

---

---

УДК 556.012,532.5-153.023,536.248.2

## ФОРМИРОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ ТАЮЩИМ ЛЕДЯНЫМ МАРКЕРОМ

© 2019 г. Е. В. Степанова<sup>1,\*</sup>, Т. О. Чаплина<sup>1,2,\*\*</sup>

<sup>1</sup> *Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

*\*e-mail: step@ipmnet.ru*

*\*\*e-mail: chaplina\_to@inbox.ru*

Поступила в редакцию 04.03.2019 г.

После доработки 10.03.2019 г.

Принята к публикации 19.03.2019 г.

Проведены лабораторные эксперименты, подтверждающие феномен самопроизвольного вращения тающего льда как на твердой подложке, так и на поверхности воды. Установлено, что скорость вращения увеличивается с температурой водоема. С использованием методики подкрашивания установлен факт возникновения вихревого течения непосредственно под ледяным блоком в экспериментах по размещению ледяного блока на свободной поверхности покоящейся жидкости. Зафиксированное вихревое течение порождает вращение льда. Измерены параметры возникающего вращения, а также установлено критическое значение глубины слоя покоящейся жидкости, необходимое для начала вращения ледяного блока.

*Ключевые слова:* лед, вихрь, течение, вращение

**DOI:** 10.1134/S0032823519030147

**Введение.** Таяние шельфовых ледников по нижней кромке в последние десятилетия привело к существенному увеличению потока массы от ледников в океан. Интерес представляют течения, возникающие на границе вода–лед в различных природных и рукотворных системах.

Течения в системах с горизонтальной границей между льдом и водой определяются силой плавучести, сдвиговыми напряжениями, составом воды и льда, а также шероховатостью и неоднородностью поверхности льда. Постановка лабораторного эксперимента упрощает задачу и сводит ее термодинамическую часть к задаче свободной конвекции под гладкой поверхностью раздела. Более того, задача (исключая момент вращения ледяного блока на твердой подложке) всегда состоит в исследовании системы с плоской границей раздела пресный лед–пресная вода. В известных аналогичных исследованиях в численной постановке установлено, что в подобных системах ледяной блок в большинстве случаев вращается [1].

Явления с вращением ледяных блоков (дисков) разных размеров – от единиц до сотни метров – также возникают на замерзших пресноводных водоемах (рис. 1 [2]). По данным из разных источников (см. [3–5]) следует заключить, что угловые скорости вращения таких ледяных дисков имеют порядок единиц градусов в секунду.

Механизм вращения ледяных дисков еще не достаточно изучен. В настоящей работе описаны эксперименты с ледяными дисками, размещенными на твердых горизонтальных поверхностях (алюминий, полиметилметакрилат, стекло, пенопласт, керамика) и на поверхности резервуара с покоящейся водой. Обнаружено, что ледяной диск



Рис. 1. Вращающиеся ледяные диски на поверхности замерзших водоемов [2].

начинает самопроизвольно вращаться в большинстве опытов. Наблюдения показали, что при помещении ледяного блока на поверхность воды под поверхностью раздела лед–вода образуется выраженное вертикальное течение, которое и служит причиной вращения.

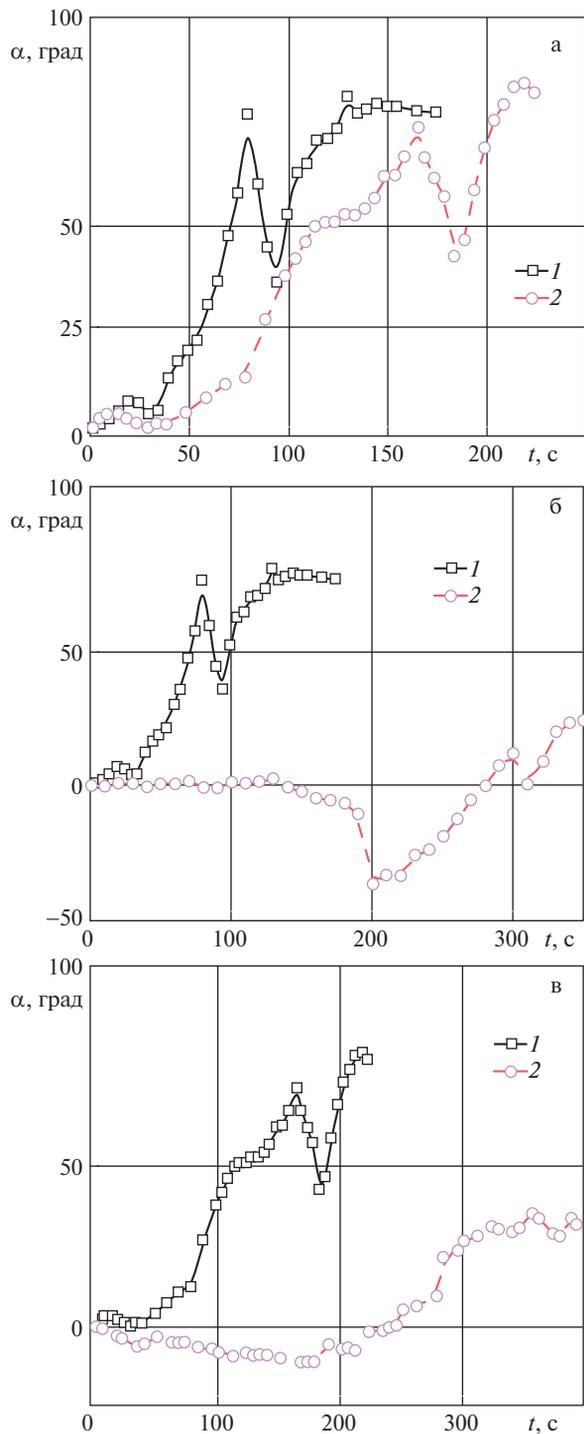
В дальнейшем в тексте слово “лед” будет обозначать замороженную отстоянную водопроводную пресную воду. В случае добавления в ее состав вспомогательных веществ при замораживании об этом будет упоминаться дополнительно.

**1. Вращение льда на твердых поверхностях.** В ходе экспериментов специально подготовленные ледяные блоки — круговые цилиндры высотой 0.5 см и диаметром 1 и 2 см — помещались на горизонтальную твердую поверхность (алюминий, полиметилметакрилат, стекло, пенопласт, керамика). Регистрация перемещения и вращения ледяных блоков облегчалась тем, что при подготовке внутрь вмораживается специальный маркер-указатель, и по изменению его ориентации легко отслеживать изменение положения, в том числе и углового, ледяного блока. Все эксперименты проводились при комнатной температуре (20°C), перемещения регистрировались видеокамерой, закрепленной на штативе. Во всех экспериментах зарегистрировано вращение цилиндрического ледяного блока вокруг вертикальной оси (см. рис. 2).

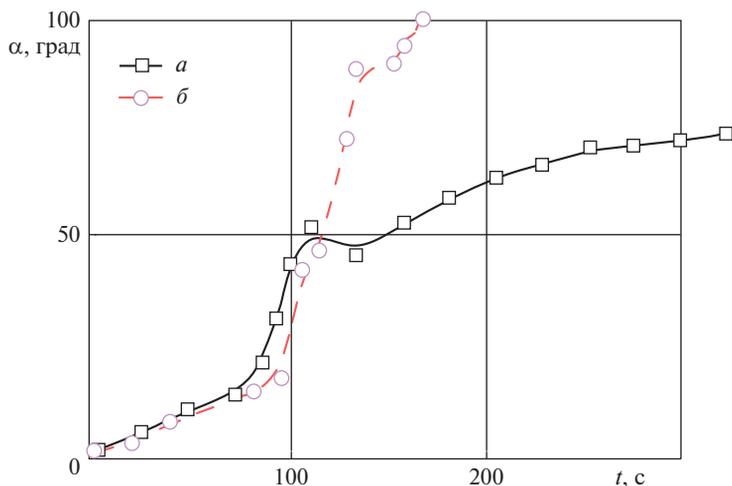
Во всех экспериментах преобладает циклоническое направление вращения (см. рис. 2), скорость вращения и количество полных оборотов, совершенных ледяным блоком, зависит как от материала подложки, так и от размера (массы) ледяного цилиндра. Чем меньше масса ледяного блока, тем большее количество оборотов вокруг собственной оси он успевает совершить до полного таяния. Характерной особенностью всех проведенных экспериментов можно назвать то, что происходит кратковременный срыв вращения в противоположную сторону (по часовой стрелке), а затем продолжается вращение с нарастанием угловой координаты. Следует также отметить, что при схожих теплоемкостях подстилающего материала все процессы существенно ускоряются с увеличением теплопроводности материала подложки (у алюминия теплопроводность выше на два порядка, чем у остальных использованных материалов).

Также были проведены экспериментальные исследования поведения цилиндрических ледяных маркеров на твердых поверхностях с тонким слоем углеводородов. На рис. 3 показана зависимость угла поворота ледяного цилиндрического маркера (диаметр 2 см, высота 1 см) помещенного на фарфоровую поверхность. Проведенные опыты показывают, что на поверхности с добавлением углеводородов лед тает и вращается быстрее.

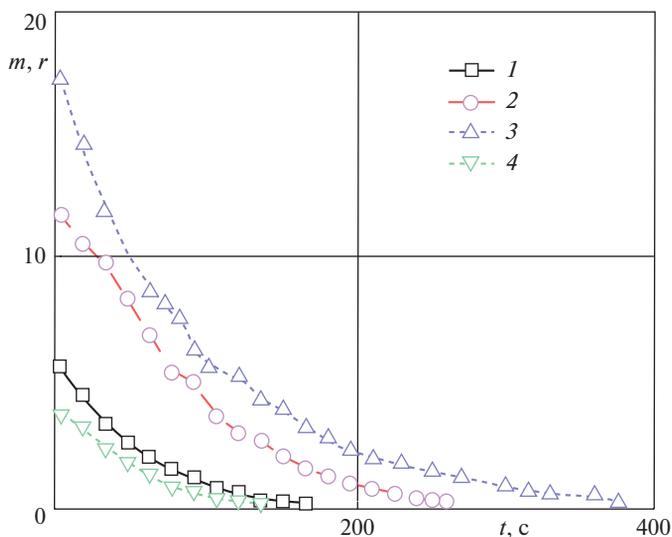
**2. Самопроизвольное вращение льда на поверхности воды.** Во многих источниках приводятся данные о вращении льда на поверхности пресной воды. Проведены эксперименты с целью выяснения параметров возникающего самопроизвольного враще-



**Рис. 2.** Зависимость угла поворота ледяного блока от времени: а – диаметр блока 1 см на подстилающей поверхности из алюминия (1) и фарфора (2); б – ледяные блоки диаметром 1 (1) и 2 (2) см на подложке из алюминия; в – ледяные блоки диаметром 1 (1) и 2 (2) см на фарфоровой подложке.



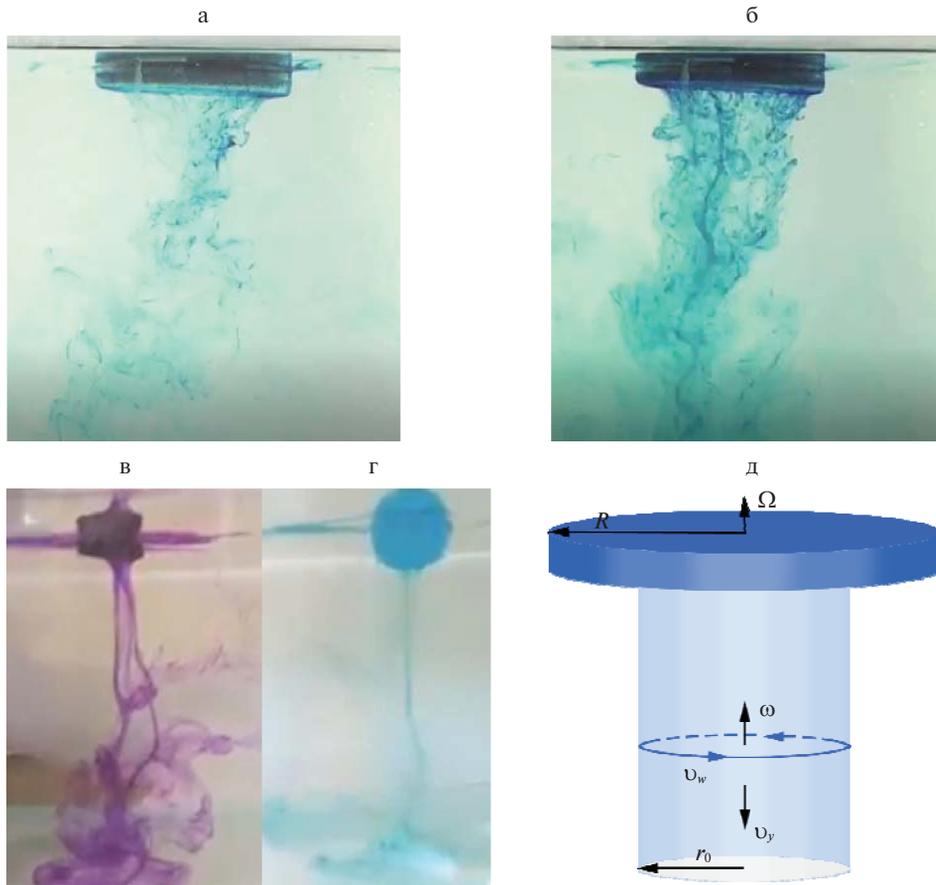
**Рис. 3.** Зависимость угла поворота ледяного цилиндрического маркера (диаметр 2 см, высота 1 см) помещенного на фарфоровую поверхность: а – чистую, б – с добавлением 10 мл бензина АИ-92.



**Рис. 4.** Уменьшение массы ледяного блока со временем: 1–4 начальные массы 17,2, 11,7, 5,6, 1,9 г соответственно.

ния льда. В ходе проведения исследований также выяснена динамика таяния льда – изменения массы ледяного маркера, помещенного на поверхность воды, при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  со временем. Графики на рис. 4 иллюстрируют уменьшение массы ледяного блока со временем.

Потеря массы носит экспоненциальный характер, и все графики с рис. 4 могут быть интерполированы экспоненциальными зависимостями со схожими коэффициентами (при переходе к безразмерной форме). Погрешности коэффициентов построенных

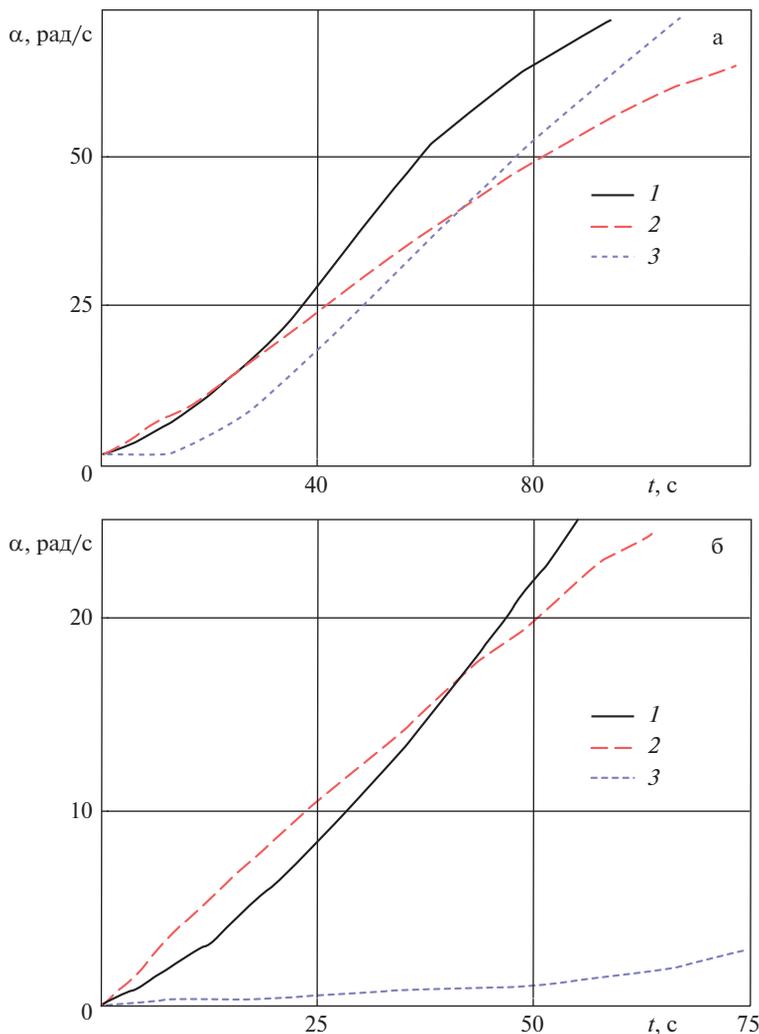


**Рис. 5.** Образование нисходящего течения и вихря под ледяным блоком на поверхности воды: а – г) вид сбоку для ледяных блоков различной окраски в различные моменты времени, д) схема течения.

интерполяций в виде  $m = m_0 \exp(-am_0t)$  для показателя степени  $a$  лежат в пределах 1% и уменьшаются с ростом начальной массы ледяного блока.

После размещения ледяного блока в форме кругового цилиндра на поверхности покоящейся воды наблюдалось его вращение. Маркеры из льда во всех случаях вращаются против часовой стрелки. Скорость вращения увеличивается с ростом температуры воды, при температуре воды в резервуаре 5°C и ниже вращение останавливается. Данный факт указывает на то, что механизм вращения льда на поверхности воды связан с аномалией плотности: максимальная плотность пресной воды достигается при 4°C.

Для визуализации течения, возникающего в толще жидкости под размещенным на поверхности воды ледяным блоком, в ходе замораживания в воду добавлялся краситель – его высвобождение при таянии льда служит индикатором возникающего течения. Данный сравнительно несложный эксперимент позволяет наблюдать образование вихревого течения непосредственно под ледяным блоком (рис. 5). Образование нисходящей вертикальной струи со скоростью  $v_y$  и вихря в жидкости приводит во вращение ледяной диск со скоростью  $\Omega$ .



**Рис. 6.** Зависимости углового положения ледяных блоков от времени: а) глубина воды 5 см, горизонтальные размеры ледяных блоков (1)–(3) 13, 20, 25 мм соответственно, рис. 6, (б) ледяной блок размером 20 мм, высота слоя жидкости (1)–(3) 10, 5, 3 см.

Механизм возникновения нисходящего течения тесно связан с указанной аномалией – охлажденная до  $4^{\circ}\text{C}$  вследствие таяния ледяного блока и перемешивания вода начинает погружаться. Непрерывный процесс таяния льда порождает непрерывный поток массы, направленный против вектора силы тяжести. Такое течение в направлении от диска вглубь жидкости служит основой для возникновения вихря непосредственно под тающим ледяным блоком, вследствие чего сам ледяной блок приходит во вращение.

В ходе проведенных экспериментов зарегистрировано вращение ледяных блоков разного размера на поверхности покоящейся жидкости (рис. 6, (а)), а также прослежена закономерность уменьшения частоты вращения ледяного блока с уменьшением толщины слоя покоящейся воды под ним – в частности в наших экспериментах при глубине жидкости 3 см вращение ледяного блока практически прекращалось (рис. 6, (б)).

Также наблюдалось заметное замедление вращения ледяных блоков при размещении их на поверхности покоящейся соленой воды

**3. Расчет скорости вертикального течения под ледяным блоком.** В отношении измерения скорости перемещения частиц может применяться модель тепловой струи. Поток плавучести  $P$  определяется в [6] как

$$P = \frac{Ag}{\rho_w c_p} Q, \quad (3.1)$$

где  $\rho_w$  и  $c_p$  – плотность воды и ее теплоемкость при постоянном давлении,  $A$  – коэффициент теплового расширения воды,  $g$  – ускорение свободного падения,  $Q$  – поток тепла. Этот поток тепла можно оценить, определив поток массы  $dm/dt$  ледяного диска, если учесть, что параллельно идут процессы нагревания от  $-5$  до  $0^\circ\text{C}$  и плавления льда, описываемые равенством:

$$Q = (\Lambda + C_{\text{ice}}\Delta T) \frac{dm}{dt}, \quad (3.2)$$

где  $\Lambda$  и  $C_{\text{ice}}$  – скрытая теплота плавления и удельная теплоемкость льда.

Для определения вертикальной скорости жидкости в центре нисходящей струи (см. [6, 7]) справедлива оценка

$$v_y \approx \left(\frac{P}{y}\right)^{1/3} \quad (3.3)$$

Для проведенных экспериментов с учетом проведенной интерполяции скорости таяния ледяных блоков разной начальной массы (см. рис. 4) получены оценки вертикальных скоростей, приведенные ниже

$m_0, \text{ г}$	1.9	5.6	11.7	17.2
$a \times 10^4$	212°	194	118	105°
$Q, \text{ Дж}$	0.0279	0.2052	0.5557	1.0561
$v_y, \text{ см/с}$	0.07	0.13	0.19	0.23

Здесь  $m_0$  – начальная масса ледяного блока  $m_0$ ,  $a$  – коэффициент в интерполяции динамики изменения массы ледяного блока  $m = m_0 \exp(-am_0 t)$ ,  $Q$  – поток тепла,  $v_y$  – значения вертикальной скорости. Обобщая имеющиеся соотношения, получим, что оценка вертикальной скорости может быть выполнена с использованием соотношения

$$v_y \approx \left(\frac{Ag}{\rho_w c_p y} (\Lambda + C_{\text{ice}}\Delta T)\delta m\right)^{1/3}, \quad (3.4)$$

где  $A = 1.5 \times 10^{-4}$ ,  $g = 10 \text{ м/с}^2$ ,  $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_p = 4200 \text{ Дж/(кг К)}$ ,  $C_{\text{ice}} = 2060 \text{ Дж/(кг К)}$ ,  $T = 20^\circ\text{C}$ , а характерные значения вертикального масштаба – от 3 до 10 см.

Полученные значения вертикальных скоростей согласуются с наблюдаемыми в ходе экспериментов.

**Заключение.** Исследовано спонтанное вращение ледяных блоков разных размеров, помещенных как на твердую поверхность (алюминий, полиметилметакрилат, стекло, пенопласт, керамика), так и на поверхность бассейна с покоящейся водой определенной глубины при заданной температуре. При плавлении ледяной блок служит источником вихревого течения, возникающего под его погруженной поверхностью. Предполагается, что определяющую роль в возникновении данного течения играет аномалия плотности пресной воды. В ходе экспериментов установлено, что скорость

вращения ледяного блока растет с температурой воды, на поверхность которой помещен блок. Его устойчивое вращение начинается при температуре воды 5°C и скорость вращения растет с ростом температуры воды в резервуаре. Также в экспериментах проведена оценка необходимой для начала вращения ледяного блока глубины жидкости – получено пороговое значение 3 см. При размещении ледяного блока на поверхности соленой воды вращение также оказывается более медленным, чем в опытах с пресной водой.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-01-00116).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Keitzl T., Mellado J.P., Notz D. Impact of thermally driven turbulence on the bottom melting of ice // *J. Phys. Oceanogr.* 2016. V. 46. P. 1171–1187.
2. [https://www.gazeta.ru/science/2017/01/11\\_a\\_10470881.shtml](https://www.gazeta.ru/science/2017/01/11_a_10470881.shtml)
3. Nordell B., Westerstrom G. Large rotating ice discs on ice-covered rivers // *Weather.* 1997. V. 52. P. 17–21.
4. Spinning ice disc phenomenon seen in British river for first time // *The Telegraph*, Jan. 2009. 13th.
5. Bates J.M. (1895) A revolving ice cake // *Sci. Amer.* 1895. V. 72. P. 85.
6. Cushman-Roisin B., Gualtieri C., Mihailovic D. Environmental Fluid Mechanics: Current issues and future outlook, P. 3–20, In: *Fluid Mechanics of Environmental Interfaces*. Boca Raton: CRC Press, 2015. 500 p.
7. Dorbolo S., Adami N., Dubois C. et al. Rotation of melting ice disks due to melt fluid flow // *Phys. Rev. E.* 2016. V. 93. P. 033112-1–033112-5.

#### Formation of a Vortex Flow by Melting Ice Block

E. V. Stepanova<sup>a, #</sup> and T. O. Chaplina<sup>a, b, ##</sup>

<sup>a</sup> *Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia*

<sup>b</sup> *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>#</sup> *e-mail: step@ipmnet.ru*

<sup>##</sup> *e-mail: chaplina\_to@inbox.ru*

Experiments have been carried out to confirm the phenomenon of spontaneous rotation of melting ice both on a solid substrate and on the water surface. It is found that the velocity of rotation increases with the temperature of the reservoir. With use of coloring technique, the fact of the vortex flow directly under the ice block was established in experiments on the ice block placement on the free surface of the liquid at rest. The registered vortex flow generates the rotation of the ice block. The parameters of the rotation are measured, and the critical value of the liquid layer which is necessary for the beginning of the ice block rotation is established.

*Keywords:* ice, vortex, flow, rotation

#### REFERENCES

1. Keitzl T., Mellado J.P., Notz D. Impact of thermally driven turbulence on the bottom melting of ice // *J. Phys. Oceanogr.*, 2016, vol. 46, pp. 1171–1187.
2. [https://www.gazeta.ru/science/2017/01/11\\_a\\_10470881.shtml](https://www.gazeta.ru/science/2017/01/11_a_10470881.shtml)
3. Nordell B., Westerstrom G. Large rotating ice discs on ice-covered rivers // *Weather*, 1997, vol. 52, pp. 17–21.
4. Spinning ice disc phenomenon seen in British river for first time // *The Telegraph*, 2009, Jan. 13th.
5. Bates J.M. A revolving ice cake // *Sci. Amer.*, 1895, vol. 72, pp. 85.
6. Cushman-Roisin B., Gualtieri C., Mihailovic D. Environmental Fluid Mechanics: Current issues and future outlook, pp. 3–20, In: *Fluid Mechanics of Environmental Interfaces*. Boca Raton: CRC Press, 2015, 500 p.
7. Dorbolo S., Adami N., Dubois C. et al. Rotation of melting ice disks due to melt fluid flow // *Phys. Rev. E*, 2016, vol. 93, pp. 033112-1–033112-5.