



Вынужденные колебания ледяных дисков при ударе¹

Епифанов В.П.^{*}, Гусева Е.К.^{*,**}

^{*}Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

^{**}Московский физико-технический институт, Долгопрудный

Удар рассматривается как переходной процесс, реакция льда на кратковременное воздействие, интерференция длинноволновых и коротковолновых возмущений [1–4]. В задаче о неупругом прямом ударе сферического индентора по ледяному диску, расположенном на массивной плите с возможностью смещения ледяного диска относительно опоры, исследуется влияние начальной температуры льда и разных энергий удара. Для изучения процессов неупругого удара применяется комплексный подход, основанный на расчётном (сеточно-характеристический, используемый также в [5]) и акустических методах [6]. Акустико-механический метод используется для получения мгновенных ускорений, по которым определяются, например, зависимости осевого мгновенного напряжения от глубины осадки. Для описания процесса удара используются упругопластические модели, а также идеи вычислительной техники расщепления по физическим процессам. Экспериментальные зависимости сопоставлены с модельными решениями. Рассмотрено формирование локальной вторичной структуры и текстуры льда, зависимости

упругих свойств от координат, температуры, выявлены особые точки на деформационной кривой, связанные с формированием трещин. Рассчитаны пространственные волновые картины. Параметры исследуемого льда определены экспериментально. Совместное действие нормальных, сдвиговых напряжений и температуры в промежуточном слое усиливает эффект метаморфизма льда. Далее приведены некоторые примеры.

При малой фиксированной энергии удара, но разных температурах наблюдается (Рис. 1) классическая картина изменения мгновенного ускорения индентора (синяя кривая) и частиц ледяной пластины в оппозитной точке на оси удара (красная кривая). Данные получены для температур -2°C и -10°C .

При высокой температуре (-2°C) наблюдается классическое изменение наклона: вначале соударения (упрочнение), затем — фазовый переход (в ядре) и упругопластическое деформирование. При низкой температуре (-10°C) симметричные ветви кривой характеризуют близкое к упругому поведение льда.

При большой фиксированной энергии удара (Рис. 2) наблюдается немонотонность в вершине кривой удара ($OABCDEF$), что соответствует неупругим деформациям и процессам изменения, эволюции структуры льда, в частности разрушению льда.

¹ Данная работа была выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-21-00384.

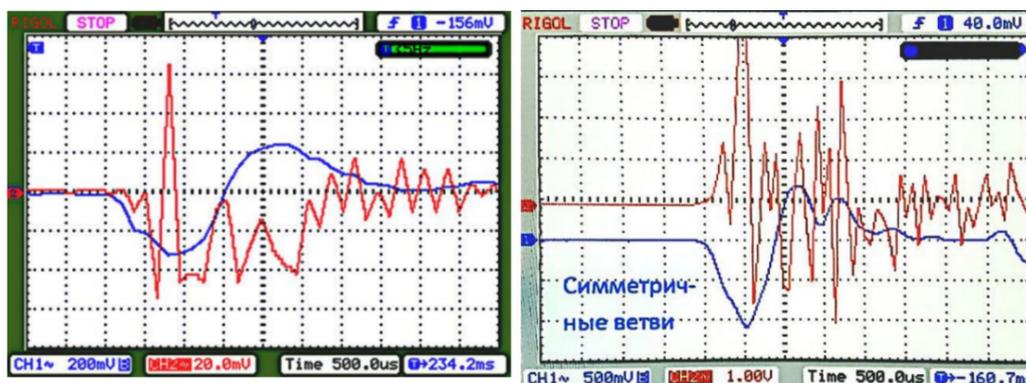


Рис. 1. Осциллограммы удара малой энергии при температурах льда -2°C (слева) и -10°C (справа) и периодические смещения частиц в оппозитной точке удара

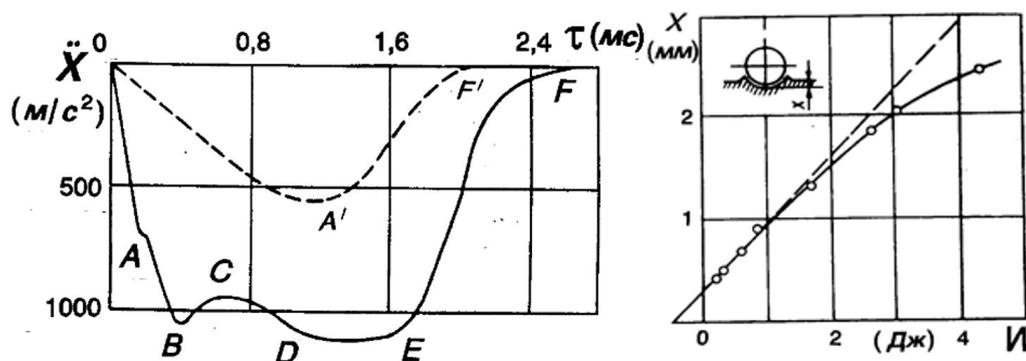


Рис. 2. Типичные зависимости ускорений от времени соударения для средних ($W < 1$ Дж) и больших энергий удара $OABCDEF$ ($W > 1$ Дж), а также зависимость осадки от энергии удара

Для рассматриваемого случая амплитуда деформационной кривой существенно возрастает, однако это возрастание не является пропорциональным, так как с увеличением энергии удара увеличиваются диссипативные потери.

Полученные экспериментальные факты представляют интерес для дальнейшего изучения механизма медленного удара по ледяному диску в части, касающейся влияния структуры переходного слоя и механизмов контактного разрушения, напряжений на границе контакта, а также количественного изучения влияния волновых эффектов на распределение усилий в массиве льда и формирование области пластических деформаций.

Список литературы

- [1] Gao Y., Hu Z., Ringsberg J. W., Wang J. An elastic-plastic ice material model for shipiceberg collision simulations // Ocean Engineering. 2015. V. 102. P. 27–39. doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.047.
- [2] Voigt W. Lehrbuch der Kristallphysik. Leipzig, Berlin, B.G. Teubner, 1910. 998 p.
- [3] Nakaya U. Visco-elastic Properties of Snow and Ice in Greenland Ice Cap // Journal of the Faculty of Science, Ser. II. 1958. V. 5(3). P. 119–164.
- [4] Zhang W., Li J., Li L., Yang Q. A systematic literature survey of the yield or failure criteria used for ice material // Ocean Engineering. 2022. V. 254. P. 111360. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.111360.
- [5] Guseva E.K., Beklemysheva K.A., Golubev V.I., Epifanov V.P., Petrov I.B. Investigation of Ice Rheology Based on Computer Simulation of Low-Speed Impact // In: Balandin, D., Barkalov, K., Meyerov, I. (eds) Mathematical Modeling and Supercomputer Technologies. MMST 2022. Communications in Computer and Information Science. Springer, Cham, 2022. V. 1750. P. 176–184. doi: 10.1007/978-3-031-24145-1_15.
- [6] Епифанов В.П., Лычёв С.А. Двойная периодичность механических свойств тонкого ледяного поля, сформированного в условиях бокового стеснения // Лёд и Снег. 2022. Т. 62(4). С. 591–606. doi: 10.31857/S2076673422040154.