жидкости. Точность решения задач, касающихся численных значений

ударных нагрузок, возникающих при падении тел в воду, зависит от множества параметров: начальной скорости входа тела в жидкость; угла входа тела; массы и геометрии тела; параметров резервуара; условий сжатия воздушной среды, находящейся между телом и свободной поверхностью жидкости в момент удара; физических свойств жидкости; упругости тела и от множества других факторов [18–21]. Однако при решении проблем, связанных с аварийными ситуациями, когда начальные и граничные условия известны приблизительно, необходимо рассматривать упрощенный вариант расчетной схемы, но с учетом ключевых особенностей физического процесса.

В настоящей статье рассматривается аварийное падение в бассейн с водой массивного контейнера, содержащего радиоактивный материал. Указанная аварийная ситуация может реализоваться на атомных электростанциях, и необходимость решения указанной проблемы регулируется нормативной базой¹.

Решение подобных задач даже с учетом схематизации исследуемого процесса вызывает значительные математические и вычислительные трудности [22]. Свяzano это с резко нестационарным характером движения жидкости при ударном воздействии на нее падающего тела, со струйными явлениями, с образованием всплесков и брызг при ударе, с формированием разрывных явлений в жидкости и т.д.

Основной интерес представляет начальный момент удара тела о жидкость, потому что в этот период формируются максимальные гидродинамические нагрузки, вызывающие движение жидкости.

¹ РД 95 10534–96. Руководство по определению нагрузок на строительные конструкции и оборудование атомных станций при падении в бассейн, заполненный водой, контейнера или других тел.

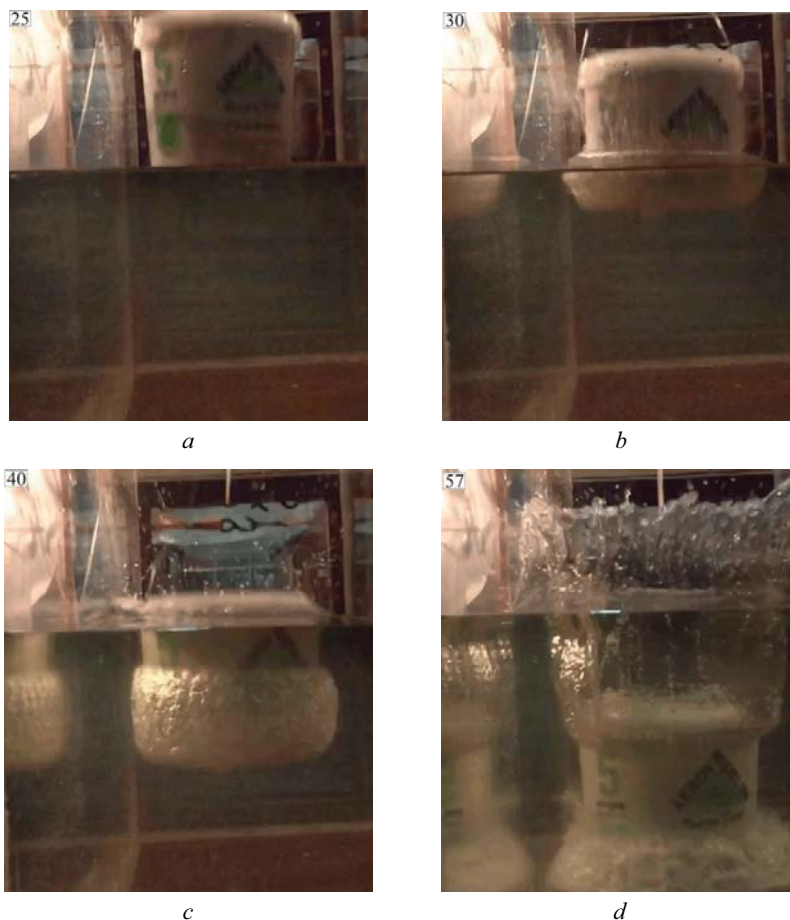


Рис. 1. Фотографии процесса падения тела с плоским дном в воду

Fig. 1. Photographs of a flat-bottomed body falling into water

Процесс возникновения в жидкости в момент удара волн сжатия часто трактуется как появление присоединенной массы. Хотя это не совсем так, и об этом будет сказано далее более подробно.

Следует отметить, что при падении плоского тела на свободную поверхность жидкости между дном тела и жидкостью возникает воздушная прослойка в результате захвата воздуха телом и увлечения его в жидкость [23, 24]. Данное явление иллюстрируют фотографии, приведенные на рис. 1. Это кадры киносъемки падения с высоты 1 м 5-литрового пластикового ведра, залитого бетоном. На рис. 1, *a* показан момент касания тела с плоским дном поверхности жидкости. На рис. 1, *b* представлен момент времени, когда сжатая прослойка воздуха, расширяясь, создает вблизи дна падающего тела своеобразную бахрому из смеси воды и мелких пузырьков воздуха. Момент увлечения телом на дно резервуара сформировавшейся при ударе газовой прослойки приведен на рис. 1, *c*. На рис. 1, *d* показан момент удара тела о дно бассейна.

Эксперименты продемонстрировали, что в момент удара тела о воду между плоским дном тела и свободной поверхностью жидкости образуется прослойка воздуха, которая значительно меняет параметры ударных волн сжатия, возникающих в воде.

Интенсивность ударного воздействия уменьшается на порядок при падении в воду тела, имеющего плоское дно.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Прежде всего необходимо охарактеризовать физическую картину исследуемого явления. Она, а также основные гидродинамические соотношения, описывающие процесс удара тела о свободную поверхность жидкости, подробно изложены в работах [25, 26].

Остановимся на ключевых моментах, связанных с формированием ударных нагрузок, возникающих непосредственно в момент удара тела о жидкость.

Сначала рассмотрим ситуацию, когда тело массой M_T , движущееся со скоростью V_0 , производит удар о свободную поверхность жидкости в безвоздушном пространстве, т.е. в момент удара воздушная прослойка между телом и жидкостью отсутствует. При ударе тела о воду любое возмущение, создаваемое в жидкости телом, будет распространяться по движущейся жидкости, движение которой было вызвано ударом тела за предыдущее время. Поэтому при длительности удара τ в движение будет приведен слой воды, толщина которого составит $C \cdot \tau$, где

C — скорость распространения малых возмущений в воде. Таким образом, за время удара тела о жидкость конкретная масса жидкости должна начать двигаться и иметь определенный импульс. На величину приобретенного водой импульса должен уменьшиться импульс тела. В ряде источников [25] массу жидкости, которая приводится в движение во время удара, называют присоединенной массой жидкости $M_{пр}$. В связи с потерей телом импульса его скорость после удара о жидкость будет равна:

$$V_B = \frac{M_T}{M_T + M_{пр}} \cdot V_0, \quad (1)$$

что следует из закона сохранения импульса.

Проанализируем правомерность использования термина «присоединенная масса» применительно к изучаемой задаче. Актуальность данного вопроса связана с тем, что подобные вопросы часто возникают в технических приложениях нестационарной гидродинамики. При этом в рассматриваемых задачах часто применяют Фурье-анализ, предполагающий решение в спектральной области. Например, задача смещения напорного гидротехнического сооружения под действием сейсмических колебаний.

Напомним, что под присоединенной массой принято считать массу жидкости, вовлекаемую в движение движущимся телом, которая получается путем нормирования к скорости тела импульса движущейся жидкости. Поэтому при неравномерном движении тела в жидкости его массу следует увеличивать на присоединенную массу жидкости или газа [27]. Тогда тело с увеличенной массой будет двигаться в пустоте таким же образом, как и тело с реальной массой будет двигаться в жидкости или газе [27]. Например, для тел сферической формы присоединенная масса составляет массу жидкости с объемом, равным половине от объема тела. Для квадратной пластины, двигающейся поперек потока и имеющей грань с размером D , присоединенная масса составляет $M_{пр} = \pi \rho D^3 / 4$, где ρ — плотность жидкости, в которой движется квадратная пластина [28].

Естественно, что в подобной трактовке понятия присоединенная масса представляется, что все возмущения, вызываемые нестационарными движениями тела, уходят в бесконечность и не возвращаются обратно в виде волн, отраженных от каких-либо внутренних границ. Именно поэтому численное значение присоединенной массы зависит только от геометрических параметров движущегося тела и не зависит от времени. При наличии границ в жидкости или газе использование общепринятого понятия «присоединенная масса» не совсем правомерно, так как отраженные от границ возмущения, вызванные нестационарным движением тела, могут существенно влиять на кинематику тела и приводить к зависимости численного значения присоединенной массы от времени. Это обстоятельство ставит под сомне-

ние целесообразность применения термина «присоединенная масса» в подобных ситуациях.

Для подтверждения сказанного выше проведены экспериментальные исследования и численные расчеты.

При выполнении модельных экспериментов фиксировалось динамическое давление в неподвижной воде при падении в нее тела с массой $M_T = 47$ кг. Эксперимент осуществлялся в лаборатории НТЦ «Взрывоустойчивость» НИУ МГСУ при следующих значениях параметров установки. Линейные размеры тела: диаметр $D_T = 16,8$ см, высота $L_T = 42$ см. Скорость подлета тела к поверхности воды составляла $V = 2,43$ м/с. Размеры емкости с водой: диаметр емкости $D = 20,0$ см, глубина воды $H = 45$ см.

Математическая модель, положенная в основу численных расчетов, базируется на методе Годунова, разработанного для расчета разрывных течений в гидрогазодинамике [17, 24, 26, 29, 30]. Метод Годунова основан на задаче о распаде произвольного разрыва, что допускает проводить расчеты применительно к разрывным течениям и вычислять на всех расчетных шагах давление P_p и скорость U_p среды между всеми ячейками расчетной области. Это позволяет определять потоки массы и импульса, которыми обмениваются между собой расчетные ячейки.

Расчеты выполнялись по явной разностной схеме, которая аппроксимирует уравнения сохранения массы и импульса (уравнение энергии применительно к данной задаче не использовалось):

$$\begin{cases} (P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n) + \frac{\tau \cdot c^2}{\Delta x} \cdot (M_{i,j+1} - M_{i,j-1}) + \\ + \frac{\tau \cdot c^2}{\Delta y} \cdot (M_{i+1,j} - M_{i-1,j}) = 0; \\ (u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n) + \frac{\tau}{\Delta x \cdot \rho} \cdot (I_{i,j+1} - I_{i,j-1}) = 0; \\ (v_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^n) + \frac{\tau}{\Delta y \cdot \rho} \cdot (I_{i+1,j} - I_{i-1,j}) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $M = \rho \cdot U_p$ — поток массы; $I = P_p + \rho \cdot U_p^2$ — поток импульса; ρ — плотность жидкости.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим физические аспекты падения тела в бассейн с водой. На рис. 2 приведены четыре фазы движения тела.

Первая фаза (рис. 2, *a*) — движение тела происходит под действием силы тяжести (падение тела с высоты H_T). Скорость подлета тела к воде определяется как $V_0 = \sqrt{2gH_T}$. Сопротивлением воздуха на этой фазе движения тела можно пренебречь. Вторая фаза (рис. 2, *b*) движения тела связана с процессом его входа в воду. На этом этапе тело за достаточно малый отрезок времени τ приводит в движение жидкость, находящуюся в бассейне, и при этом

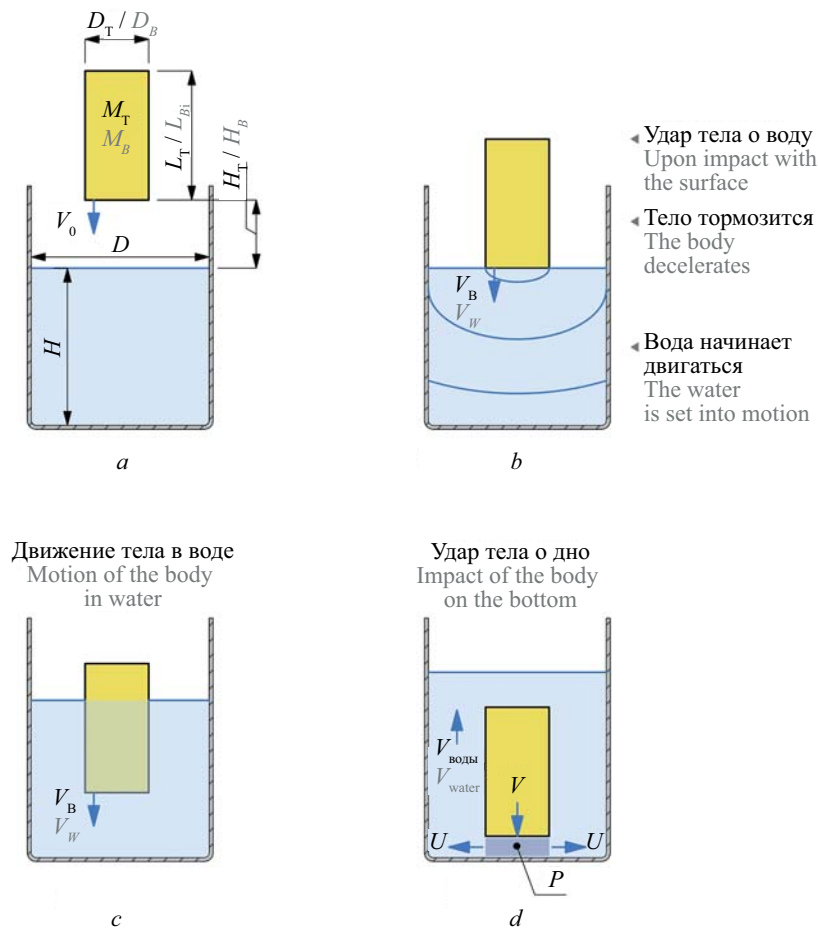


Рис. 2. Основные фазы движения тела при его падении в бассейн с водой
 Fig. 2. The main phases of a body's movement when it falls into a pool of water

теряет часть своего импульса, который передается приведенной в движение жидкости. На третьем этапе отмечается изменение скорости тела, связанное с гидродинамическими сопротивлениями, сопровождающими его погружение и движение по жидкости бассейна. При подходе тела ко дну (четвертая фаза движения тела) происходит его резкое торможение и остановка. Схематично зависимость скорости тела от времени изображена на рис. 3.

Фотографии, иллюстрирующие четыре описанные выше фазы движения тела, приведены на рис. 1.

Проанализируем фазу удара тела о воду подробнее (вторая фаза движения тела). На рис. 2, b показана схема момента контакта тела с водой. В приведенной схеме предполагается, что падение тела происходит в безвоздушном пространстве. Рассмотрим сначала удар тела о воду при отсутствии воздуха. Для установления физической природы второй фазы удара тела о воду проведем некоторые численные расчеты.

На рис. 4 показана расчетная область, в которой выполнялся численный расчет нестационарного движения жидкости в момент удара тела о воду. Для удобства восприятия масштаб по оси Y увеличен (рис. 4, b). Начальные условия и параметры тела аналогичны параметрам, принятым в экспери-

менте. Схема установки и обозначения приведены на рис. 2, a.

На рис. 5 представлены поля скорости воды через каждые 0,2 мс после удара тела о воду. Исходные данные соответствуют эксперименту.

Проанализируем приведенные рисунки.

Предварительно определим период распространения волны по бассейну $T = 2H/C = 0,616$ мс. Видно, что через 0,2 мс после удара тела о воду (рис. 5, a) в движение приводится примерно половина жидкости, находящейся в бассейне. Глубина проникновения ударной волны (под ударной волной здесь и далее понимается волна сжатия, формирующаяся при ударе) внутрь воды бассейна составляет около 0,3 м ($1460 \text{ м/с} \cdot 0,00002 \text{ с} = 0,3 \text{ м}$). При этом возникает значительное течение жидкости в зазорах между телом и стенками бассейна. Еще через 0,2 мс (рис. 5, b) в отраженной от дна волне скорость движения жидкости обращается в ноль, а скорость воды в падающей волне постепенно увеличивается. Через следующие 0,2 мс (рис. 5, c) отраженная волна достигает торца тела и отражается от него. При этом скорость воды в зазорах между телом и стенками бассейна значительно возрастает. Отраженная волна движется опять ко дну бассейна (рис. 5, d) и видно,

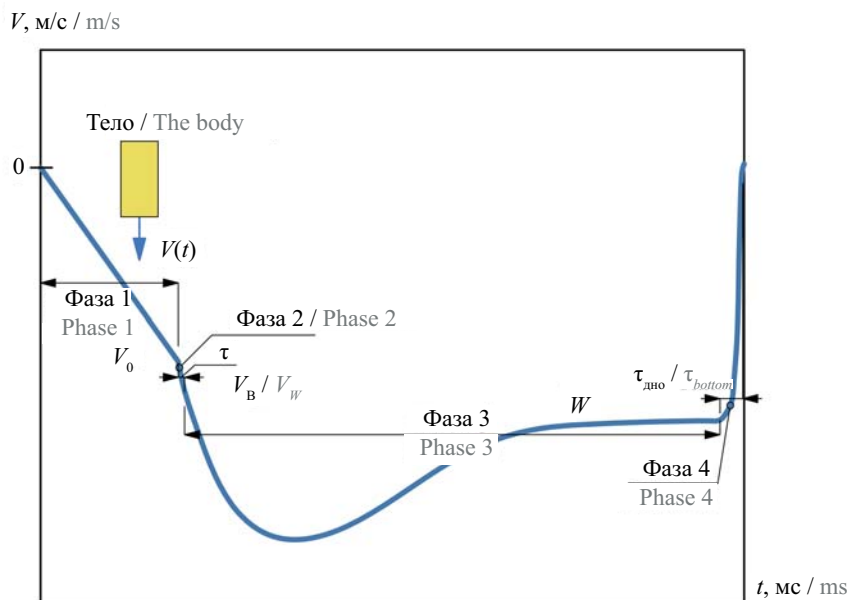


Рис. 3. Общий вид зависимости изменения скорости тела от времени при его падении в бассейн с водой: V_0 — скорость входа тела в воду; V_B — скорость, обеспечивающая движение присоединенной массы воды; W — скорость равномерного движения тела в бассейне (гидравлическая крупность)

Fig. 3. General view of the dependence of the change in the velocity of a body on time when it falls into a pool of water: V_0 — velocity of the body entering the water; V_B — velocity that ensures the movement of the added mass of water; W — velocity of uniform movement of the body in the pool (hydraulic size)

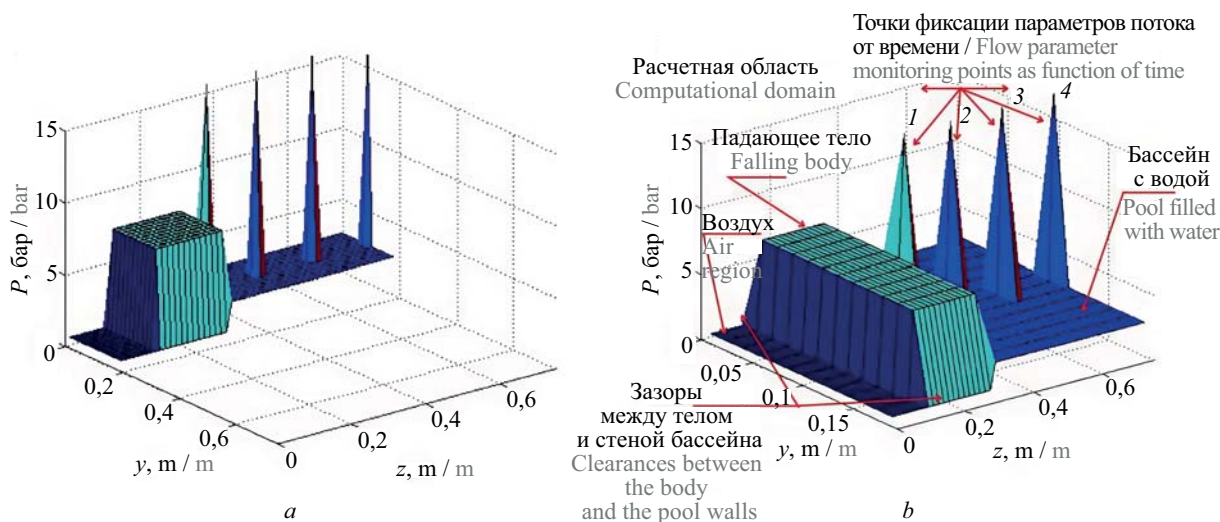


Рис. 4. Расчетная область
Fig. 4. Computational domain

что жидкость в бассейне приобретает значительную скорость, которая в дальнейшем мало изменяется (рис. 5, e). Наступает период стабилизации движения жидкости, т.е. начинается обычное гидродинамическое течение. Волна сжатия распространяется по бассейну и после этого, но основную роль — приведение в движение жидкости — она уже выполнила и не оказывает существенного влияния на гидродинамические потоки.

Таким образом, из рис. 5 видно, что примерно через 0,8–1,0 мс после удара тела о воду в бассейне устанавливается квазистационарное течение жидкости, т.е. в движение приведена вся жидкость, импульс которой можно охарактеризовать, как импульс присоединенной массы торца тела.

Напомним, что по определению присоединенной массы тела ее численное значение устанавливаются размеры тела, его форма и плотность жидкости.

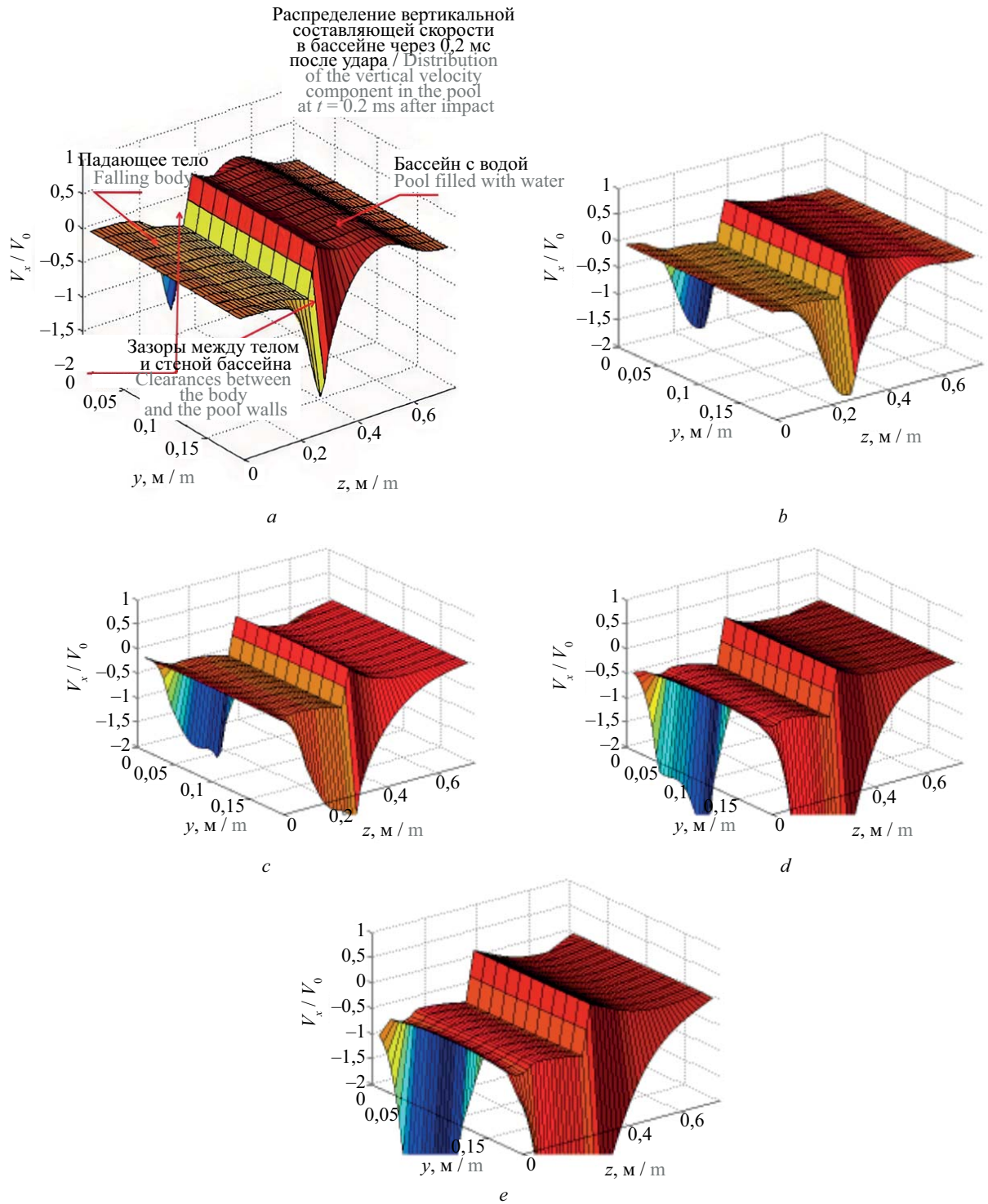


Рис. 5. Поля вертикальной составляющей скорости воды в бассейне через каждые 0,2 мс после удара тела о воду: *a* — через 0,2 мс; *b* — через 0,4 мс; *c* — через 0,6 мс; *d* — через 0,8 мс; *e* — через 1,0 мс

Fig. 5. The vertical velocity fields of the water in the pool are plotted every 0.2 ms after impact: *a* — 0.2 ms; *b* — 0.4 ms; *c* — 0.6 ms; *d* — 0.8 ms; *e* — 1.0 ms

Например, для квадратной пластины с ребром D_T присоединенная масса $M_{пр}$ будет равна:

$$M_{пр} = \rho \frac{\pi D_T^2}{4} D_T = \alpha \rho \frac{\pi D_T^2}{4} D_T,$$

где $\alpha = 1$ [23].

При определении ударных характеристик, связанных с падением тела в жидкость, необходимо рассмотреть изменение присоединенной массы (для принятых граничных условий — падение тела в ограниченный бассейн) во времени. На рис. 6 приведена зависимость коэффициента α от времени.

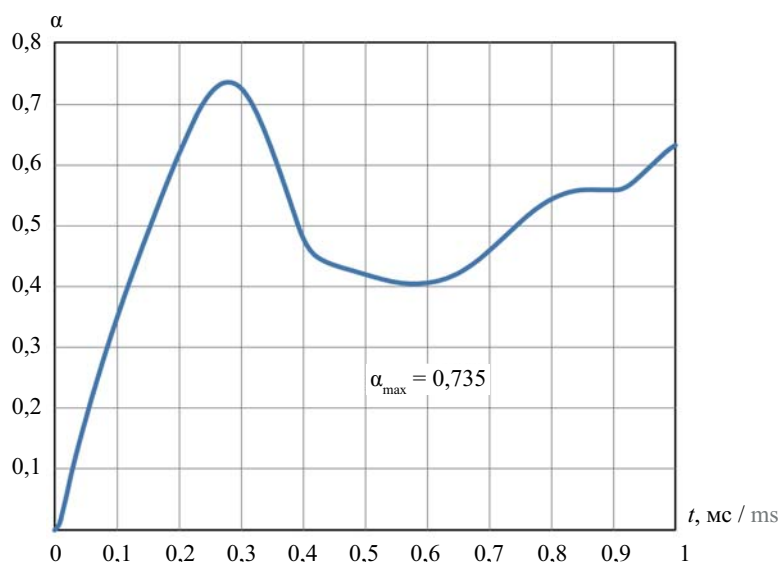


Рис. 6. Зависимость увеличения коэффициента присоединенной массы α от времени в момент удара тела о воду
 Fig. 6. Dependence of the increase in the coefficient of added mass α on time at the moment of impact of the body on the water

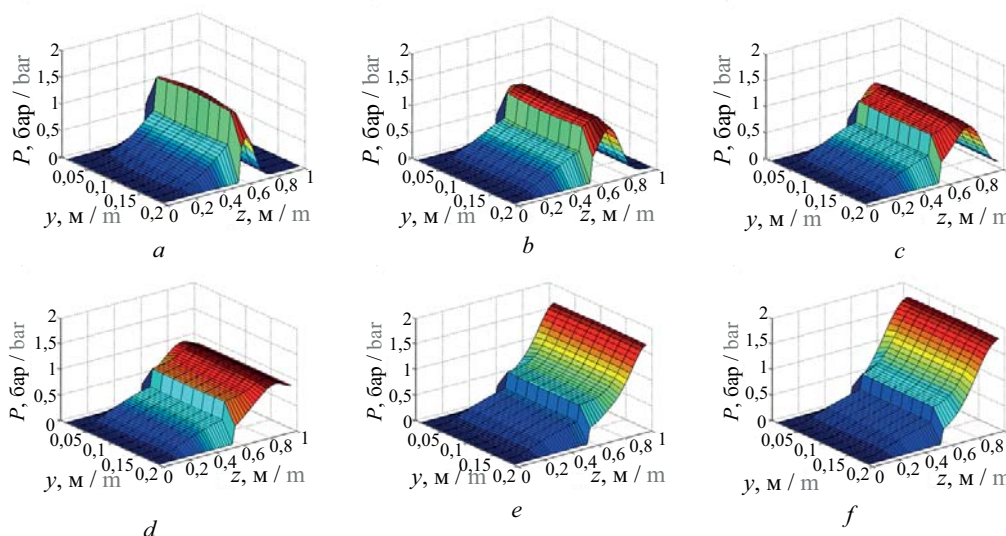


Рис. 7. Мгновенные профили давления. Шаг по времени — 0,2 мс: *a* — поле давления через 0,2 мс после удара; *b* — через 0,4 мс после удара; *c* — через 0,6 мс после удара; *d* — через 0,8 мс после удара; *e* — через 1,0 мс после удара; *f* — через 1,2 мс после удара

Fig. 7. Instantaneous pressure profiles. Time step — 0.2 ms: *a* — pressure field 0.2 ms after impact; *b* — 0.4 ms after impact; *c* — 0.6 ms after impact; *d* — 0.8 ms after impact; *e* — 1.0 ms after impact; *f* — 1.2 ms after impact

Данная зависимость получена следующим образом. Во всех расчетных ячейках, занятых водой, для каждого момента времени рассчитывалась вертикальная составляющая импульса. После этого проводилось суммирование по всем расчетным ячейкам и определялся для каждого момента времени импульс всей жидкости. Отношение полученного значения импульса к $\rho \frac{\pi D_T^2}{4} D_T \cdot V$ дает значение коэффициента α для данного момента времени.

Рис. 6 позволяет сделать следующие выводы. Через 0,2 мс после удара тела о поверхность жидкости в движение вовлечено около половины массы жидкости в бассейне (пространственное распределение

скорости воды по бассейну, см. рис. 5, *a*). Через 0,3 мс после удара (момент подхода ударной волны к дну бассейна) наблюдается максимум импульса воды, т.е. происходит максимальная отдача импульса тела воде. Через 0,4 мс после удара (см. рис. 5, *b*) жидкость начинает «отдавать» часть импульса дну бассейна, т.е. происходит уменьшение ее импульса, если говорить в терминах присоединенной массы, то уменьшается присоединенная масса. Через 0,6 мс после удара (момент отражения ударной волны от торца тела, см. рис. 5, *c*) импульс воды и присоединенная масса воды начинают расти, т.е. тело начинает снова передавать импульс воде и т.д. То есть начинается колебательный процесс передачи импульса от тела воде и от воды дну

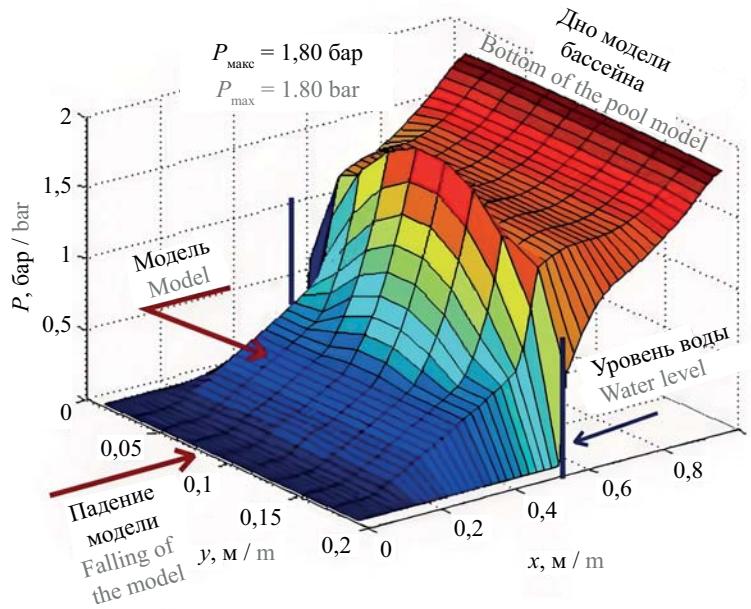


Рис. 8. Поле максимального давления при ударе тела о воду
 Fig. 8. Maximum pressure field when a body hits water

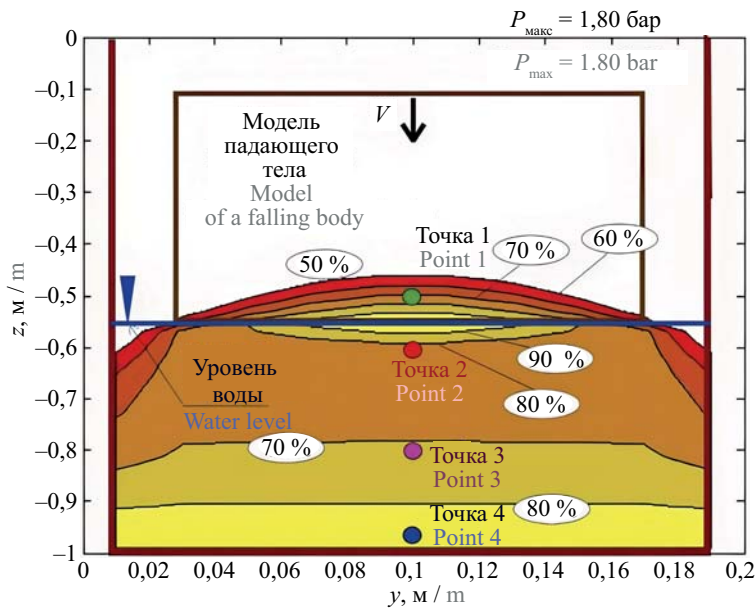


Рис. 9. Изолинии равного давления
 Fig. 9. Equal pressure contours

бассейна. В итоге устанавливается квазистационарное течение. При этом максимальный импульс, который потеряет тело за время удара, будет характеризоваться присоединенной массой с численным значением коэффициента $\alpha = 0,735$, что меньше аналогичного коэффициента для квадратной пластины.

Рассмотрим результаты расчета распространения давления, создаваемого ударной волной сжатия. Под ударной волной понимается волна, вызванная

ударом, а не принятое в газовой динамике понятие — ударная или сверхзвуковая волна. На рис. 7 приведены мгновенные профили ударного давления для нескольких моментов времени. Шаг по времени на рис. 7 равен 0,2 мс.

Из приведенных расчетов видно, что через 0,2 мс после удара тела о воду (рис. 7, а) внутрь воды распространяется интенсивная волна сжатия с амплитудой около 1,8 бар. Ее распространение по воде

иллюстрирует рис. 7, *b–d*. Примерно через 1 мс ударная волна достигает дна бака и отражается от него, что видно из рис. 7, *e–f*.

Поле максимальных давлений приведено на рис. 8. Поле максимальных давлений строится следующим образом: в каждой расчетной точке (за весь интервал времени) определяется максимальное давление, которое наносится на график рис. 8. Следует отметить, что время реализации максимального давления в разных точках различное.

На рис. 9 представлены изолинии равного относительного давления, построенные на основании рис. 8. Значения поля давления делятся на максимальное давление, которое реализовалось при ударе тела о воду (в данном случае максимальное давление равно 1,80 бар), и строятся линии равного относительного давления: 90 % соответствует $0,9 \times 1,80$ бар; 80 % — $0,8 \cdot 1,80$ бар и т.д.

Модельные эксперименты показали, что максимальное ударное давление, фиксируемое на плоском торце тела в момент удара, в несколько раз (от 3 до 4 раз) меньше, чем давление, которое было получено при расчетах.

В ходе экспериментов установлено, что это несоответствие связано с захватом плоским торцом тела порции воздуха, который создает воздушную прослойку и увеличивает время удара. При ударе плоского тела о воду происходит формирование между телом и водой воздушной прослойки, как это изображено на рис. 10.

Наличие воздушного пузыря (воздушной области) под телом приводит к увеличению времени формирования устойчивого гидродинамического течения обтекания водой тела и, соответственно, к уменьшению интенсивности ударной волны.

Поскольку в результате экспериментальных исследований установлено увеличение времени движения тела в жидкости в 3–4 раза (для реальных скоростей падения тел в бассейн), в представленных выше расчетах было принято значение увеличения времени в 3,45 раза.

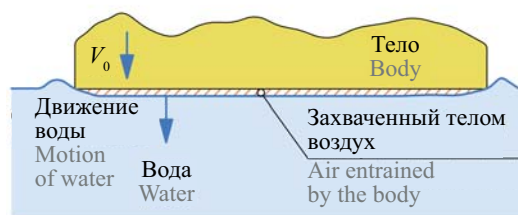


Рис. 10. Иллюстрация момента удара плоского тела о воду и захват телом порции воздуха

Fig. 10. Illustration of the moment when a flat body hits water and the body captures a portion of air

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования показали, что при падении плоских тел в жидкость между плоским дном тела и поверхностью жидкости формируется воздушная прослойка, которая увеличивает время ударного воздействия тела на жидкость. Это приводит к значительному уменьшению интенсивности волны сжатия, распространяющейся по жидкости в результате удара. Например, в ходе экспериментов фиксируемое датчиками максимальное давление удара было в несколько раз (от 3 до 4 раз) меньше, чем расчетная величина динамического давления.

В ходе экспериментов определено, что формирование в момент удара воздушной прослойки между телом и поверхностью жидкости приводит к значительному повышению времени удара, что увеличивает время развития гидродинамических потоков, связанных с формированием так называемой присоединенной массы жидкости. Это приводит к значительному снижению амплитуды ударной волны сжатия.

Кроме того, в результате экспериментальных и численных исследований установлено, что использование понятия присоединенная масса для всего комплекса нестационарных задач не всегда оправдано и правомочно.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бельгова М.А. Экспериментальное исследование плоского удара // Труды ЦНИИМФ. 1969. № 117. С. 15–28.
2. Герасимов С.А. Присоединенная масса и аэродинамическое сопротивление в динамике колебаний // Фундаментальные исследования. 2008. № 7. С. 1–4. EDN JKFPPLT.
3. Григолюк Э.И., Горшков А.Г. Взаимодействие упругих конструкций с жидкостью: удар и погружение. Л. : Судостроение, 1976. 199 с.
4. Ионина М.Ф. Численное исследование задачи об ударе упругих цилиндрических оболочек о воду // Вычислительные технологии. 1999. Т. 4. № 3. С. 84–94.
5. Коробкин А.А. Плоская задача о симметричном ударе волной по балке Эйлера // Прикладная механика и техническая физика. 1998. Т. 39. № 5. С. 134–147.
6. Ляхов Г.М., Полякова Н.И. Волны в плотных средах и нагрузки на сооружения. М. : Недра, 1967. 232 с.
7. Рябченко В.П. Метод интегральных уравнений в плоской и пространственной задачах об ударе пластины о жидкость конечной глубины // Прикладная

механика и техническая физика. 2001. Т. 42. № 4 (248). С. 98–111. EDN ONVVPF.

8. *Тарануха Н.А., Чижиумов С.Д.* Численное моделирование падения на воду тела с гофрированным днищем // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42. № 4 (248). С. 112–118. EDN ONVVPF.

9. *Kubenko V.D.* Impact of blunted bodies on a liquid or elastic medium // International Applied Mechanics. 2004. Vol. 40. Issue 11. Pp. 1185–1225. DOI: 10.1007/s10778-005-0031-6

10. *Palmer R.A., Smith F.T.* Skimming impact of a thin heavy body on a shallow liquid layer // Journal of Fluid Mechanics. 2022. Vol. 940. DOI: 10.1017/jfm.2022.207

11. *Hjelmervik K.B., Tyvand P.A.* Impact of narrow plates on broader liquid bodies // Applied Ocean Research. 2019. Vol. 87. Pp. 247–255. DOI: 10.1016/j.apor.2019.04.002

12. *Korobkin A.* Blunt-body impact on a compressible liquid surface // Journal of Fluid Mechanics. 1992. Vol. 244. Pp. 437–453. DOI: 10.1017/S0022112092003136

13. *Tkacheva L.A.* Impact of a body with a plane bottom on a thin liquid layer at a small angle // Fluid Dynamics. 2013. Vol. 48. Issue 3. Pp. 352–365. DOI: 10.1134/S0015462813030095

14. *Володин Г.Т., Кочергин Д.С.* Разрушение взрывом балочных конструкций в воде // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2021. № 4 (50). С. 3–9. DOI: 10.37972/chgpu.2021.50.4.001. EDN WXQQVA.

15. *Володин Г.Т., Кочергин Д.С.* Импульсная нагрузка на неподвижную преграду при взрыве в воде // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2021. № 3 (49). С. 12–18. DOI: 10.37972/chgpu.2021.49.3.002. EDN QCYGIC.

16. *Сеницкий Ю.Э., Кузьмин Н.Ю.* Колебания днища судового шлюза // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 4 (30). С. 17–24. DOI: 10.5862/MCE.30.3. EDN PDZJWP.

17. *Бочарова О.В., Лебедев М.Г.* Тестирование метода Годунова первого порядка точности на некоторых модельных и практических задачах // Прикладная математика и информатика : тр. факультета ВМК МГУ имени М.В. Ломоносова. 2016. С. 24–44. EDN XHMDZT.

18. *Комаров А.А.* Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка

последствий их воздействия на здания и сооружения : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2001. 492 с. EDN QDMQZH.

19. *Khabakhpasheva T.I., Korobkin A.A.* Oblique impact of a smooth body on a thin layer of inviscid liquid // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2013. Vol. 469. Issue 2151. P. 20120615. DOI: 10.1098/rspa.2012.0615

20. *Horikawa A., Chiba K., Nishitani K., Ueshima T.* Falling Motion of a Slender Body in Still Liquid // Journal of the Textile Machinery Society of Japan. 1981. Vol. 27. Issue 4. Pp. 107–115. DOI: 10.4188/jte1955.27.107

21. *Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Pelinovskii E.N.* Effect of the angle of water entry of a body on the generated wave heights // Fluid Dynamics. 2016. Vol. 51. Issue 2. Pp. 288–298. DOI: 10.1134/s0015462816020162

22. *Tyvand P.A., Solbakken K.M., Hjelmervik K.B.* Incompressible impulsive wall impact of liquid bodies // European Journal of Mechanics — B/Fluids. 2014. Vol. 47. Pp. 202–210. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2014.03.018

23. *Ross S., Hicks P.D.* A comparison of pre-impact gas cushioning and Wagner theory for liquid-solid impacts // Physics of Fluids. 2019. Vol. 31. Issue 4. DOI: 10.1063/1.5086510

24. *Zhu S., Wu T., Bian Y., Chen C., Zhang Y., Li J. et al.* Sustaining Robust Cavities with Slippery Liquid–Liquid Interfaces // Advanced Science. 2022. Vol. 9. Issue 7. DOI: 10.1002/advs.202103568

25. *Логвинович Г.В.* Гидродинамика течений со свободными границами. Киев : Наукова думка, 1969. 208 с.

26. *Комаров А.А., Казеннов В.В.* Падение тела в резервуар с жидкостью и расчет возникающих при этом динамических нагрузок // Вестник МГСУ. 2014. № 5. С. 135–143. EDN SCJUVT.

27. *Седов Л.И.* Механика сплошной среды. Т. 2. М. : Лань, 2004. 560 с.

28. *Седов Л.И.* Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. М. : Наука, 1966. 448 с.

29. *Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. М. : Наука, 1976. 400 с.

30. *Васильев Е.И., Ионов Г.А.* Двумерная модификация метода Годунова 4-го порядка по пространству и 3-го по времени // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2025. Т. 65. № 10. С. 1720–1734. DOI: 10.31857/S0044466925100089. EDN NPDFGQ.

Поступила в редакцию 5 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 26 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 29 января 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Андреевич Комаров — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 1063-8262, РИНЦ ID: 155673, Scopus: 57192380312, ResearcherID: AAC-8725-2022, ORCID: 0000-0003-2764-639X; mgsu-hydraulic@yandex.ru;

Юлия Вадимовна Брянская — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 6392-7447, РИНЦ ID: 280769, Scopus: 6505953432, ResearcherID: AAE-7741-2020, ORCID: 0000-0002-6233-3690; mgsu-hydraulic@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Bel'gova M.A. Experimental study of flat impact. *Proceedings of the Central Research Institute of Marine Physics*. 1969; 117:15-28. (rus.).
2. Gerasimov S.A. Associated mass and aerodynamic resistance in dynamics of vibrations. *Fundamental Research*. 2008; 7:1-4. EDN JKFPLT. (rus.).
3. Grigolyuk E.I., Gorshkov A.G. *Interaction of elastic structures with liquid: impact and immersion*. Leningrad, Sudostroenie, 1976; 199. (rus.).
4. Ionina M.F. Numerical research of the impact of water on the cylindrical. *Computing Technologies*. 1999; 4(3):84-94. (rus.).
5. Korobkin A.A. Plane problem of symmetric impact of a wave on an Euler beam. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1998; 39(5):134-147. (rus.).
6. Lyakhov G.M., Polyakova N.I. *Waves in dense media and loads on structures*. Moscow, Nedra, 1967; 232. (rus.).
7. Ryabchenko V.P. Method of integral equations in 2d and 3d problems of plate impact on a fluid of finite depth. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2001; 42(4):(248):98-111. EDN ONVVPP. (rus.).
8. Taranukha N.A., Chizhiumov S.D. Numerical simulation of the fall of a body with a corrugated bottom on water. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2001; 42(4):(248):112-118. EDN ONVVPP. (rus.).
9. Kubenko V.D. Impact of blunted bodies on a liquid or elastic medium. *International Applied Mechanics*. 2004; 40(11):1185-1225. DOI: 10.1007/s10778-005-0031-6
10. Palmer R.A., Smith F.T. Skimming impact of a thin heavy body on a shallow liquid layer. *Journal of Fluid Mechanics*. 2022; 940. DOI: 10.1017/jfm.2022.207
11. Hjelmervik K.B., Tyvand P.A. Impact of narrow plates on broader liquid bodies. *Applied Ocean Research*. 2019; 87:247-255. DOI: 10.1016/j.apor.2019.04.002
12. Korobkin A. Blunt-body impact on a compressible liquid surface. *Journal of Fluid Mechanics*. 1992; 244:437-453. DOI: 10.1017/S0022112092003136
13. Tkacheva L.A. Impact of a body with a plane bottom on a thin liquid layer at a small angle. *Fluid Dynamics*. 2013; 48(3):352-365. DOI: 10.1134/S0015462813030095
14. Volodin G.T., Kochergin D.S. Destruction of beam structures in water by explosion. *Vestnik of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State*. 2021; 4(50):3-9. DOI: 10.37972/chgpu.2021.50.4.001. EDN WXQQVA. (rus.).
15. Volodin G.T., Kochergin D.S. Pulse load on a stationary barrier during an explosion in water. *Vestnik of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State*. 2021; 3(49):12-18. DOI: 10.37972/chgpu.2021.49.3.002. EDN QCYGIC. (rus.).
16. Senitsky Yu.E., Kuzmin N.Yu. Oscillations of the bottom of a shipping lock. *Magazine of Civil Engineering*. 2012; 4(30):17-24. DOI: 10.5862/MCE.30.3. EDN PDZJWP. (rus.).
17. Bocharova O.V., Lebedev M.G. Testing the Godunov method of first order accuracy on some model and practical problems. *Applied Mathematics and Computer Science: Works of the Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics of Lomonosov Moscow State University*. 2016; 24-44. EDN XHMDZT. (rus.).
18. Komarov A.A. *Forecasting loads from emergency deflagration explosions and assessing the consequences of their impact on buildings and structures: thesis of doctor of technical sciences*. Moscow, 2001; 492. EDN QDMQZH. (rus.).
19. Khabakhpasheva T.I., Korobkin A.A. Oblique impact of a smooth body on a thin layer of inviscid liquid. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2013; 469(2151):20120615. DOI: 10.1098/rspa.2012.0615
20. Horikawa A., Chiba K., Nishitani K., Ueshima T. Falling Motion of a Slender Body in Still Liquid. *Journal of the Textile Machinery Society of Japan*. 1981; 27(4):107-115. DOI: 10.4188/jte1955.27.107
21. Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Pelinovskii E.N. Effect of the angle of water entry of a body on the gen-

erated wave heights. *Fluid Dynamics*. 2016; 51(2): 288-298. DOI: 10.1134/s0015462816020162

22. Tyvand P.A., Solbakken K.M., Hjelmervik K.B. Incompressible impulsive wall impact of liquid bodies. *European Journal of Mechanics — B/Fluids*. 2014; 47:202-210. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2014.03.018

23. Ross S., Hicks P.D. A comparison of pre-impact gas cushioning and Wagner theory for liquid-solid impacts. *Physics of Fluids*. 2019; 31(4). DOI: 10.1063/1.5086510

24. Zhu S., Wu T., Bian Y., Chen C., Zhang Y., Li J. et al. Sustaining Robust Cavities with Slippery Liquid-Liquid Interfaces. *Advanced Science*. 2022; 9(7). DOI: 10.1002/advs.202103568

25. Logvinovich G.V. *Hydrodynamics of flows with free boundaries*. Kyiv, Naukova dumka, 1969; 208. (rus.).

26. Komarov A.A., Kazennov V.V. Body drop into a fluid tank and dynamic loads calculation. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2014; 5:135-143. EDN SCJUVT. (rus.).

27. Sedov L.I. *Continuum mechanics*. Vol. 2. Moscow, Lan', 2004; 560. (rus.).

28. Sedov L.I. *Plane problems of hydrodynamics and aerodynamics*. Moscow, Nauka, 1966; 448. (rus.).

29. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya., Kraiko A.N., Prokopov G.P. *Numerical solution of multi-dimensional gas dynamics problems*. Moscow, Nauka, 1976; 400. (rus.).

30. Vasiliev E.I., Ionov G.A. Two-dimensional modification of the Godunov method of the 4th order in space and the 3rd order in time. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2025; 65(10):1720-1734. DOI: 10.31857/S0044466925100089. EDN NPDFGQ. (rus.).

Received December 5, 2025.

Adopted in revised form on December 26, 2025.

Approved for publication on January 29, 2026.

BIONOTES: **Alexandr A. Komarov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Hydraulics and Hydrotechnical Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 1063-8262, ID RSCI: 155673, Scopus: 57192380312, ResearcherID: AAC-8725-2022, ORCID: 0000-0003-2764-639X; mgsu-hydraulic@yandex.ru;

Yuliya V. Bryanskaya — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Hydraulics and Hydrotechnical Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 6392-7447, ID RSCI: 280769, Scopus: 6505953432, ResearcherID: AAE-7741-2020, ORCID: 0000-0002-6233-3690; mgsu-hydraulic@yandex.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the publication.

The authors declare no conflicts of interest.