

Об аномалиях естественной конвекции воды в окрестности 3.98°C

© Л.Н. Батуров, И.Н. Говор

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
141570 Менделеево, Московская область, Россия
e-mail: levbaturov@ya.ru

(Поступило в Редакцию 17 марта 2015 г. В окончательной редакции 30 июня 2015 г.)

Обнаружено, что процесс естественной конвекции воды в цилиндрической полости с открытой поверхностью в окрестности 3.98°C (температуры максимальной плотности воды) сопровождается характерными аномалиями на временных зависимостях температуры разных слоев воды. Так, в придонной области контейнера наблюдается процесс стабилизации значений T_{st} температуры, длительность t_{st} которого в зависимости от условий проведения эксперимента может достигать нескольких часов. На примере водных растворов хлорида натрия и этанола показано, что при достаточно малой скорости охлаждения воды значения T_{st} совпадают со значениями T_{max} температуры максимальной плотности растворов.

Введение

Общеизвестно, что вода — необычная жидкость, имеющая десятки аномалий [1], самая известная из которых — наличие максимума плотности при $T_{max} = 3.98^{\circ}\text{C}$. Очевидным следствием его наличия, наблюдаемом при естественной конвекции воды, вызванной ее охлаждением или нагревом, является взаимопротивоположное направление вращения конвекционных потоков в областях температур с $T > T_{max}$ и с $T < T_{max}$. Однако до появления работы [2] был неясен механизм изменения направления вращения этих потоков при непрерывном переходе значений температуры из одной области в другую. Авторы [2] на примере конвекции в цилиндрическом контейнере показали, что поток противоположного направления зарождается вблизи 4°C в виде вихря в придонной угловой области объема воды. Наличие такого вихря, замыкающего на себя весь конвекционный поток и постепенно распространяющегося вверх, а затем сверху вниз, обуславливает появление на временных зависимостях $T(t)$ температуры характерных аномалий: длительную стабилизацию ее значений в придонной области контейнера и скачкообразное их изменение вблизи поверхности. Данные исследования проводились в полностью закрытом контейнере, верхняя и нижняя крышки которого были теплоизолированы от охлаждаемой стенки, при этом авторы отмечали, что детали наблюдаемого явления существенно зависят от условий проведения эксперимента.

Целью настоящей работы было более детальное исследование аномалий на кривых $T(t)$ вблизи 4°C при наблюдении процесса конвекции в более, по нашему мнению, естественных условиях — в цилиндрических контейнерах при свободном контакте воды с атмосферой. Температура воды измерялась, как правило, тремя миниатюрными термоэлементами Pt100, расположенными на геометрической оси контейнера соответственно на расстояниях H от его дна, равных 5, 50 и 95 mm и работающими в комплекте с многоканальным цифровым термометром. Значения температуры, измеряемые

с интервалом в 10 s (с погрешностью $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$), архивировались с последующей выгрузкой в Microsoft Office Excel. Были исследованы зависимости температуры T дистиллированной воды от времени t при ее охлаждении и нагреве. В экспериментах с охлаждением контейнер с залитой в него водой помещался в термокамеру с отрицательной температурой. При этом первоначальная температура воды не контролировалась и могла быть любой в интервале от 15 до 25°C . В опытах с нагреванием вода предварительно охлаждалась вместе с контейнером примерно до 0°C ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) и ее нагрев осуществлялся естественным путем при комнатной температуре. В обоих случаях скорость изменения температуры задавалась степенью изоляции контейнера и характеризовалась временным интервалом $t_{0.1}$, в течение которого температура воды менялась на 0.1°C на прямолинейном участке кривой $T(t)$. Начальные измерения проводились при значениях $t_{0.1}$ в диапазоне 100–250 s.

Результаты экспериментов

1. Было обнаружено, что и при нагреве, и при охлаждении воды в окрестности 4°C кривые $T(t)$ воспроизводимо демонстрируют аномальный процесс изменения температуры с одинаковыми характерными особенностями (рис. 1, 2): в придонных слоях наблюдается процесс стабилизации температуры, в поверхностных — скачкообразное ее изменение, а в центре — первый процесс сменяется вторым. При этом обращает на себя внимание тот факт, что по сравнению с [2] при нашей постановке эксперимента аномалии оказываются более выраженными. Это, в частности, проявляется в 6-кратном увеличении длительности Δt_{st} процесса стабилизации температуры в придонных слоях, что и позволило исследовать аномалии более детально. Следует также отметить, что распределение температуры в разных слоях воды до аномалий (т.е. выше 5°C при охлаждении и ниже 3°C при нагреве) устанавливается в результате естественной конвекции: при охлаждении/нагреве более

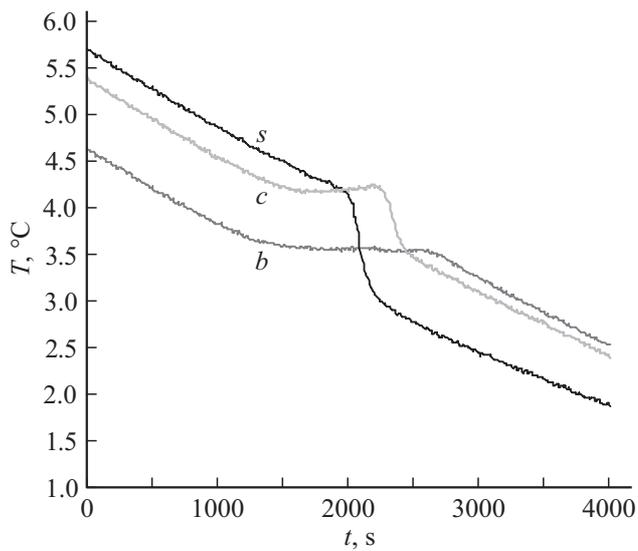


Рис. 1. Характер временных зависимостей температуры воды в разных ее слоях при охлаждении: *s* — вблизи поверхности, *c* — в центре исследуемого объема, *b* — вблизи дна.

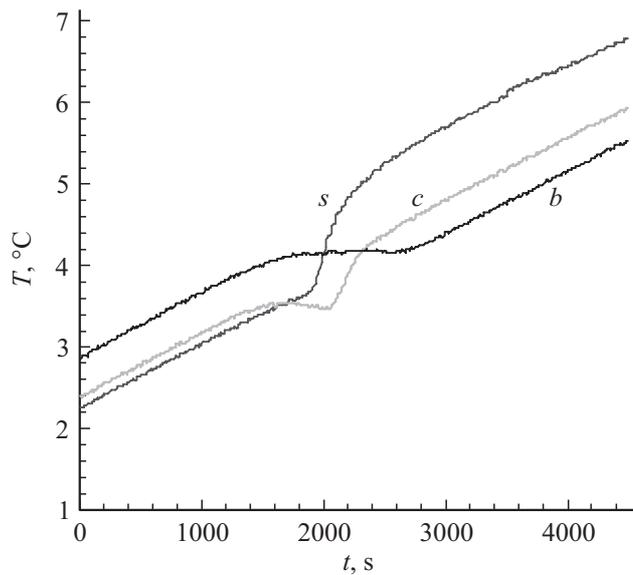


Рис. 2. Характер временных зависимостей температуры воды в разных ее слоях при нагреве: *s* — вблизи поверхности, *c* — в центре объема, *b* — вблизи дна.

холодная/теплая вода вблизи стенок контейнера опускается вниз, выталкивая более теплую/холодную воду вверх. В результате при одинаковой степени изоляции вокруг контейнера в разных слоях воды до появления аномалий реализуется распределение температуры, представленное на рис. 1, 2. Создавая же разную степень изоляции вблизи поверхности воды и у основания контейнера, мы могли не только задавать разные значения $t_{0.1}$, но и в определенных пределах реализовывать при одном и том же значении $t_{0.1}$ разности температур $\Delta T_{sb} = T_s - T_b$ в поверхностных (T_s) и придонных (T_b)

слоях воды разной величины и наблюдать происходящие при этом изменения характеристик аномального процесса. Поскольку аномальный процесс зарождается в придонных слоях, основными его характеристиками, очевидно, являются величина T_{st} , при которой начинается стабилизация значений температуры T_b в придонных слоях, и длительность t_{st} периода этой стабилизации. Изучение зависимости указанных характеристик от значений ΔT_{sb} и $t_{0.1}$ проводилось при охлаждении воды. Данный способ изменения температуры имеет ряд преимуществ по сравнению с его альтернативой: проще реализуются значения $t_{0.1} < 100$ s (при предельной температуре в камере минус 30–35°С и ниже) и $\Delta T_{sb} < 0^\circ\text{C}$ (рис. 3); благодаря большому интервалу температур от комнатных значений до аномальной области снимаются ограничения на значения начальной температуры воды. Выяснилось, что в интервале значений разности $\Delta T_{sb} = \pm 1^\circ\text{C}$ длительность процесса стабилизации t_{st} остается неизменной, но проявляет тенденцию к увеличению при $\Delta T_{sb} = 2^\circ\text{C}$. Большую величину перегрева при высоте столба h исследуемой воды, равной 100 mm, трудно было осуществить. С целью изучения изменения значений t_{st} при большей величине столба воды h и более значительной разнице температур мы использовали цилиндрический контейнер диаметром 50 mm и высотой 430 mm, что обеспечило значение $h = 420$ mm. Значения температуры T_s и T_b измерялись термоэлементами Pt 100. В этих условиях к моменту стабилизации температуры в придонной области удалось создать разность $\Delta T_{sb} = 9^\circ\text{C}$, что привело к увеличению значения t_{st} до 9500 s. Уменьшение разности ΔT_{sb} сопровождалось пропорциональным сокращением длительности стабилизации. Все полученные результаты сведены в таблицу. Как видно из приведенных данных, во всех описанных

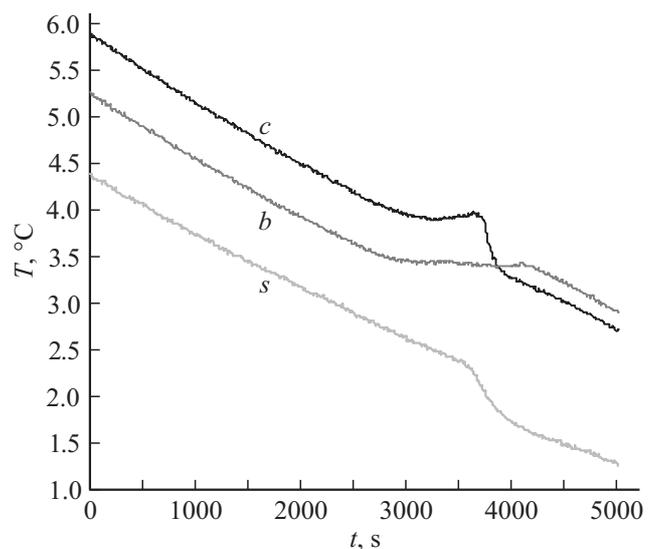


Рис. 3. Характер временных зависимостей температуры воды в разных ее слоях при переохлаждении поверхностных слоев: *s* — вблизи поверхности, *c* — в центре объема, *b* — вблизи дна.

Взаимосвязь параметров аномальной конвекции при разных высотах h водного столба при его охлаждении

Параметры	$h = 100 \text{ mm}$				$h = 420 \text{ mm}$		
	$\Delta T_{sb}, ^\circ\text{C}$	-0.9	0	1	2	0.6	4
t_{st}, s	1250	1260	1240	1460	1620	4930	9500
$T_{st}, ^\circ\text{C}$	3.95	4.0	3.9	3.9	4.0	4.0	3.5
$t_{0.1}, \text{s}$	165	240	110	110	174	184	30

случаях существенной зависимости значений T_{st} от величины ΔT_{sb} не наблюдается, но явно проявляется связь ее значений с величинами $t_{0.1}$, выяснение которой явилось целью дальнейших исследований.

2. Зависимость T_{st} от $t_{0.1}$ изучалась в контейнере с $V = 650 \text{ ml}$ при охлаждении и нагреве и разности температур $\Delta T_{sb} \sim 1^\circ\text{C}$. Было обнаружено, что, несмотря на полное подобие проявлений аномалий на кривых $T(t)$, наблюдаемых (рис. 1, 2) при охлаждении и нагреве воды, зависимости $T_{st}(t_{0.1})$ оказались различными для разных способов изменения температуры (рис. 4). Другим важным результатом является то, что при оптимальной скорости охлаждения ($t_{0.1} = 150\text{--}200 \text{ s}$) значения T_{st} совпадают (в пределах погрешности $\pm 0.05^\circ\text{C}$) с 3.98°C — температурой максимальной плотности T_{max} чистой воды. Как показали дальнейшие исследования, указанное равенство значений T_{st} и T_{max} справедливо и для водных растворов. Вслед за авторами работы [3], использовавшими аномалии на кривых $T(t)$ вблизи T_{max} для определения ее значений в некоторых водных растворах, мы проделали аналогичную работу при нашей, значительно более простой геометрии опыта. В качестве объектов исследования были выбраны растворы

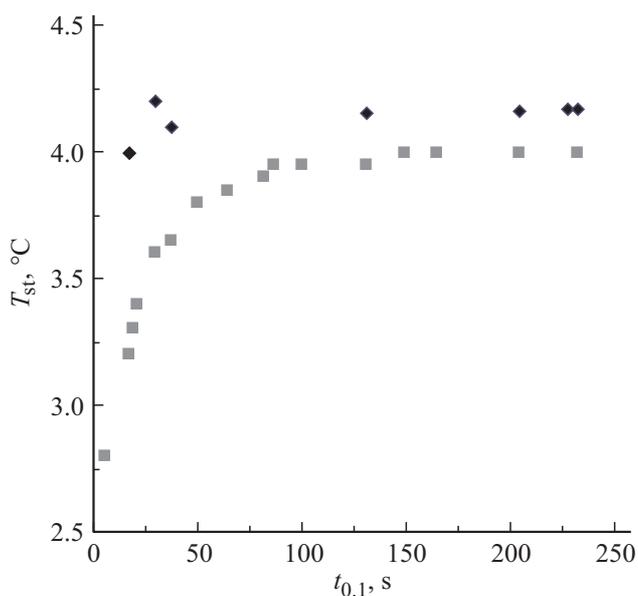


Рис. 4. Зависимость значений температуры стабилизации T_{st} от скорости охлаждения воды: ромбы — при нагреве, квадраты — при охлаждении.

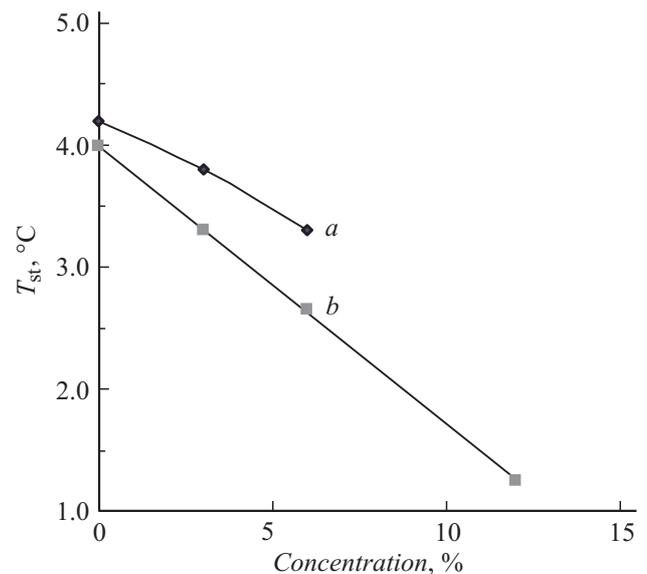


Рис. 5. Зависимости значений температуры стабилизации T_{st} от концентрации раствора Na—Cl, полученные при его охлаждении (квадраты) и нагреве (ромбы). Прямая b — зависимость значений температуры максимальной плотности $T_{max}(\rho)$ от концентрации раствора [3].

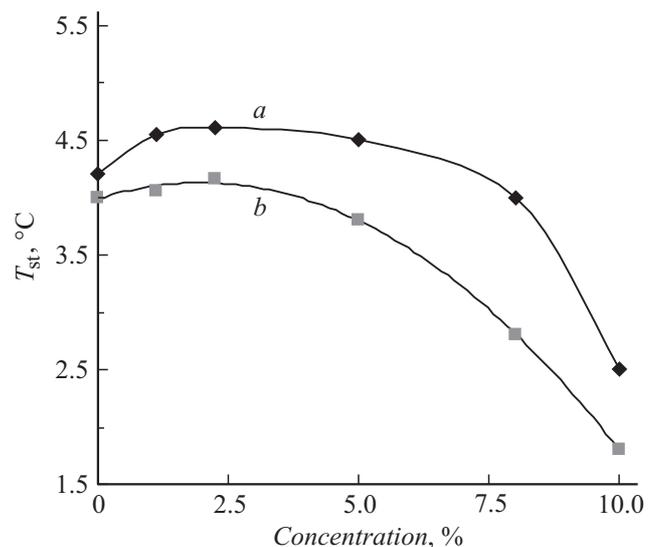


Рис. 6. Зависимости значений температуры стабилизации T_{st} от концентрации раствора этанола, полученные при его охлаждении (квадраты) и нагреве (ромбы). Сплошная кривая b — зависимость значений температуры максимальной плотности $T_{max}(\rho)$ от концентрации раствора [3].

Na—Cl и этанола с известными зависимостями $T_{max}(\rho)$ значений T_{max} от концентрации раствора ρ -линейной для первого и нелинейной для второго. Оказалось, что значения температуры стабилизации T_{st} , наблюдаемые при охлаждении этих растворов, в точности совпадают со значениями $T_{max}(\rho)$, полученными в [3] (рис. 5, 6).

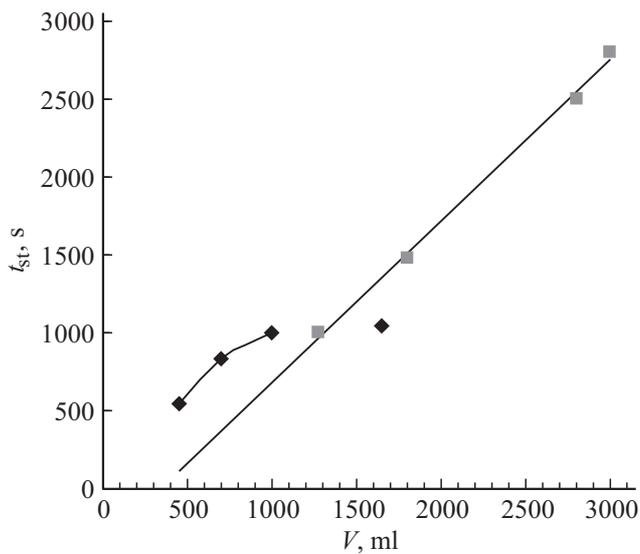


Рис. 7. Зависимости длительности t_{st} стабилизации температуры исследуемой воды от ее объема в контейнерах разного диаметра при постоянной высоте столба (ромбы), равной 65 мм, и при постоянном диаметре (квадраты) контейнера, равном 150 мм.

Во всех вышеприведенных опытах какой-либо зависимости t_{st} от $t_{0,1}$ не наблюдалось.

3. Была также изучена зависимость длительности стабилизации t_{st} от объема воды в двух вариантах: при одинаковой величине высоты $h = 65$ мм столба воды и одинаковой величине диаметра контейнера $D = 150$ мм. Во всех случаях значения ΔT_{sb} поддерживались вблизи 1°С. Оказалось, что в первом случае значения t_{st} не зависят от объема в области его больших величин и уменьшаются, начиная с некоторой его величины (рис. 7, ромбы). Во втором случае (рис. 7, квадраты) зависимость $t_{st}(V)$ имеет линейный характер и ее экстраполяция к значению $t_{st} = 0$ дает критическое (при данной величине диаметра) значение объема в 300 мл, в котором явление стабилизации температуры в придонных слоях уже не наблюдается. При этом следует отметить, что значения T_{st} при изменениях объема не менялись.

Заключение

Таким образом, из вышеприведенных данных следует, что основными характеристиками аномального процесса конвекции воды в цилиндрической полости с открытой поверхностью в окрестности 3.98°С можно считать: температуру T_{st} , при которой начинается стабилизация ее значений в придонных слоях и которая при охлаждении воды зависит только от скорости изменения ее температуры; длительность температурной стабилизации t_{st} , не зависящую от скорости изменения температуры, но зависящую от высоты столба исследуемой воды, ее объема и разности температур ΔT_{sb} поверхностных и придонных слоев при $\Delta T_{sb} > 1^\circ\text{C}$.

Наконец, отметим, что температурные аномалии, приведенные на рис. 1, 2, наблюдались нами ранее [4], однако интерпретация этих данных оказалась неверной, на что справедливо было указано в [5].

Список литературы

- [1] *Chaplin M.* // <http://www.lsbu.ac.uk/water/index2.html>.
- [2] *Cawley M.F., Mc Bride P.* // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2004. Vol. 47. P. 1175–1186.
- [3] *Cawley M.F., Mc Glynn D., Mooney P.A.* // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2006. Vol. 49. P. 1763–1772.
- [4] *Батуров Л.Н., Говор И.Н., Обухов А.С.* и др. // *Письма в ЖЭТФ.* 2011. Т. 93. Вып. 2. С. 92.
- [5] *Першин С.М., Крутянский Л.М., Лукьянченко В.А.* // *Письма в ЖЭТФ.* 2011. Т. 94. Вып. 2. С. 125.