

Исследование процесса образования льда на горизонтальной охлажденной пластине

В горизонтальном слое воды с двумя жесткими границами изучен процесс образования льда на монотонно охлаждаемой пластине. Экспериментально измерены распределения температуры по высоте слоя. Измерения выполнены термометрами сопротивления, дающими усредненные в горизонтальной плоскости значения температуры на заданных уровнях. Обнаружено переохлаждение воды почти до -4°C . Установлено, что процессу образования гладкого прозрачного слоя льда предшествует образование дендритов в слое толщиной около 4–5 мм вблизи верхней холодной границы. В слое толщиной 33,7 мм обнаружено ослабление интенсивности конвективного течения при охлаждении воды до температуры ниже 4°C . Измерена скорость роста толщины слоя льда.

Слой воды заданной толщины находился в полости с горизонтальными размерами 240×240 мм. Горизонтальные границы слоя состоят из массивных медных пластин. Начальная температура системы была $25,4^{\circ}\text{C}$. В начальный момент времени включалось охлаждение нижней границы до 6°C . Верхняя граница охлаждалась прокачкой теплоносителя из криотермостата с установкой нижнего предела -15°C . Скорость охлаждения всей системы на начальном этапе составляла $0,2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. За счет слабого подогрева снизу в слое воды в течение первых 150 мин наблюдалось конвективное течение. В режиме рэлей-бенаровской ячейистой конвекции формируется профиль температуры с обратным градиентом в центральной части по высоте слоя. При достижении значения температуры на верхней границе 4°C конвективное течение практически исчезало. Под холодной верхней границей при дальнейшем охлаждении формируется все более толстый слой устойчиво стратифицированной жидкости. Процесс кристаллизации при данной высоте слоя начинается при практически отсутствующем конвективном течении.

Ключевые слова: *термогравитационная конвекция, нестационарное поле температуры, переохлаждение воды, образование льда.*

К практически важным приложениям, стимулирующим исследования явления плавления льда и затвердевания пресной и соленой воды, относятся природные и технологические процессы. В природных условиях эти процессы актуальны с точки зрения экологических проблем и в рамках развития фундаментальных основ климатологии. Исследования процессов образования льда начались с основополагающей работы Стефана [1]. Формирование ледового покрова в природных условиях было и остается объектом многочисленных исследований [2–5]. Анализ результатов исследований природных процессов неизбежно приводит к выводу о необходимости лабораторных экспериментальных исследований с высоким пространственно-временным разрешением и параллельных теоретических исследований задач сопряженного теплообмена в системе вода – лед, осложненных наличием фазового перехода и необходимостью учета инверсии плотности воды в области $0-4^{\circ}\text{C}$. Этого требуют и многочисленные технические и технологические проблемы. Поэтому изучались гидродинамика и теплообмен в слоях воды и вблизи границ раздела вода – лед различной ориентации. Результаты исследований

конвекции в средах с максимумом плотности (вода при $T = \pm 8^{\circ}\text{C}$) имеются, например, в работах [6–11].

В Институте теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН проводятся исследования структуры ламинарно-турбулентного перехода в режимах естественной и смешанной конвекции в однофазных системах и при наличии кристаллизации легкоплавких веществ [12–14]. Данная работа проведена с целью исследования нестационарного процесса образования льда у верхней холодной горизонтальной границы, изучения поля температуры и структуры течения вблизи фронта кристаллизации.

Экспериментальный стенд и методики измерений

Блок-схема стенда показана на рис. 1. Горизонтальный слой воды 1 высотой $H = 33,7$ мм снизу и сверху ограничен медными пластинами 2, 3 толщиной 12,8 мм. Медные пластины являются рабочими частями теплообменников, в полостях которых прокачиваются горячий и холодный теплоносители. По периметру слой воды ограничен вертикальными оргстеклянными стенками толщиной 30 мм.

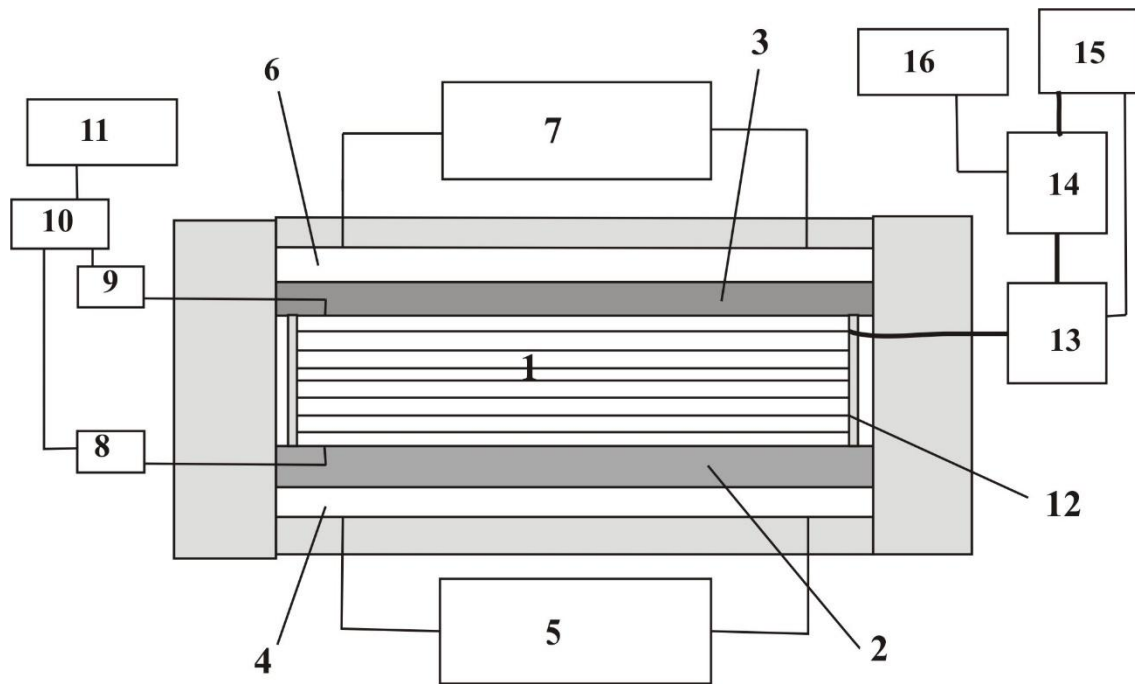


Рис. 1. Блок-схема экспериментального стенда:

1 – вода; 2 – нижняя медная пластина; 3 – верхняя медная пластина; 4 – полость нижнего теплообменника; 5 – термостат; 6 – полость верхнего теплообменника; 7 – криотермостат; 8 и 9 – цифровые вольтметры Ц300 для измерения сигналов с термопар на медных пластинах; 10 – контроллер К1; 11 – персональный компьютер; 12 – зонд из 17 термометров сопротивления; 13 – релейный коммутатор; 14 – мультиметр 34420А; 15 – контроллер К2; 16 – персональный компьютер

Горизонтальные размеры слоя воды – 240×240 мм. Температурный режим в рабочем пространстве кюветы 1 задается двумя жидкостными термостатами ТС1 5 и ТС2 7, которые соединены с теплообменниками 4 и 6.

Через нижний теплообменник 4 прокачивалась нагретая вода из термостата 5. Температура воды в термостате может поддерживаться с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$ в диапазоне от 1 до 30°C . Через верхний теплообменник 6 прокачивался антифриз из криотермостата 7. Температура антифриза в криотермостате может поддерживаться с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$ в диапазоне от -25 до $+30^\circ\text{C}$. Все подводящие трубки от термостатов к теплообменникам были теплоизолированы слоем поролона, что обеспечило устойчивую работу системы задания и поддержки температурных граничных условий на медных пластинах, ограничивающих слой воды. Температура медных пластин

измерялась термопарами. Температура пластин измерялась и записывалась в процессе всего эксперимента. Точность ее измерения составила $0,025^\circ\text{C}$, время дискретизации (интервал перехода от датчика к датчику) – 2 с. Распределение температуры в жидкости по высоте слоя определялось с помощью проводочных термометров сопротивления, изготовленных из медной проволоки диаметром 0,1 мм и длиной 40 см. Был изготовлен специальный зонд 12, состоящий из 17 медных проводочков, натянутых параллельно дну и верхней медной пластине на фиксированных расстояниях от дна (табл. 1).

Тарировка всех термометров сопротивления проведена при двух температурах: $T=0^\circ\text{C}$ и $T=25,445^\circ\text{C}$, причем при $T=0^\circ\text{C}$ определено сопротивление каждого датчика. Экспериментально определен температурный коэффициент сопротивления датчиков $\alpha = 0,004245 \text{ 1/K}$. Точ-

Таблица 1

Номер датчика	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Высота положения датчика z, мм	32,7	30,4	29,0	27,4	25,8	24,3	22,7	21,1	19,5	13,7	12,1	8,9	7,3	5,7	4,7	3,1	1,5

ность определения температуры термометрами сопротивления составила $\pm 0,03^\circ\text{C}$ в диапазоне температур от -10 до $+30^\circ\text{C}$.

Зонд из 17 проволочных датчиков температуры (см. рис. 1) через 20-канальный релейный коммутатор 13 подключен к цифровому прецизионному мультиметру 34420A 14 по четырехпроводной схеме. Мультиметр соединен с персональным компьютером 16 по интерфейсу RS-232 (COM-порт) и опрашивается с помощью фирменного программного обеспечения. Управление коммутатором производится специально разработанным контроллером К2 15, который последовательно подключает датчики 12 к мультиметру при получении от него сигнала конца измерения. Сигналы с проволочных датчиков записывались в процессе всего эксперимента циклично, со временем дискретизации $\Delta t \approx 2$ с. Длительность цикла опроса всех 20 датчиков составляет 46 с. Время измерения одного канала определяется быстродействием мультиметра и составляет 2 с. Температуры верхней 3 и нижней 2 стенок кюветы измеряются термопарами, холодные спаи которых помещены в термостат (0°C). ТермоЭДС термопар (чувствительность – $40 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$) измеряется цифровыми вольтметрами Ц300 8, 9 с разрешением 1 мкВ . Вольтметры с доработанной цифровой частью подключены к контроллеру К1 10 и передают результаты измерений по интерфейсу RS-232 (COM1) в персональный компьютер 11. Для синхронизации измерений всех датчиков температуры каждое измерение

сопровождается записью в выходные файлы значений текущего времени.

Порядок проведения эксперимента

В рабочий объем устанавливался зонд с термометрами сопротивления. Верхний теплообменник предварительно был выставлен на необходимом расстоянии от дна, задавая толщину слоя воды, с помощью микровинтов, опирающихся на боковые стенки. Установка заполнялась дистиллированной водой так, чтобы не было пузырей воздуха под верхним теплообменником и чтобы уровень воды в полости был выше заданной высоты слоя на 2–4 см. Таким образом, зазор между верхним теплообменником и боковыми стенками был заполнен водой. Сигнальные провода от термопар и термометров сопротивления выводились через этот зазор.

Стартовым состоянием жидкости было почти изотермическое распределение температуры в полости, заполненной водой. Включалась система записи информации и термостаты, выставленные на заданные температуры. Начальная температура теплоносителя в термостатах была близка к комнатной. В процессе эксперимента проводилась съемка рабочего объема воды через боковую стенку при дополнительной подсветке осветителем. Блок-схема визуального наблюдения за процессом образования льда и за конвективным течением в экспериментах с визуализацией приведена на рис. 2.

Фотографирование через равные интервалы времени проводилось после начала образования льда и в процессе роста льда. По по-

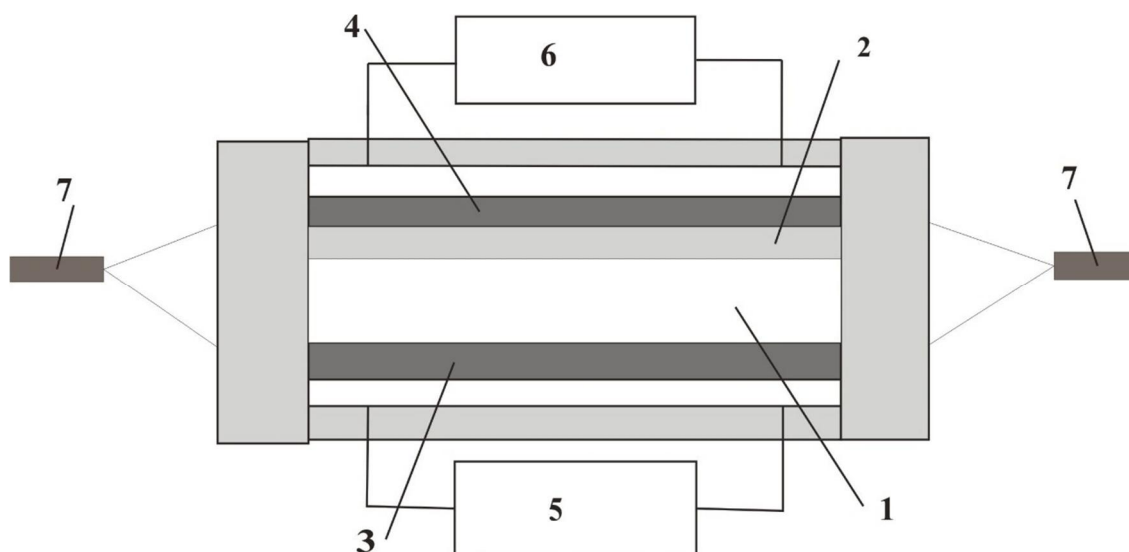


Рис. 2. Блок-схема визуального наблюдения:

1 – вода; 2 – лед; 3 – нижняя медная пластина; 4 – верхняя медная пластина; 5 – термостат; 6 – криотермостат; 7 – лазер

лученным фотоснимкам определялась толщина образовавшегося льда, а также скорость его роста. Полученная информация обрабатывалась на персональном компьютере.

Полученные результаты

На рис. 3 представлены зависимости от времени температуры верхней медной пластины (кривая 1), нижней медной пластины (кривая 2) и разности температуры между пластинами (кривая 3). Первые 35 мин жидкость находилась в изотермическом состоянии при температуре 25,4 °С. Затем наблюдалось охлаждение пластин приблизительно по линейному закону. Верхняя пластина (крышка) охлаждалась со скоростью 0,19 °С/мин, нижняя пластина (дно) – 0,113 °С/мин. Нижняя пластина через 120 мин охлаждения вышла в стационарный режим с температурой приблизительно 6 °С, которая оставалась постоянной до конца эксперимента. Верхняя пластина через 125 мин охлаждения достигла температуры $T_1 = 0$ °С. Продолжая охлаждаться с меньшей скоростью, приблизительно равной 0,07 °С/мин, она достигла минимальной температуры $T_1 = -3,75$ °С в момент времени 195 мин от начала эксперимента. В этот момент происходит почти мгновенное повышение температуры до 0 °С.

Здесь следует отметить, что термопара, измеряющая температуру медной пластины, приклеена к рабочей поверхности пластины клеем «Момент». Показания термопары соответствуют, скорее, температуре приповерхностного тонкого слоя воды, но не температуре объема медной пластины.

Далее до конца эксперимента верхняя пластина равномерно охлаждалась со скоростью 0,025 °С/мин и к концу эксперимента достигла температуры $T_1 = -1,55$ °С. Перепад температуры между пластинами ведет себя достаточно сложным образом. В интервале времени от 50 до 150 мин наблюдается линейный рост перепада температуры со скоростью 0,025 °С/мин. Далее перепад температуры растет с большей скоростью и в момент времени 195 мин от начала эксперимента достигает максимума, равного $\Delta T = 9$ °С. Далее наблюдается почти мгновенный спад до $\Delta T = 6$ °С и линейный рост со скоростью 0,025 °С/мин до перепада температуры $\Delta T = 7,5$ °С к концу эксперимента.

На рис. 4 приведены зависимости осредненной по горизонтали температуры воды от времени для 17 датчиков температуры. Линейные термометры сопротивления расположены на фиксированных расстояниях от дна. Соответ-

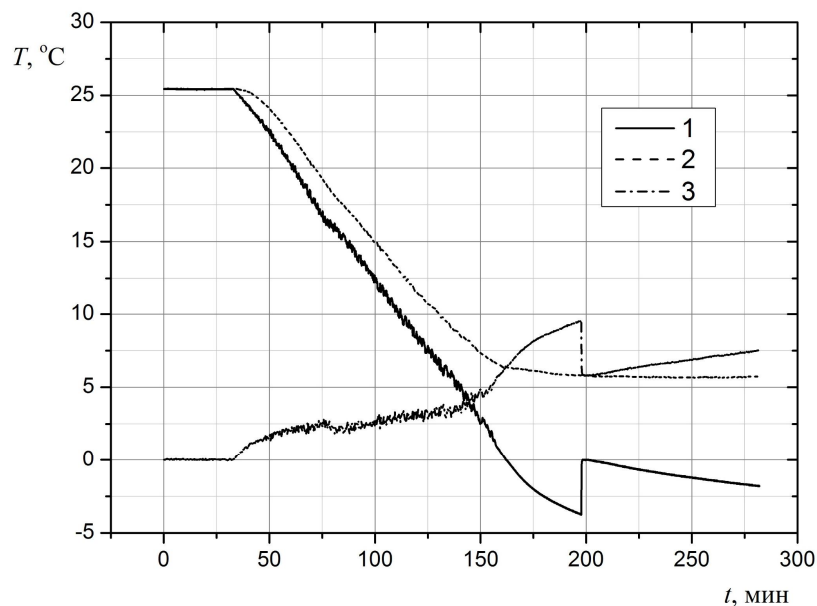


Рис. 3. Зависимости от времени температуры теплообменников:
1 – верхнего холодного; 2 – нижнего горячего; 3 – перепад температуры между границами слоев жидкости

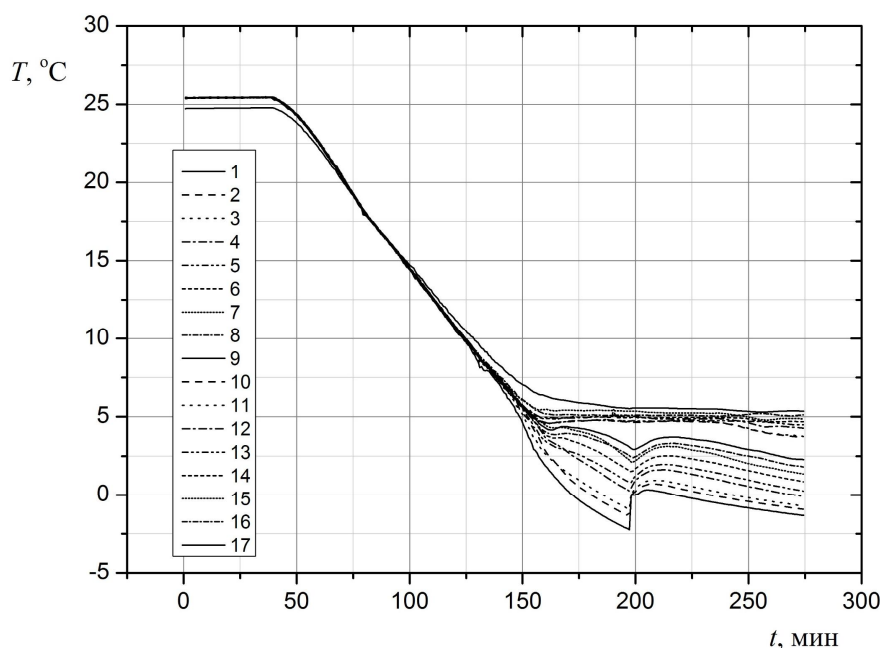


Рис. 4. Зависимости осредненной по горизонтали температуры воды от времени (см. табл. 1)

ствие номера линии определенной высоте z положения термометра приведено в табл. 1.

На рис. 5 приведен профиль температуры в момент времени $t = 128$ мин. Видно, что профиль температуры типичен для термогравитационной конвекции в горизонтальном слое жидкости при подогреве снизу. Средняя температура слоя несколько выше средней температуры, рассчитанной по температурам медных пластин $(T_1 + T_2) / 2$, это связано с тем, что процесс квазистационарный: происходит медленное охлаждение, но конвективное течение

успевает создавать характерный профиль температуры. Следует отметить, что профиль меняется, когда часть жидкости имеет температуру ниже 4°C .

В момент времени, равный примерно 120 мин от начала эксперимента, начинается расслоение температуры по высоте слоя воды, нижняя группа линий (10–17 на рис. 4) почти выходит на постоянную температуру в области 5°C , верхняя группа линий (1–9 на рис. 4) значительно расходится. К моменту времени 195 мин жидкость в верхней части слоя (в об-

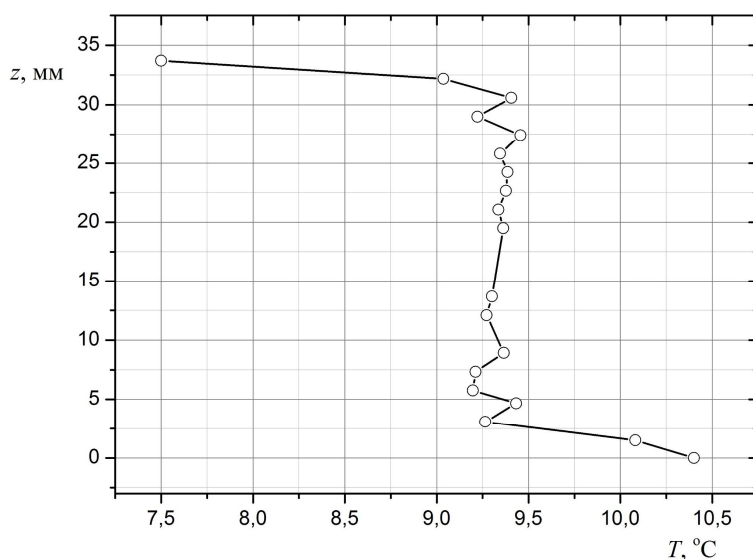


Рис. 5. Распределение температуры по высоте слоя в момент времени $t = 128$ мин

ласти $19 \leq z \leq 32,7$ мм) расслоена по температуре с перепадом в 5°C от 3 до $-2,2^\circ\text{C}$. Особо следует отметить, что три линии (1–3 на рис. 4), которые соответствуют самым верхним датчикам в объеме воды, перешли границу в 0°C и опустились в область отрицательных температур. Самый верхний датчик (линия 1) достиг температуры $-2,4^\circ\text{C}$, второй и третий – температуры $-1,25$ и $-1,0^\circ\text{C}$ соответственно. Четвертый датчик приблизился к температуре 0°C . В момент времени 196 мин температура самых верхних датчиков (линии 1–3) почти мгновенно возросла до 0°C и далее, продолжая более плавно возрастать, достигла максимума, а затем спала почти линейно со скоростью $0,025^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Максимумы температуры для разных датчиков достигаются в разное время: чем глубже расположен датчик, тем это происходит позднее. Температура датчиков, расположенных ниже (линии 4–9), в этот же момент плавно возрастает, достигает максимума и приблизительно с постоянной скоростью линейно убывает. Особо следует отметить, что температура верхнего датчика (кривая 1, $z = 32,7$ мм) сразу после резкого спада остается постоянной и равной 0°C довольно длительное время

(приблизительно 2 мин). Более заглубленные датчики этой особенности не фиксируют. Поведение температуры на нижних датчиках (линии 11–17) особенностей в момент времени 196 мин от начала эксперимента не проявляет. Датчик, находящийся на уровне $z = 13,7$ мм (линия 10), выявляет аналогичное поведение температуры от времени, но амплитуда изменения мала – порядка $0,1^\circ\text{C}$.

На рис. 6 изображен фрагмент графика, приведенного на рис. 4. Соответствие номера линии определенной высоте положения термометра приведено в табл. 1.

На рис. 7 приведены вертикальные профили температуры в слое воды для различных моментов времени. Соответствие номера линии определенному моменту времени наблюдения приведено в табл. 2. В профили добавлены значения температуры на верхней и нижней пластинах. Нижняя пластина находится на уровне $z = 0$ мм, верхняя – на уровне $z = 33,7$ мм, равном высоте слоя рабочей жидкости. Линия 1 (сплошная линия) соответствует времени $t = 189,6$ мин, т.е. до момента резких изменений температуры ($t = 196$ мин). При высотах больше $28,5$ мм наблюдается отрицательная температура воды, т.е. формируется

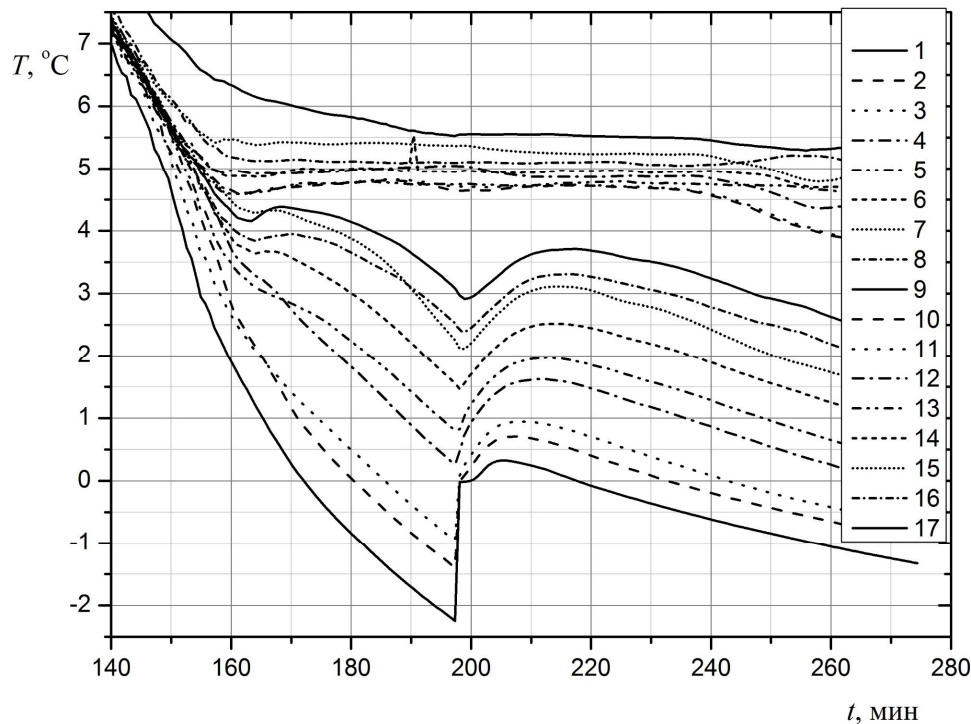


Рис. 6. Зависимости осредненной по горизонтали температуры воды от времени (фрагмент графика, изображенного на рис. 4)

Таблица 2

Номер линии	1	2	3	4	5	6	7
Момент времени t , мин	189,6	198,1	203,5	228,9	240,5	258,2	272,1

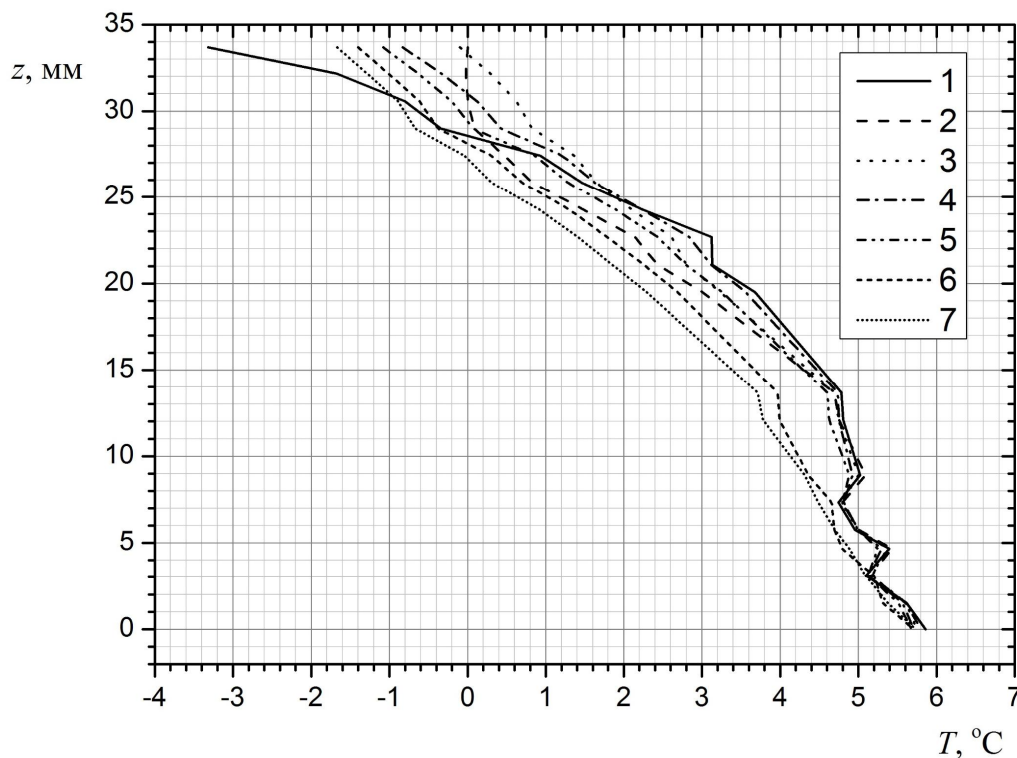


Рис. 7. Вертикальные профили температуры в слое воды для различных моментов времени (см. табл. 2)

слой переохлажденной воды. Второй профиль (линия 2) измерен в момент времени 198,1 мин, т.е. почти сразу после резких изменений температуры в верхней части объема воды. Можно отметить, что приповерхностный слой воды $z > 30$ мм имеет температуру $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, что говорит о наличии в нем дендритов льда (шуги). Профили, приведенные для времен $t > 200$ мин (линии 3–7), показывают, что температура приповерхностной области постепенно становится отрицательной. К концу эксперимента область отрицательных температур начинается с уровня 27 мм.

В процессе всего эксперимента проводилось визуальное наблюдение за процессом кристаллизации чистой воды без добавки частиц-трассеров, которые в других экспериментах вводились для визуализации конвективного течения. Сразу после резкого повышения температуры ($t = 196$ мин) появляются дендриты, занимающие область около верхней медной стенки, толщиной около 4–5 мм. Дендриты длиной порядка 5 мм редки, отстоят

друг от друга на расстоянии 2–4 см. Мелкие дендриты покрывают всю поверхность медной пластины. Через некоторое время, приблизительно 3–4 мин, дендриты исчезают, и появляется тонкий слой льда на поверхности верхней медной пластины. В течение всего дальнейшего эксперимента толщина льда увеличивается.

В ходе всего эксперимента проводилось фотографирование рабочего слоя воды. После начала образования льда съемка велась с интервалом 2–8 мин.

На рис. 8 приведен пример результатов съемки в один из промежуточных моментов времени. После обработки полученной информации в графическом редакторе была определена толщина слоя льда в разные моменты времени.

На рис. 9 приведена зависимость толщины слоя льда от времени. Началом отсчета времени для этого графика взят момент времени резкого изменения температуры. Определена средняя скорость роста льда $V = 0,0088$ мм/мин.

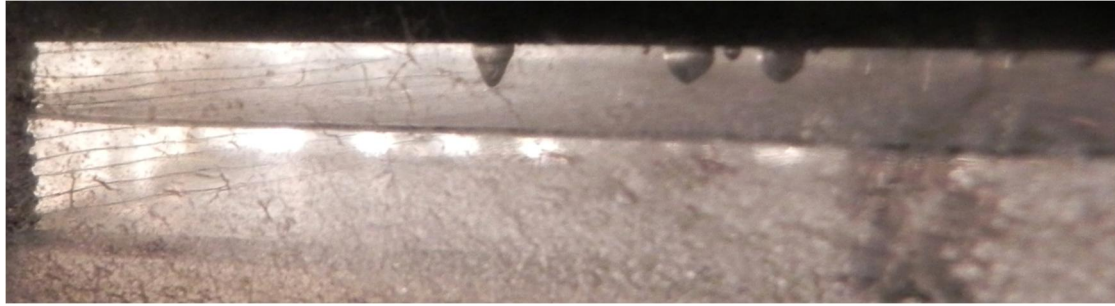


Рис. 8. Кадр процесса роста льда (видны проволочки и пузырьки воздуха внутри льда)

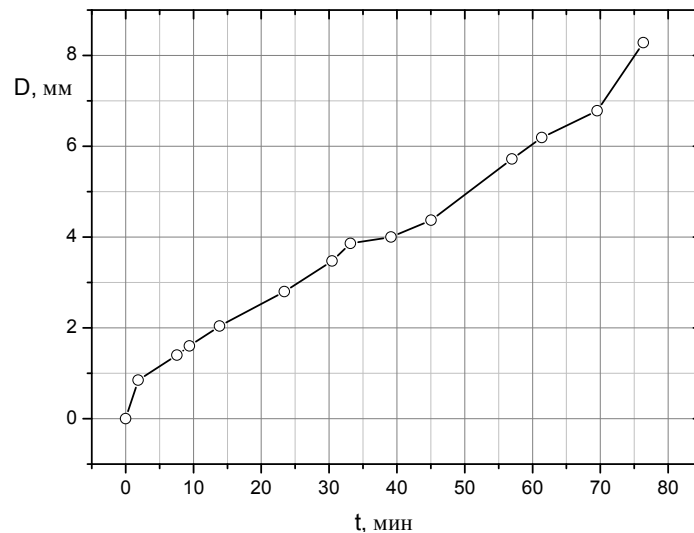


Рис. 9. Зависимость толщины льда от времени

Выводы

1. Вблизи холодной верхней медной пластины перед образованием льда вода охлаждается до температуры, равной приблизительно -4°C .

2. Сразу после появления дендритов, занимающих область около верхней медной стенки, толщиной около 4–5 мм резко повышается температура. Дендриты размером порядка 5 мм редки, отстоят друг от друга на расстоянии 2–4 см. Мелкие дендриты покрыва-

ют всю поверхность медной пластины. Через некоторое время, приблизительно 3–4 мин, дендриты исчезают и появляется тонкий слой гладкого льда на всей поверхности верхней медной пластины.

3. Когда температура воды вблизи верхней пластины охлаждается ниже 4°C , гравитационная конвекция исчезает и вертикальные профили температуры становятся не характерными для случая конвективного режима в горизонтальном слое, подогреваемом снизу.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке СО РАН (проект III.18.2.5, гос. рег. 01201350443) и РФФИ (грант № 15-08-07991).

Библиографический список

1. Stefan J. Über die Theorie der Eisbildung, insbesondere über Eisbildung im Polarmeere // Ann. Physik. 1891. 3rd Ser. Vol. 42. P. 269–286.
2. Christopher R. Ellis, Heinz G. Stefan, Ruochuan Gu. Water temperature dynamics and heat transfer beneath the ice cover of a lake // Limnology and Oceanography. 1991. Vol. 36 (2). P. 324–335.
3. Leppäranta M. A review of analytical sea ice growth models // Atmosphere – Ocean. 1993. Vol. 31 (1). P. 123–138.
4. The Thermal Structure of a Shallow Lake in Early Winter // M.P. Petrov, A.Yu. Terzhevnik, R.E. Zdorovenov, G.E. Zdorovenova // Water Resources. 2006. Vol. 33. № 2. P. 135–143.

5. Measurements and modelling of the water – ice heat flux in natural waters // Proceedings of the 18th IAHR International Symposium on Ice. 2006. P. 85–91.
6. Roy S. Free convection in liquids under maximum density conditions // Indian J. Phys. 1972. Vol. 46. № 6. P. 245–249.
7. Gebhart B., Bendell M.S., Shauleatullah H. Buoyancy-induced flows adjacent to horizontal surfaces in water near its density extremum // Int. J. Heat Mass Transfer. 1979. Vol. 22. P. 132–149.
8. Робиллар Вассер. Нестационарный теплообмен при естественной конвекции воды с учетом эффектов максимума плотности и переохлаждения // Теплопередача. 1981. № 3. С. 149–156.
9. Инаба Фукуда. Экспериментальное исследование свободной конвекции в заполненной водой наклонной прямоугольной полости при температурах, соответствующих окрестности экстремума плотности // Теплопередача. 1984. № 1. С. 107–114.
10. Зубков П.Т., Климин В.Г. Численное исследование естественной конвекции чистой воды вблизи точки инверсии плотности // МЖГ. 1999. № 4. С. 171–176.
11. Александров Д.В., Низовцева И.Г. Нестационарная кристаллизация воды с двухфазной зоной при турбулентных и нетурбулентных граничных условиях // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физ.-мат. науки. 2010. № 1. С. 133–142.
12. Тепловизионные исследования ламинарно-турбулентного перехода в Рэлеи-Бенаровской конвекции / В.С. Бердников, В.А. Гришков, К.Ю. Ковалевский, В.А. Марков // Автометрия. 2012. Т. 48. № 3. С. 111–120.
13. Berdnikov V.S., Getling A.V., Markov V.A. Wavenumber selection in Rayleigh-Benard convection: Experimental evidence for the existence of an inherent optimal scale // Exper. Heat Transfer. 1990. Vol. 3. P. 269–288.
14. Бердников В.С., Марков В.А. Теплопередача и статистические характеристики поля температуры в горизонтальном подогреваемом снизу слое жидкости // Изв. АН БССР. Сер. Физ.-энерг. науки. 1986. № 1. С. 96–102.

V.S. Berdnikov, V.A. Markov

Ice Formation Investigation on a Horizontal Cooled Plate

Abstract. In the horizontal layer of water with two rigid boundaries, the formation of ice on a monotonically cooled plate has been studied. The temperature distribution along the height of the layer was measured experimentally. The measurements are made by resistance thermometers, which give averaged values of the temperature in the horizontal plane at given levels. Subcooling of water was found almost to -4°C . It is established that the formation of a smooth transparent layer of ice is preceded by the formation of dendrites in a layer about 4-5 mm thick near the upper cold boundary. In a layer 33.7 mm thick, the intensity of the convective flow was attenuated when the water was cooled to a temperature below 4°C . The rate of the ice layer thickness growth is measured.

The water layer of a given thickness was located in a cavity with horizontal dimensions of $240 \times 240 \text{ mm}^2$. The horizontal boundaries of the layer consist of massive copper plates. The initial temperature of the system was 25.4°C . At the initial time, cooling of the lower boundary to 6°C was included. The upper limit was cooled by pumping the coolant from the cryostat with a lower limit of -15°C . The cooling rate of the entire system at the initial stage was $0.2^{\circ}\text{C} / \text{min}$. Due to weak heating from below, a convective flow was observed in the water layer during the first 150 min. In the Rayleigh-Benard cell-convection mode, a temperature profile is formed with a reverse gradient in the central part along the height of the layer. When the temperature reached the upper limit of $+4^{\circ}\text{C}$, the convective flow practically disappeared. Under the cold upper boundary, upon further cooling, an increasingly thick layer of a stably stratified liquid forms. The crystallization process at a given layer height begins with a practically absent convective flow.

Key words: *thermo gravitational convection; nonstationary temperature field; water super-cooling; ice formation.*

Бердников Владимир Степанович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института теплофизики имени С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, профессор кафедры прикладной математики НГТУ. E-mail: berdnikov@itp.nsc.ru

Марков Владимир Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика» СГУПСа. E-mail: vmarkov@ngs.ru