

УДК 532.59

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАДЕНИЯ ДИСКОВ НА МЕЛКУЮ ВОДУ

Е. В. Ерманюк, Н. В. Гаврилов

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск
E-mails: ermanyuk@hydro.nsc.ru, gavrilov@hydro.nsc.ru

Экспериментально исследована задача о падении круглых дисков, имеющих плоскую, выпуклую или вогнутую форму нижней поверхности, на слой жидкости ограниченной глубины. Изучено влияние малой кривизны нижней поверхности тела на величину присоединенной массы, на характерное время соударения со свободной поверхностью, параметры захватываемой при ударе воздушной каверны и тип соударения тела с дном гидродинамического лотка.

Ключевые слова: гидродинамический удар, присоединенная масса, воздушная каверна, кавитация.

Введение. Задача о соударении твердых тел с жидкостью нередко встречается в приложениях, в частности при оценке гидродинамических нагрузок, возникающих при глисировании, слеминге, аварийном приводнении самолетов и вертолетов и т. д. В случае заостренных тел разработан ряд эффективных методов решения данной задачи, используемых в инженерных расчетах [1]. В случае затупленных и плоских тел возникает ряд принципиальных проблем, обусловленных трудностью описания динамики пятна контакта тела и жидкости, захвата и разрушения воздушной каверны и т. д. [2–5]. При учете конечной глубины жидкости добавляются новые параметры [6–11] и физические эффекты, возникающие при соударении тела с твердым дном. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования падения на мелкую воду круглого диска, имеющего выпуклую, вогнутую либо плоскую нижнюю поверхность.

Методика эксперимента. Опыты проводились в лотке с размерами $120 \times 120 \times 30$ см (рис. 1). Лоток заполнялся дистиллированной водой до глубины h , варьировавшейся от 1 до 6 см. Стенки и дно лотка были изготовлены из оргстекла, что позволяло осуществлять видеосъемку со всех направлений. Основная информация о физике данного процесса была получена с помощью скоростной видеосъемки камерой MotionXtra HG-100K сквозь дно лотка. Частота съемки в опытах варьировалась от 1000 до 5000 кадр/с.

Использовались диски из оргстекла диаметром $d = 18$ см и толщиной 3 см. Нижняя поверхность этих дисков была либо плоской, либо обработанной на цифровом станке до заданного радиуса кривизны. Радиус кривизны вогнутой нижней поверхности равен $R_- = 130$ см, а выпуклой — $R_+ = 100, 130$ см. Основные инструментальные измерения были проведены для диска с $R_+ = 130$ см. В ряде опытов для визуализации течения использовался диск с $R_+ = 100$ см. Давление на дне лотка под центром тела измерялось с помощью датчика KYOWA, собственная частота которого равна 32 кГц. Высота падения диска H , измерявшаяся от нижней поверхности диска до невозмущенного уровня

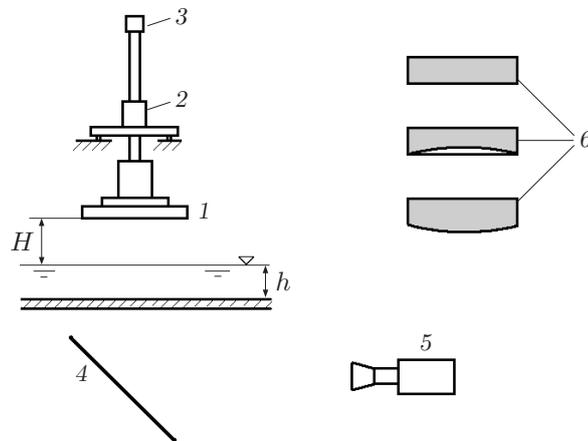


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — диск; 2 — линейный подшипник; 3 — акселерометр; 4 — зеркало; 5 — скоростная видеокамера; 6 — поперечные сечения дисков

свободной поверхности воды, варьировалась от 1 до 12 см. Диски крепились к вертикальному стержню, который являлся направляющим. Для измерения ускорений использовался акселерометр, расположенный на направляющем стержне. Масса M диска вместе с направляющим стержнем во всех экспериментах постоянна и равна 2,72 кг.

Результаты опытов. На рис. 2 представлены типичные зависимости скорости тела от времени для дисков с плоской, выпуклой или вогнутой формой нижней поверхности. Экспериментальные данные получены при $h = 6$ см, $H = 5$ см. Оценки скорости V получены с помощью интегрирования показаний акселерометра. Прямая линия, выходящая из начала координат (рис. 2, *a*), соответствует фазе свободного падения, в конце которой достигается скорость V_1 . При ударе о свободную поверхность скорость тела скачкообразно уменьшается до величины V_2 . В увеличенном масштабе процесс изменения скорости при ударе показан на рис. 2, *б*.

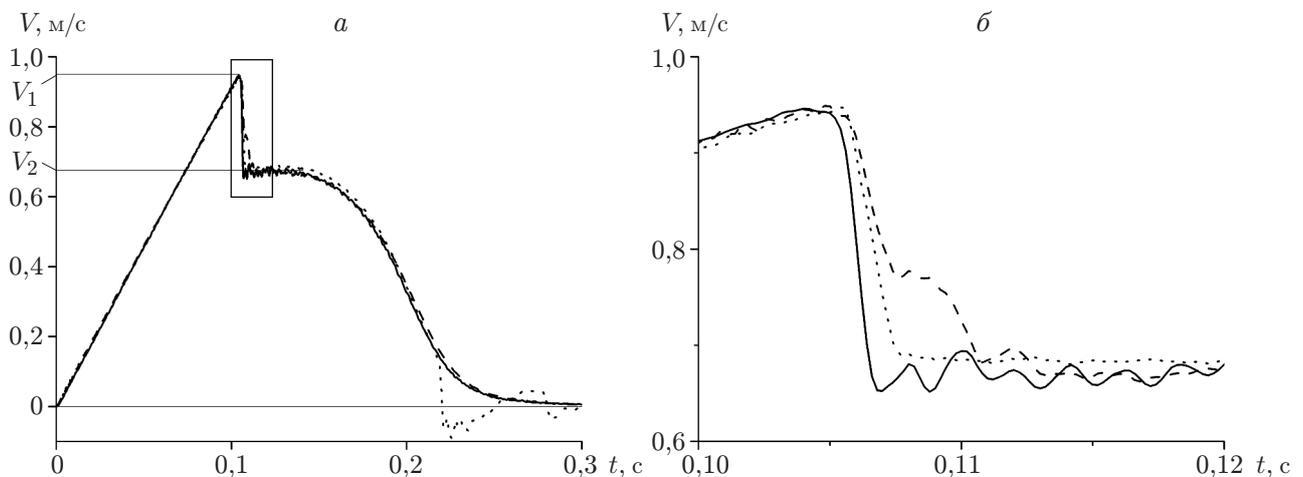


Рис. 2. Зависимость скорости диска с плоской (сплошные линии), вогнутой (штриховые) и выпуклой (пунктирные) формами нижней поверхности от времени ($h = 6$ см, $H = 5$ см):

a — полный масштаб изменения величин; *б* — фрагмент, соответствующий удару о свободную поверхность

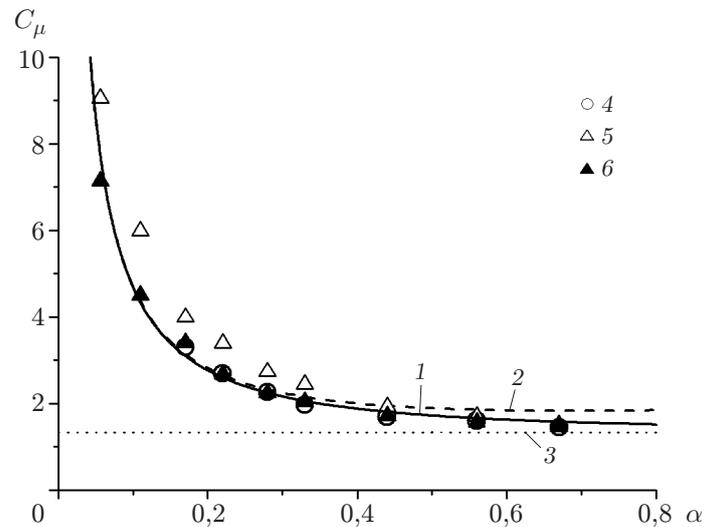


Рис. 3. Зависимость коэффициента присоединенной массы C_μ от относительной глубины жидкости α :

линии — результаты расчетов (1 — оценка с помощью формулы (1) для диска с плоской формой нижней поверхности [6]; 2 — оценка с помощью формулы (1) с учетом первых трех членов; 3 — асимптотическое значение $C_\mu = 4/3$ при $\alpha \rightarrow \infty$); точки — экспериментальные данные (4 — плоский диск; 5 — диск с вогнутой формой нижней поверхности; 6 — диск с выпуклой формой нижней поверхности)

Оценка присоединенной массы диска μ может быть получена в предположении о сохранении импульса при ударе: $MV_1 = (M + \mu)V_2$. На рис. 3 представлены результаты экспериментальной оценки коэффициентов присоединенной массы $C_\mu = \mu/(\rho r^3)$ в зависимости от относительной глубины жидкости $\alpha = h/r$ (ρ — плотность жидкости; $r = d/2$). Видно, что значения коэффициентов присоединенной массы хорошо согласуются с их оценкой на основе теории идеальной несжимаемой жидкости для круглого диска с плоским дном [6]:

$$C_\mu = \frac{\pi}{8} \frac{1}{\alpha} + \frac{\ln 4}{2} + \frac{\pi^2 + 3 \ln^2 4}{6\pi} \alpha - \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k(\pi + 2a \ln 4) + 2\alpha}{k^2 k!! [(2k-1)!!]^{-1}} I_1\left(\frac{\pi k}{\alpha}\right) K_0\left(\frac{\pi k}{\alpha}\right). \quad (1)$$

Здесь I_1 , K_0 — модифицированные функции Бесселя первого и второго рода (функции Инфельда и Макдональда) соответственно. При малых значениях α для оценки $C_\mu(\alpha)$ достаточно удержать первые три члена в (1). В случае бесконечно глубокой жидкости $C_\mu(\infty) = 4/3$. Данные, приведенные на рис. 3, позволяют сделать вывод, что если кривизна поверхности диска мала ($r^2/R_+^2 \ll 1$, $r^2/R_-^2 \ll 1$), то импульс, который диск передает жидкости при ударе о свободную поверхность, слабо зависит от величины и знака кривизны. В то же время изменение кривизны нижней поверхности диска оказывает существенное влияние на масштаб времени удара (см. рис. 2, б). Наименьший интервал времени и наибольшая величина ускорений при ударе диска о свободную поверхность наблюдаются в случае диска с плоской формой нижней поверхности. Для диска с вогнутой формой нижней поверхности ($R_- = 130$ см) максимальное значение ускорения при тех же условиях эксперимента уменьшается в 2–3 раза. В случае диска с выпуклой формой нижней поверхности ($R_+ = 130$ см) величина ускорения при ударе о свободную поверхность является промежуточной между случаями дисков с плоской и вогнутой формами нижней поверхности. Во всех данных случаях максимальное значение ускорения при ударе диска о свободную поверхность увеличивается при уменьшении относительной глубины α за счет увеличения присоединенной массы и некоторого уменьшения характерного времени удара.

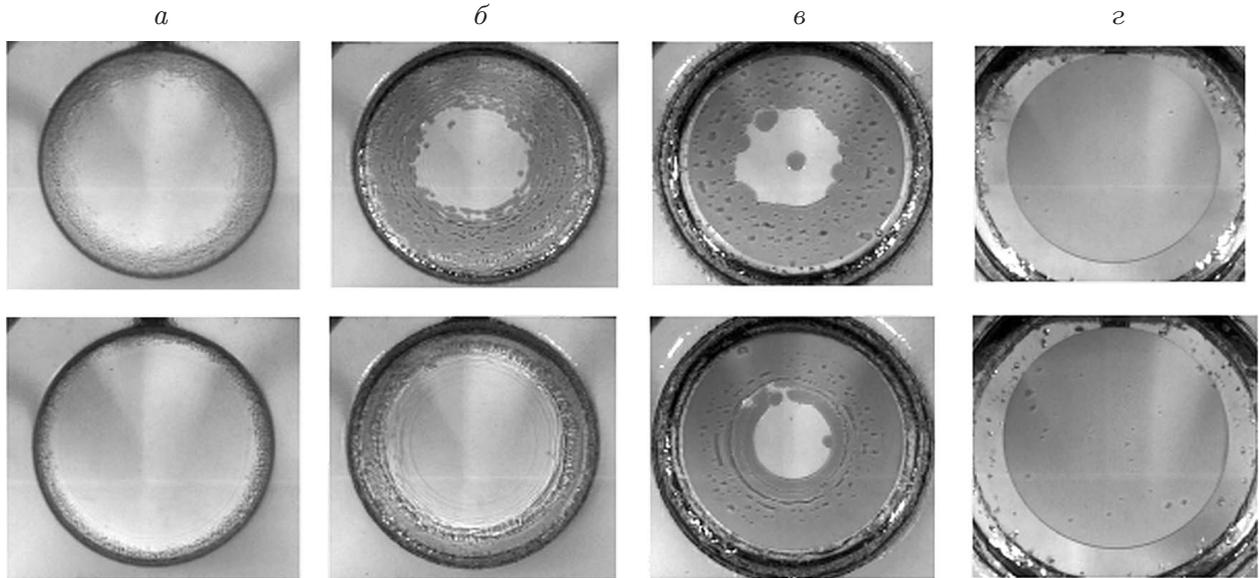


Рис. 4. Картины течения на различных стадиях удара плоского диска (*сверху*) и диска с вогнутой формой нижней поверхности (*снизу*) ($h = 3$ см, $H = 5$ см): *a* — $t_{imp} = 0$ (начальный размер захваченной воздушной каверны); *б* — $t_{imp} + 0,005$ с; *в* — $t_{imp} + 0,02$ с; *г* — $t_{imp} + 0,11$ с (фаза асимптотического безударного приближения дисков ко дну лотка)

В случаях дисков с плоской и вогнутой формами нижней поверхности осцилляции скорости после удара обусловлены пульсациями воздушной каверны, захватываемой нижней поверхностью диска в момент удара (см. рис. 2, б). На рис. 4 показаны характерные фазы разрушения каверны в случаях дисков с плоской и вогнутой формами нижней поверхности при $H = 5$ см, $h = 3$ см. Начало отсчета времени t_{imp} соответствует первому кадру, на котором зафиксирован контакт тела со свободной поверхностью жидкости (рис. 4, а). В обоих случаях с течением времени на поверхности каверны вследствие наличия сдвиговой неустойчивости формируются кольцевые быстрорастущие волновые возмущения (рис. 4, б, в). В случае тела с вогнутой формой нижней поверхности характерный пространственный масштаб возмущений наибольший. При увеличении магнитуды возмущений до величины, приблизительно равной толщине воздушной каверны, происходит распад кольцевых структур на отдельные пузырьки.

Следует отметить, что при ударе диска с выпуклой формой нижней поверхности о свободную поверхность жидкости также происходит захват воздушной каверны. Возможность такого эффекта теоретически исследована в [12–14]. На рис. 5 показана кинограмма эволюции воздушной каверны для диска с радиусом кривизны $R_+ = 100$ см при высоте падения $H = 8$ см и глубине жидкости $h = 3$ см. Видно, что диск с выпуклой формой нижней поверхности захватывает воздушную каверну, которая затем схлопывается с образованием сферического пузырька. В исследованном диапазоне параметров начальный радиус каверны является величиной порядка $10^{-2}R_+$, радиус пузырька — величиной порядка $10^{-3}R_+$ [14]. На начальном этапе схлопывания каверны на ее границе образуются пальцеобразные возмущения, являющиеся проявлением неустойчивости Рэля — Тейлора. Развитие этих возмущений приводит к формированию микропузырьков на нижней поверхности диска. При ударе диска о дно лотка микропузырьки становятся зародышами кавитационных явлений.

На рис. 2, а видно, что на этапе погружения диска в воду после удара о свободную поверхность кривые зависимости скорости тела от времени во всех трех случаях близки.

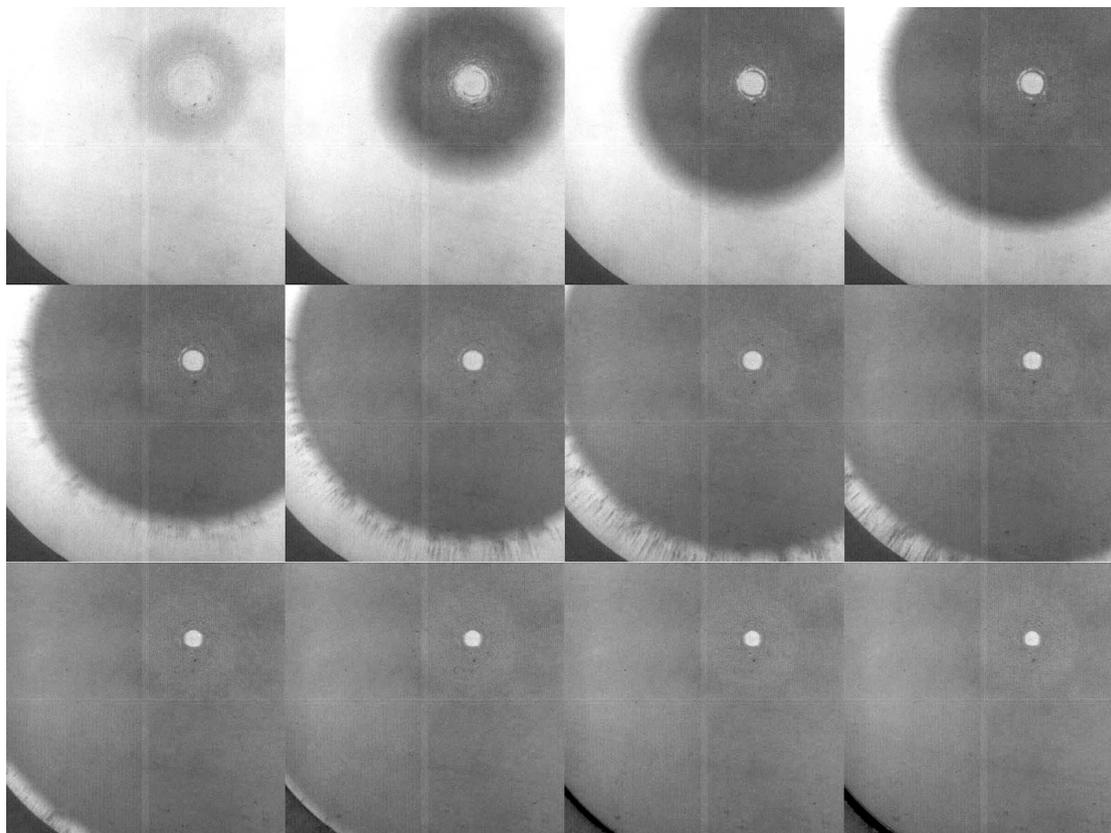


Рис. 5. Фазы соударения выпуклого диска со свободной поверхностью ($h = 3$ см, $H = 8$ см, $R_+ = 100$ см, время между кадрами — $1/4000$ с)

Однако когда диск приближается ко дну лотка, наблюдаются два существенно различающихся сценария. Диски с плоской и вогнутой формами нижней поверхности приближаются ко дну лотка безударно со скоростью, асимптотически стремящейся к нулю. В случае выпуклой формы нижней поверхности диска происходит его жесткий удар о дно лотка с последующим отскоком. Кинограмма удара такого диска о дно лотка показана на рис. 6. Этот удар сопровождается интенсивной кавитацией, длительность которой приблизительно равна $5 \cdot 10^{-3}$ с. Разрыв сплошности жидкости при кавитации является причиной различия между экспериментально наблюдаемым явлением жесткого удара диска с выпуклой формой нижней поверхности о дно и теоретическим сценарием этого соударения [15]. В работе [15] показано, что при выполнении уравнения неразрывности локально-сферическое тело в вязкой жидкости может приближаться к твердой плоской поверхности только асимптотически с конечной скоростью, равной нулю.

В проведенных экспериментах было измерено давление на дне лотка в точке, находящейся под центром тела (рис. 7). Данные получены при $h = 6$ см, $H = 5$ см. На рис. 7,а показаны результаты измерений в масштабе, охватывающем весь диапазон значений давления. На рис. 7,б масштаб изменен, чтобы показать пиковые значения давлений, действующих при ударе диска о свободную поверхность. Из рис. 7 следует, что для диска с выпуклой формой нижней поверхности максимальное значение давления достигается в момент приближения диска ко дну лотка, причем магнитуда давления на два порядка превышает пиковое значение давления при ударе такого диска о свободную поверхность. При отскоке диска от дна лотка давление резко уменьшается вплоть до достижения отрицательного значения.

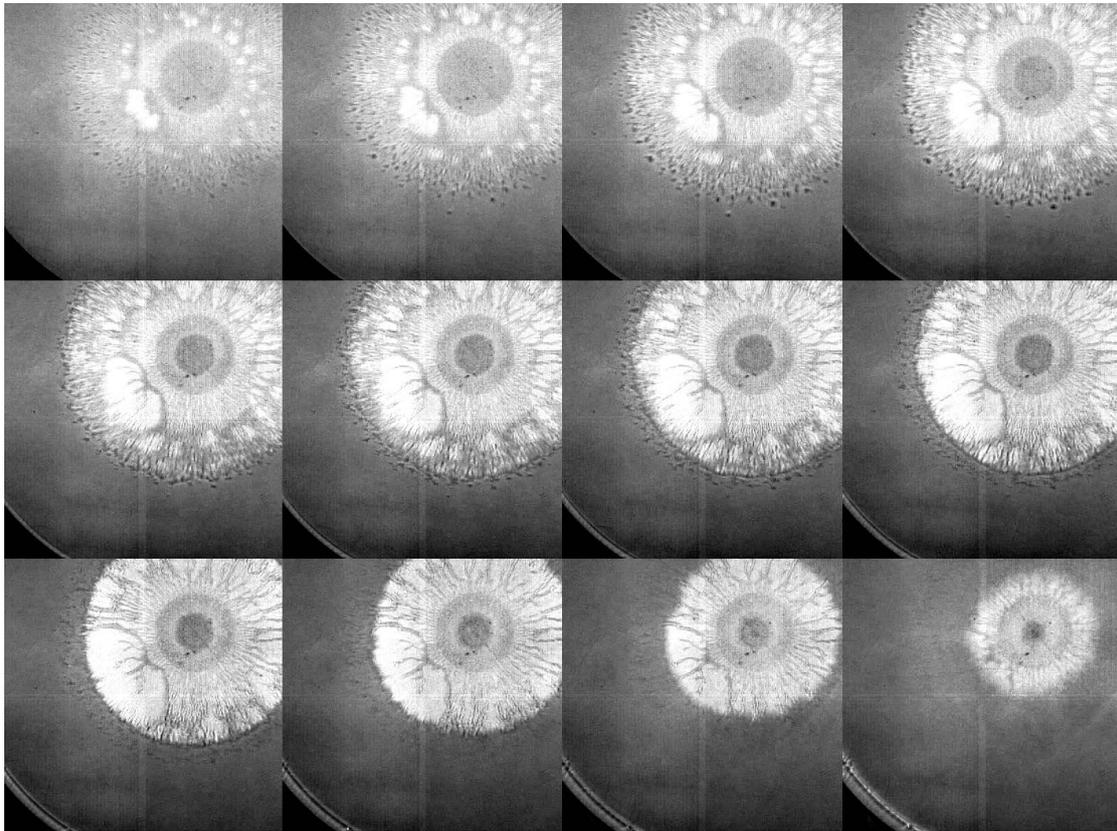


Рис. 6. Фазы развития кавитации при ударе диска с выпуклой формой нижней поверхности о дно лотка ($h = 3$ см, $H = 8$ см, $R_+ = 100$ см, время между кадрами — $1/4000$ с)

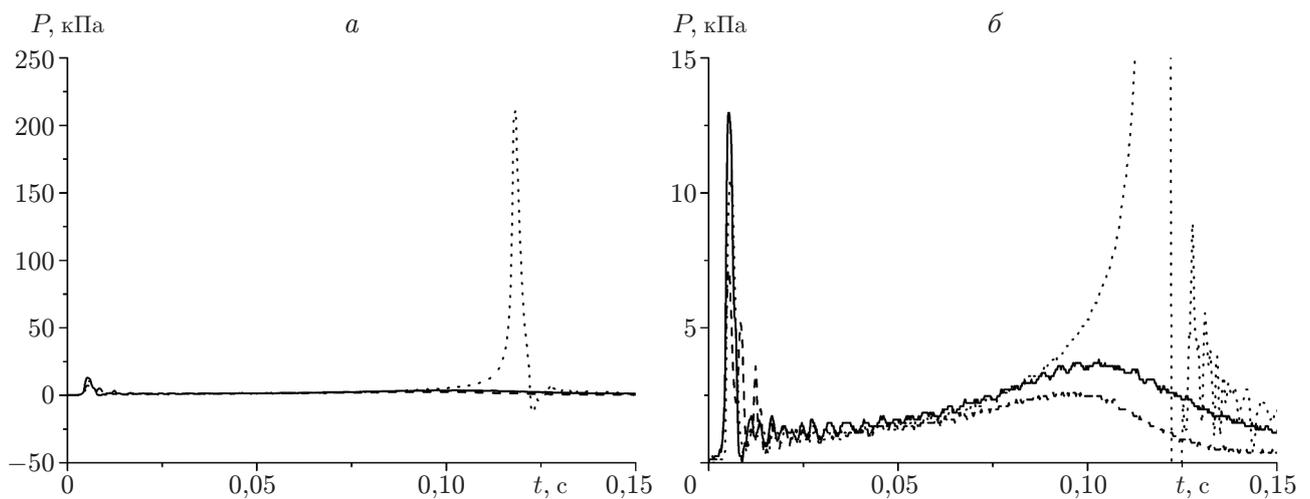


Рис. 7. Зависимость давления на дне лотка под центром диска с плоской (сплошные линии), вогнутой (штриховые) и выпуклой (пунктирные) формами нижней поверхности от времени ($h = 6$ см, $H = 5$ см, начало отсчета времени произвольное):

а — полный масштаб изменения величин, *б* — масштаб давлений, соответствующий удару о свободную поверхность

Для дисков с плоской и вогнутой формами нижней поверхности наибольшее значение давления на дне лотка достигается в момент удара диска о свободную поверхность. Следует отметить, что при соударении вогнутого диска со свободной поверхностью в исследованном диапазоне значений параметров наблюдаются три последовательных максимума давления, что приводит к существенному увеличению характерной длительности ударного импульса (см. рис. 2, *a*) и снижению максимального значения ускорения при ударе о свободную поверхность по сравнению со случаем удара диска, имеющего плоскую форму нижней поверхности.

Заключение. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования падения на мелкую воду круглых дисков, имеющих плоскую, выпуклую или вогнутую форму нижней поверхности. Показано, что малая кривизна нижней поверхности диска не оказывает существенного влияния на величину присоединенной массы. В случае диска с плоской формой нижней поверхности в исследованном диапазоне значений параметров присоединенная масса может быть достаточно точно оценена на основе теории [6]. Однако малая кривизна нижней поверхности диска может существенно (в несколько раз) увеличить характерное время удара о свободную поверхность жидкости и уменьшить величину возникающих при этом ускорений.

Во всех исследованных случаях наблюдается захват воздушной прослойки при ударе о свободную поверхность. В случае дисков с плоской и вогнутой формами нижней поверхности начальный диаметр прослойки приближенно равен диаметру диска. С течением времени воздушная прослойка разрушается от периферии к центру вследствие неустойчивости Кельвина — Гельмгольца.

В случае диска с выпуклой формой нижней поверхности происходит захват воздушной прослойки в центре диска. В исследованном диапазоне параметров радиус кривизны нижней поверхности диска на два порядка превышает начальный радиус воздушной прослойки, которая с течением времени схлопывается с образованием пузырька, расположенного под центром диска. При схлопывании воздушной прослойки наблюдается неустойчивость Рэлея — Тейлора: на начальном этапе схлопывания наружная граница кольцевого пятна контакта тела с жидкостью имеет форму окружности, а внутренняя — нерегулярную форму.

Знак кривизны нижней поверхности диска определяет характер соударения с дном лотка. Диски с плоскими и вогнутыми формами нижней поверхности приближаются ко дну лотка безударно с нулевой конечной скоростью. При ударе диска с выпуклой формой нижней поверхности о дно лотка происходит разрыв сплошности жидкости, наблюдается интенсивная кавитация.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Faltinsen O. M.** Hydrodynamics of high-speed marine vehicles. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006.
2. **Korobkin A. A., Pukhnachev V. V.** Initial stage of water impact // Annual Rev. Fluid Mech. 1988. V. 20. P. 159–186.
3. **Mizoguchi S., Tanizawa K.** Impact wave loads due to slamming — a review // J. Ship Technol. Res. 1996. V. 43. P. 139–151.
4. **Fugita Y.** Impact of a circular plate falling upon a water surface // J. Soc. Naval Architects Jap. 1954. V. 94. P. 105–110.
5. **Chuang S.-L.** Experiments on flat-bottom slamming // J. Ship Res. 1966. V. 10, N 1. P. 10–17.
6. **Чебаков М. И.** Падение круглого диска на мелкую воду // Прикл. математика и механика. 1974. Т. 38, № 3. С. 675–681.

7. **Korobkin A. A.** Impact of two bodies one of which is covered by a thin layer of liquid // J. Fluid Mech. 1995. V. 300. P. 43–58.
8. **Korobkin A. A.** Shallow-water impact problems // J. Engng Math. 1999. V. 35. P. 233–250.
9. **Howison S. D., Ockendon J. R., Oliver J. M.** Deep- and shallow-water slamming at small and zero deadrise angles // J. Engng Math. 2002. V. 42. P. 373–388.
10. **Howison S. D., Ockendon J. R., Oliver J. M.** Oblique slamming, planning and skimming // J. Engng Math. 2004. V. 48. P. 321–337.
11. **Ermanyuk E. V., Ohkusu M.** Impact of a disk on shallow water // J. Fluids Structures. 2005. V. 20. P. 345–357.
12. **Smith F. T., Li L., Wu G. X.** Air cushioning with lubrication/inviscid balance // J. Fluid Mech. 2003. V. 482. P. 291–318.
13. **Korobkin A. A., Ellis A. S., Smith F. T.** Trapping of air in impact between a body and shallow water // J. Fluid Mech. 2008. V. 611. P. 365–398.
14. **Hicks P. D., Purvis R.** Air cushioning and bubble entrapment in three-dimensional droplet impacts // J. Fluid Mech. 2010. V. 649. P. 135–163.
15. **Starovoitov V. N.** Behavior of a rigid body in an incompressible viscous fluid near a boundary // Free boundary problems. Basel: Birkhauser, 2004. P. 313–327. (Intern. Ser. of Numer. Math; V. 147).

Поступила в редакцию 16/II 2011 г.
