

Особенности охлаждения бактериальных суспензий

Симонов О.А.^{*,**}

^{*}Тюменский научный центр СО РАН, Тюмень

^{**}Тюменский государственный университет, Тюмень

В статье представлены результаты экспериментального исследования процесса охлаждения водных бактериальных суспензий, помещенных в цилиндрический сосуд, стенки которого охлаждаются до температуры ниже, чем температура, при которой основа суспензии — вода — имеет максимальную плотность. Проведено прямое численное моделирование конвективного течения воды в такой системе. Описаны режимы течения, рассчитаны интегральные параметры. Исследовано влияние поверхностного натяжения на формирование структуры течения, показано его существенное влияние на скорость охлаждения сосуда.

Ключевые слова: бактериальные суспензии, максимум плотности воды, свободная конвекция, эффект Марангони

1. Введение

Вода — основа жизни на Земле и универсальный растворитель — не встречается в обычных условиях «в чистом виде». Обычно в ней содержатся различные примеси и микроорганизмы, которые, в ряде случаев, могут существенно влиять на её физико-механические свойства. Известно, что некоторые микроорганизмы, адаптируясь к условиям низких температур, научились вырабатывать вещества, существенно влияющие на процесс кристаллизации воды. Поиску, изучению и практическому применению таких веществ современные исследователи уделяют значительное внимание [1, 2].

Следует учитывать, что вода — уникальная жидкость и имеет множество аномалий. Одна из самых известных — наличие максимума плотности при температуре около 4 °С. Об этой аномалии известно давно, исследователи достаточно подробно и полно описывают её и объясняют её возникновение [3–5]. Суть аномалии в том, что чистая вода при давлении одна атмосфера имеет максимальную плотность 999,972 кг/м³ при температуре 3,984 °С [4], при 0 °С плотность воды меньше плотности максимума на 0,0132% и с повышением температуры до 8 °С плотность уменьшается примерно на такую же величину. Тем не менее, столь

небольшое изменение плотности определяет важнейшее для жизни на Земле свойство водоемов — в холодное время покрываться коркой льда.

Наличие максимума плотности приводит к тому, что в несложных экспериментах, фиксирующих процесс охлаждения или нагревания воды в цилиндрическом сосуде, температура в центре него изменяется немонотонно. Это явление отмечалось многими исследователями, но подробно и точно впервые экспериментально изучено в [6]. Авторы этой работы измеряли температуру в центре медного тонкостенного цилиндра (толщина стенок 2 мм) диаметром 40 мм и длиной 123 мм помещенного в охлаждающую рубашку, соединенную с двумя термостатами, один из которых охлажден до температуры –5 °С, температура другого +16 °С. Гидродинамическая система позволяла быстро переключать поток охлаждающей жидкости в рубашке с одного термостата на другой, что позволяло циклически охлаждать–нагревать экспериментальный цилиндр. Важно отметить, что цилиндр сверху закрыт резьбовой крышкой, исключаяющей наличие воздуха, т.е. экспериментальная жидкость не имела свободной поверхности. В [6] воспроизводимо и достоверно зафиксировано характерное «плато» на кривой охлаждения экспериментальной жидкости, которой являлась смесь воды с тяжелой водой в различных концентрациях (рис. 1).

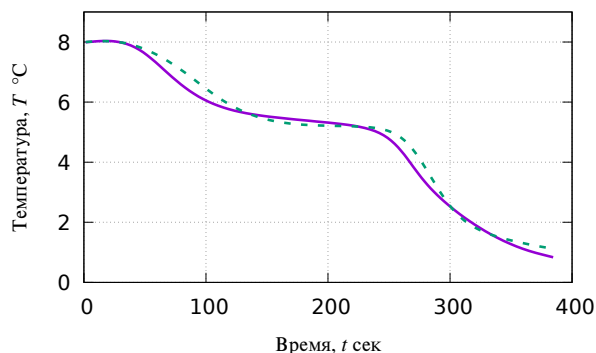


Рис. 1. Типичный вид кривой охлаждения. Данные работы [6]

В работе [7] на той же экспериментальной установке, что и в [6], при изучении периодических циклов охлаждения–нагрева обнаружен гистерезис кривых охлаждения–нагрева — характерное «плато» на них формировалось при различных температурах. Кроме этого, в работе проведены измерения температуры в нескольких точках по оси цилиндра и предложена теоретическая модель, объясняющая наблюдаемое явление возникающим конвективным течением воды. Позднее, повторяя эксперимент [6], авторы [8] применив технику PIV, измерили профили скорости конвективного течения и, используя открытый код, провели прямое численное моделирование, что позволило наглядно объяснить причины возникновения «плато» на кривой охлаждения. В цилиндрическом сосуде, наполненном теплой жидкостью и помещенном в охлажденный термостат, сначала устанавливается режим течения, в котором жидкость, отдавая тепло стенкам, опускается вдоль них и накапливается на дне, затем, когда её температура становится ниже $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, начинает подниматься вдоль стен сосуда в виде вихря, отесняя нисходящий поток. В это время в центре сосуда жидкость практически не движется, температура остаётся постоянной. Восходящий холодный поток достигает поверхности и быстро заполняет сосуд холодной жидкостью сверху.

Подробно структура конвективного потока вблизи максимума плотности воды экспериментально и численно исследована в [9] на принципиально другой экспериментальной установке. Исследуемая жидкость помещалась в прямоугольную емкость, на двух противоположных вертикальных стенках которой двумя различными термостатами фиксировалась температура с заданной разницей $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Свободная поверхность жидкость–газ исключалась. Температура термостатов медленно понижалась и, когда на одном из них она становилась

меньше, чем $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, в сосуде возникал стационарный вихревой поток. Авторы [9] изучили структуру такого потока в зависимости от состава экспериментальной жидкости для достаточно широкого круга добавок (различные спирты, соли) и сделали вывод, что по структуре такого конвективного вихря можно судить об особенностях межмолекулярного взаимодействия водных растворов.

В работе [10] автор вновь возвращается к моделированию экспериментов [6,8], применяя для этого коммерческий пакет программ FLUENT. В этой работе отмечается достаточно хорошее качественное и количественное совпадение расчёта с экспериментальными данными, а имеющееся различие объясняется отсутствием высококачественных экспериментальных данных о таких течениях в литературе.

Особенности поведения различных гидродинамических систем вблизи максимума плотности воды постоянно привлекают внимание исследователей, к примеру, интересные экспериментальные работы выполнены в Институте гидродинамики им. Лаврентьева СО РАН [11, 12], а развитие неустойчивости Рэлея–Тейлора численно исследовано в [13], но, на взгляд автора, ряд вопросов остаётся недостаточно полно изученным. В частности, нет работ, описывающих влияние поверхностного натяжения на свободное конвективное течение воды в сосуде вблизи максимума её плотности.

Известно, что при определённых условиях, при наличии градиента температуры на поверхности, может возникнуть движение жидкости вдоль поверхности, называемое эффектом Марангони. Такое движение должно оказывать определённое влияние на интенсификацию теплопереноса и может воздействовать на структуру конвективного течения.

В случае если в воде содержатся микроорганизмы, то поведение такой системы может существенно усложниться, под воздействием их метаболитов может изменяться как вязкость, так и поверхностное натяжение. Кроме того, такие системы могут сохранять «память» о своей истории, при переохлаждении вырабатывая вещества, замедляющие процесс кристаллизации.

Некоторые особенности кристаллизации бактериальных суспензий из коллекции ТюмНЦ СО РАН были представлены в [14]. Настоящая работа является продолжением исследований [14], в ней более детально рассматривается, в том числе с использованием методов прямого численного моделирования, ряд явлений, происходящих при охлаждении бактериальных суспензий.

2. Экспериментальное исследование процесса охлаждения бактериальных суспензий

2.1. Схема эксперимента, материалы и методы

Исследуемые в настоящей работе бактериальные суспензии изготавливались на основе штамма *Mg8* из коллекции бактерий, извлеченных из многолетнемерзлых пород, ТюмНЦ СО РАН [14]. Бактерии для эксперимента культивировали на мясопептонном агаре (ТУ 9385-001-64786015-2012, г. Углич) при температуре $+36\text{ }^{\circ}\text{C}$. Смывы бактерий производили дистиллированной водой в объеме 5 мл. Микробную взвесь доводили методом серийных разведений до концентрации 1×10^9 микробных клеток в 1 мл суспензии. Начальный объем охлаждаемой жидкости для всех вариантов эксперимента был равен 20 мл.

Схема установки для исследования процесса охлаждения и кристаллизации бактериальных суспензий представлена на рис. 2.

Бактериальная суспензия помещается в полиэтиленовую емкость с пенопластовой крышкой 1 и устанавливается в баню криотермостата *Julabo F25*, заполненной автомобильным тосолом 2. Для всех опытов температура бани $-17,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. В крышку экспериментальной емкости вмонтирован высокоомный бусинковый терморезистор (СТ1-19) на стеклянной ножке с диапазоном рабочих температур от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Измерительная бусинка терморезистора находится в центре объема охлаждающей жидкости. В экспериментах фиксировалось изменение напряжения на тестовом калиброванном резисторе 5 в зависимости от времени охлаждения. Данные посредством аналого-цифрового преобразователя 4 сохранялись на персональном компьютере. Питание цепи задавалось источником постоянного тока ВЗ-47 3, измерения проводились при напряжении 25 В. Терморезистор калибровался по ртутному термометру, значения между калибровочными точками интерполировались кубическими сплайнами. Погрешность измерения температуры оценивается в пределах $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Вязкость суспензии измерялась методом падающего шарика (вискозиметр Гешлера компании Rheotest) с термостатированной рабочей трубой. Время падения шарика фиксировалось при помощи электронного секундомера.

2.2. Результаты экспериментов

В ходе изучения охлаждения и кристаллизации бактериальных суспензий нами было отмечено [14], что для воды и систем на водной основе характерно изменение монотонного характера охла-

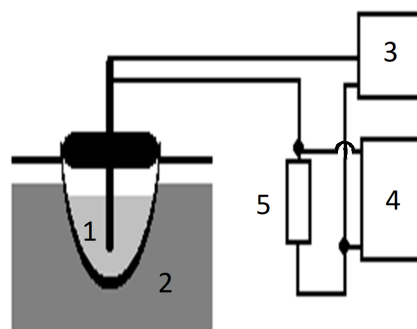


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 — полиэтиленовая емкость с бактериальной суспензией; 2 — баня термостата; 3 — источник напряжения; 4 — аналого-цифровой преобразователь; 5 — калиброванное сопротивление

ждения (нагрева) жидкости при температурах ниже $7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Датчик, расположенный в центре цилиндрической емкости, заполненной бактериальной суспензией на водной основе, помещенной в охлажденный термостат, воспроизводимо и достоверно фиксирует возникновение характерной полочки на кривой охлаждения. Характерное изменение температуры в центре экспериментального сосуда представлено на рис. 3.

Температура в сосуде быстро падает, суспензия охлаждается (область 1 на рис. 3). При приближении к температуре максимума плотности воды проявляется немонотонное изменение (отмечено маркером I), далее суспензия переохлаждается, и в некоторый момент времени начинается гетерогенная кристаллизация (область 2), после окончания которой образовавшийся лед остывает до температуры бани термостата (область 3). Далее экспериментальный сосуд извлекается из бани термостата и устанавливается при комнатной температуре, лед в сосуде нагревается до температуры плавления (область 4), плавится (область 5), и, после окончания плавления, суспензия нагревается (область 6). При температуре в центре сосуда близкой к температуре максимума плотности воды наблюдается формирование характерного «плато» на кривой зависимости температуры от времени (отмечено маркером II на рис. 3).

В результате проведенных экспериментов установлено, что возникающее конвективное течение, определяющее характер немонотонности изменения температуры в центре экспериментального сосуда, существенным образом зависит от предыстории бактериальной суспензии. На рис. 4 представлено сравнение процесса охлаждения свежеприготовленной бактериальной суспензии и этой же суспензии

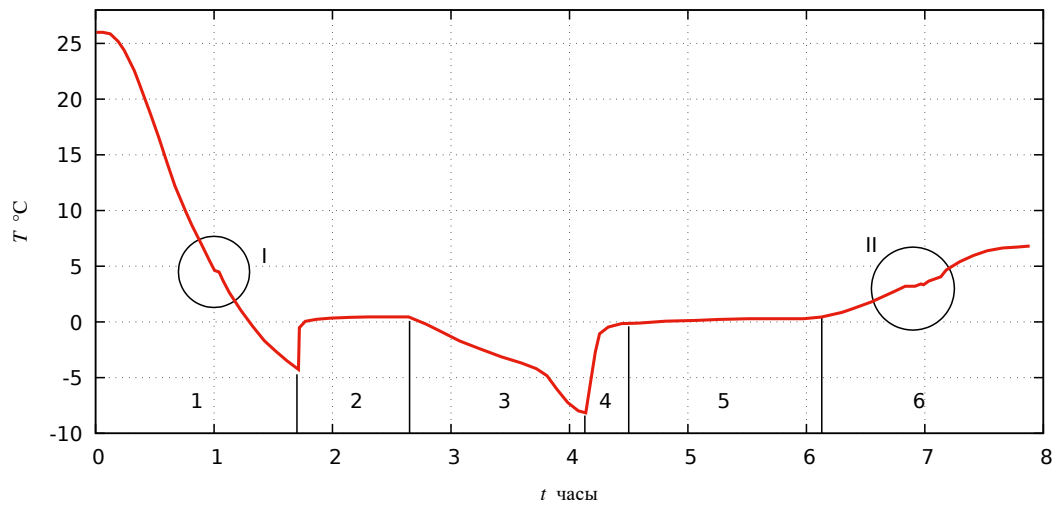


Рис. 3. Характерные этапы процесса кристаллизации: 1 — охлаждение бактериальной суспензии; 2 — кристаллизация суспензии; 3 — охлаждение льда; 4 — нагрев льда; 5 — таяние льда; 6 — нагрев бактериальной суспензии. I — немонотонность изменения температуры при охлаждении бактериальной суспензии; II — немонотонное изменение температуры при нагреве бактериальной суспензии

после двукратного замораживания и выдержки при температуре $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течении 24 часов. После криогенного воздействия немонотонность изменения температуры проявляется при меньших, чем температура максимума плотности воды, значениях, её изменения носят скачкообразный хаотичный характер. Такое изменение свидетельствует о том, что в экспериментальном сосуде, вероятнее всего, образуются несколько разнонаправленных восходящих или нисходящих потоков, что, скорее всего, объясняется изменением реологических харак-

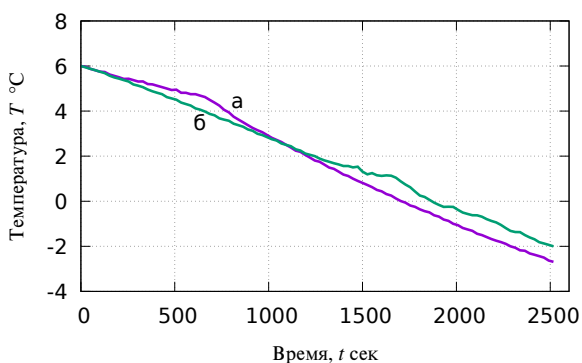


Рис. 4. Изменение характера охлаждения бактериальной суспензии в зависимости от её предыстории: а) свежеприготовленная суспензия; б) суспензия два раза замороженная и выдержанная при температуре $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 24 часа

теристик системы. Действительно, если бактериальная суспензия начала проявлять свойства дилатантной или вязко-пластической жидкости, конвективное течение может существенно усложниться.

Другим аспектом, влияющим на структуру течения, может быть изменение поверхностного натяжения на границе раздела фаз вследствие образования в результате жизнедеятельности бактерий поверхностно активных веществ.

Кроме этого существенную роль могут играть образовавшиеся на стенках сосуда и температурном датчике колонии микроорганизмов, которые могут изменять гидродинамические условия прилипания жидкости к стенкам сосуда.

Для проверки возможного изменения реологических свойств бактериальных суспензий в зависимости от их предыстории и температуры проведены измерения вязкости на вискозиметре Гепплера. Измерения проводились для каждой температуры многократно, фиксировалось время падения шарика в первой и второй половине рабочей трубки. Измерения повторялись через 1,5 минуты и через 24 часа при поддержании термического режима заполненной суспензией трубки вискозиметра. Полученные данные, обработанные с использованием статистических методов, не позволили выявить отклонения реологических свойств суспензии от свойств ньютоновской жидкости.

Вязкость суспензии в зависимости от температуры в сравнении с вязкостью дистиллированной воды приведена на рис. 5. Данные, приведенные на

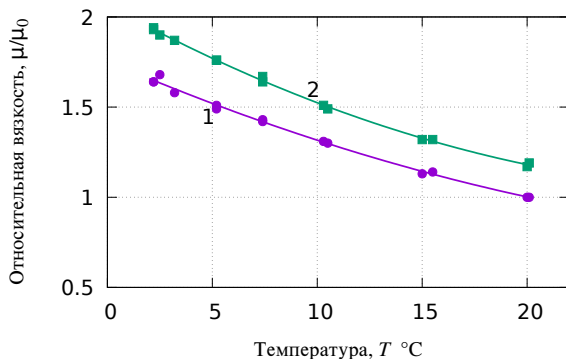


Рис. 5. Зависимость вязкости бактериальной суспензии (кривая 2) от температуры в сравнении с вязкостью дистиллированной воды (кривая 1)

этом графике, нормированы на μ_0 — значение вязкости воды при 20 °C. Полученные данные вполне согласуются с теорией, устанавливающей зависимость вязкости от объемной концентрации твердой примеси:

$$\Delta\mu = 2,5 \Phi,$$

где $\Delta\mu$ — разница вязкости суспензии и растворителя, а Φ — объемная концентрация. Для условий эксперимента вязкость суспензии μ_s связана с вязкостью дистиллированной воды μ_d соотношением:

$$\mu_s = 1,16 \mu_d,$$

что вполне соответствует объемной концентрации бактерий в суспензии.

Следует отметить, что доступный для работы вискозиметр Гешлера, возможно, является достаточно грубым инструментом, и проведенные на нем измерения не могут объяснить причины изменения характера охлаждения суспензии в зависимости от её предыстории. Так или иначе отмеченные в работе факты остаются необъясненными и требуют проведения дополнительных экспериментальных исследований и моделирования поведения системы численными методами.

В теоретической части работы ставилась задача оценить возможное влияние поверхностного натяжения на процесс охлаждения жидкости (не обязательно бактериальной суспензии) и выявить возможность возникновения из-за поверхностного натяжения наблюдавшихся в экспериментах аномалий.

3. Прямое численное моделирование

3.1. Модель и постановка задачи

Прямое численное моделирование конвективного течения воды выполнено методом конечных

элементов с использованием открытого для общего пользования кода *NaSt2D*, модифицированного для моделирования конкретной задачи. Решались полные уравнения Навье–Стокса совместно с уравнением теплопроводности для несжимаемой жидкости в приближении осевой симметрии. Система уравнений дополнена соотношением, связывающим градиент температуры на свободной поверхности жидкости с градиентом радиальной компоненты скорости:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \nabla) \vec{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{g},$$

$$\nabla \vec{u} = 0,$$

$$\vec{q} = -k \nabla T,$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \nabla T + \frac{\nabla \vec{q}}{\rho C_p} = 0,$$

$$\mu \frac{\partial u_r}{\partial z} = \frac{d\sigma}{dT} \frac{\partial T}{\partial r}.$$

В уравнениях используются следующие обозначения: \vec{u} — скорость движения воды; p — давление жидкости; ρ — плотность воды; ν — кинематическая вязкость; \vec{q} — тепловой поток; \vec{g} — ускорение свободного падения; T — температура; k — коэффициент теплопроводности; C_p — теплоемкость жидкости; μ — динамическая вязкость; σ — коэффициент поверхностного натяжения на границе вода-воздух; z — координата вдоль оси симметрии; r — радиальная координата.

Численное моделирование конвективного течения проводилось в диапазоне температур от 270 К до 300 К. В этом диапазоне температур значительно изменяются физические свойства воды: плотность ρ , вязкость μ , теплоемкость C_p , теплопроводность k и поверхностное натяжение σ .

Для численного описания зависимости этих величин от температуры использовалась полиномиальная интерполяция:

$$f(T) = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 + c_3 T^3 + c_4 T^4 + c_5 T^5 + c_6 T^6.$$

Значения коэффициентов для каждой из величин взяты из статей авторов, ранее моделирующих конвективные течения вблизи максимума плотности [8–10], и приведены в табл. 1.

Коэффициенты для моделирования поверхностного натяжения применимы для шкалы температур Цельсия, для остальных величин использовалась шкала Кельвина.

На рис. 6 показана используемая в численных расчётах полиномиальная зависимость плотности воды от температуры.

Таблица 1. Полиномиальные коэффициенты для численного моделирования зависимостей физических величин от температуры

C_i	ρ , кг/м ³	μ , Па·с	C_p , Дж/(кг·К)	k , Вт/(м·К)	σ , Н/м
C_0	$9,3456e-2$	1,379957	12010,1471	$-0,869083936$	$7,5599e-2$
C_1	8,660272	$-2,122402e-2$	$-80,407288$	$8,94880345e-3$	$-1,344e-4$
C_2	$-2,3437e-2$	$1,360456e-4$	0,309867	$-1,5836635e-5$	$-5,00e-7$
C_3	$1,878703e-5$	$-4,645409e-7$	$-5,381869e-4$	$7,97543259e-9$	$1,00e-9$
C_4	0	$8,904274e-10$	$3,625364e-7$	0	0
C_5	0	$-9,079069e-13$	0	0	0
C_6	0	$3,845733e-16$	0	0	0

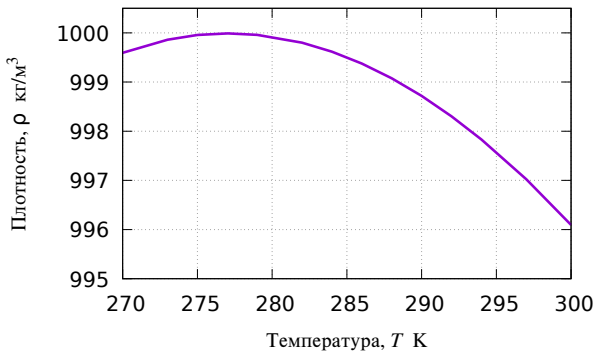


Рис. 6. Используемая в расчётах зависимость плотности воды от температуры

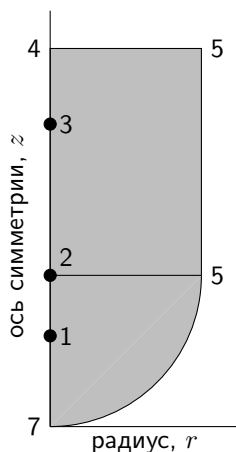


Рис. 7. Схема расчётной области и граничные условия: 1, 2, 3 — точки контроля температуры; 4–7 — осевая симметрия; 4–5 — термоизолированная граница вода–воздух; 5–6–7 — задана температура и условие прилипания воды к стенке

Согласно этой зависимости плотность воды достигает максимума при $T = 277,045$ К, что соответствует $T = 3,895$ °С. В этой точке плотность достигает величины $\rho_{\max} = 999,990$ кг/м³. Известно [4], что в действительности максимум плотности достигается при $T = 3,984$ °С и её максимальная величина равняется $999,972$ кг/м³. Различия между моделью воды, используемой в расчётах, и реальной водой (2,2% по температуре максимума плотности и 1,8e–3% по значению максимума плотности) незначительны, следовательно, применение модели оправдано.

В численном эксперименте вода помещалась в цилиндрический сосуд со сферическим дном (рис. 7) с формой и размерами, близкими к геометрическим размерам сосуда, в котором проводился эксперимент [14]. Радиус сосуда и радиус сферического дна сосуда $R = 0,2$ м, а высота цилиндрической части $H = 0,03$ м. Фиксация температуры в численном эксперименте проводилась в трех точках на оси цилиндра (точки 1, 2, 3), расположенных на высоте 0,01 м, 0,02 м и 0,04 м от дна сосуда соответственно. Верхняя поверхность цилиндра (точки 4–5) — граница вода–воздух — в расчётах задавалась полностью теплоизолированной, жидкость проскальзывает по этой границе и задано поверхностное натяжение. Условие осевой симметрии задано на оси 7–4. На боковых стенках цилиндрической емкости (точки 5–6–7) задавалась температура, которая изменялась линейно от 300 К до 270 К. Охлаждение начиналось через $t_s = 10$ с после старта расчёта и продолжалось некоторое заданное время охлаждения — t_c . Кроме этого, на боковых стенках сосуда принято условие прилипания жидкости к стенкам. В начальный момент времени температура жидкости задавалась равной 300 К, скорости движения равными нулю.

В расчётной области создавалась сетка, состоящая из двух слоев прямоугольных (приграничных) элементов, ориентированных вдоль стенок сосуда, и

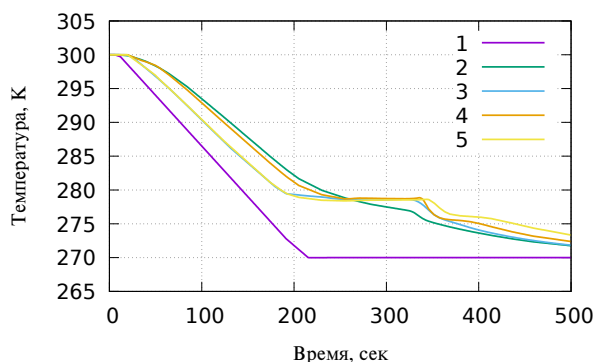


Рис. 8. Изменение температуры при охлаждении цилиндра: 1 — температура стенки цилиндра; 2 — средняя температура воды в цилиндре; 3 — температура в верхней точке (точке № 3) на оси сосуда; 4 — температура в центре сосуда (точка № 2); 5 — температура в точке № 1 вблизи дна сосуда

треугольных элементов более густо расположенных у стенок и свободной поверхности. Расчёты проводились на сетке, состоящей из 215 прямоугольных и 3701 треугольных элементов. Чувствительность решения к размеру сетки проверена, выбран оптимальный вариант, обеспечивающий достаточную точность расчёта при разумном времени счёта.

3.2. Результаты моделирования

В первой части численного эксперимента моделировалось течение без учёта поверхностного натяжения. Полученные данные сравнивались с результатами расчётов [8, 9, 13] и качественно совпадают с ними. На кривых охлаждения формируется характерная полочка (рис. 8), быстрее всего она возникает в нижней части сосуда и исчезает в верхней. Характерные диаграммы температуры в расчётном сечении приведены на рис. 9. В верхнем ряду представлены данные численного моделирования без учёта поверхностного натяжения, в нижнем ряду — с учётом сил поверхностного натяжения.

Конвективное течение воды, развиваясь во времени, проходит три основные стадии.

Первая стадия — нисходящее течение по стенкам — реализуется на первых секундах охлаждения. Для этой стадии характерно расположение холодной воды на дне сосуда, интенсивный теплообмен идет через верхнюю часть стенок сосуда.

Во второй стадии происходит перестройка режимов течения, вихрь поднимается вдоль стенок сосуда, температурный пограничный слой утолщается, градиенты температуры уменьшаются, теплообмен замедляется, что приводит к нарушению монотонного изменения средней температуры воды.

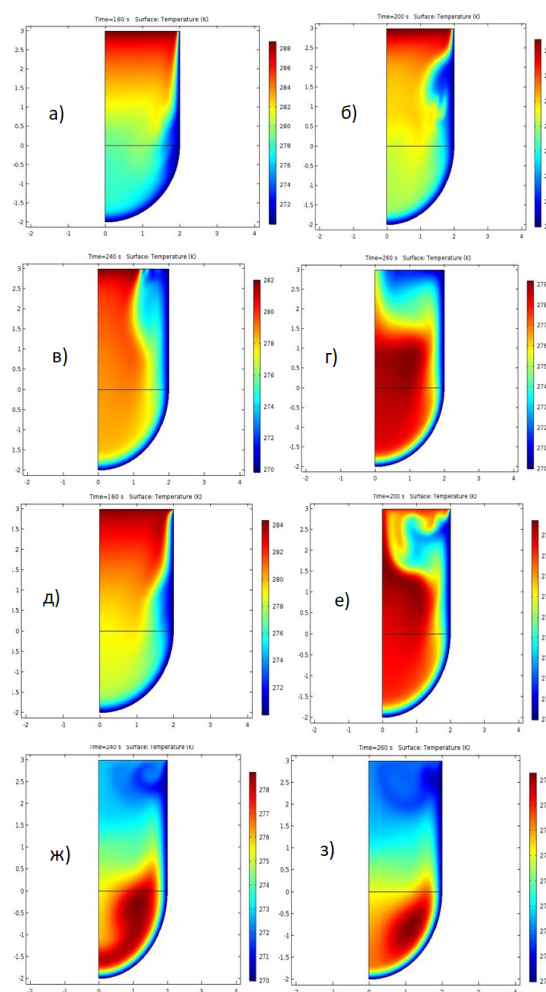


Рис. 9. Распределение температуры в сосуде в характерные моменты времени: (а) и д) 160 сек; б) и е) 200 сек; в) и ж) 240 сек; г) и з) 260 сек); без учёта (а, б, в, г) и с учётом сил поверхностного натяжения (д, е, ж, з)

Третья стадия — окончательное охлаждение воды. Холодная вода поднимается вдоль стенок сосуда и накапливается в верхней части сосуда, теплообмен происходит через дно и нижнюю часть стенок сосуда. Градиенты температур постепенно уменьшаются, течение останавливается.

Поверхностное натяжение на границе вода–воздух практически линейно (см. табл. 1) увеличивается при уменьшении температуры и, так как стенка сосуда всегда более холодная, вызывает движение жидкости от центра к стенке. Это увеличивает скорости течения и ускоряет теплообмен, когда более тяжелая холодная вода опускается вниз по стенкам сосуда. Средняя температура воды в сосуде уменьшается быстрее, вода раньше достигает

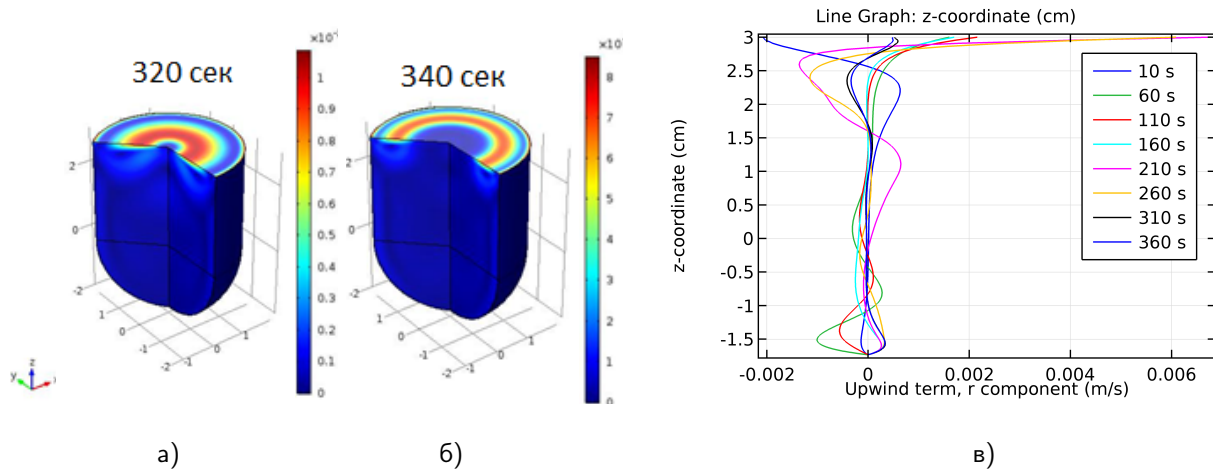


Рис. 10. Вихревое движение воды вблизи поверхности, вызванное поверхностным натяжением на границе раздела вода–воздух: а) и б) диаграммы скорости в различные моменты времени; в) профили радиальной компоненты скорости U_r по координате z в различные моменты времени

максимума своей плотности и начинает подниматься вверх, достигая поверхности, она стремится распространиться от стенки к центру сосуда, что противодействует потоку, вызванному поверхностным натяжением.

Численный эксперимент показывает, что на этой стадии силы поверхностного натяжения качественно изменяют структуру течения. В верхней части сосуда возникает вихревой поток, мешающий холодной, более легкой, жидкости прорваться на поверхность (рис. 9(е)–(з)), вследствие чего возникает колебательное движение воды вблизи поверхности.

На рис. 10 показаны характерные «волны» скорости, распространяющиеся по поверхности сосуда.

В целом, движение жидкости при учёте влияния поверхностного натяжения становится более интенсивным, средние скорости течения возрастают, что приводит к более быстрому охлаждению воды в сосуде.

Отметим, что средняя температура воды в сосуде характеризует количество отведенной тепловой энергии ($\Delta Q = C_p \Delta T$), а средняя скорость движения жидкости определяет кинетическую энергию системы $E = \rho V U^2 / 2$. Следовательно, зависимость средней скорости конвективного течения воды в сосуде от её средней температуры позволяет судить о роли конвективного движения в отводе теплоты из сосуда. Средняя температура жидкости в сосуде является однозначно определённой и гладкой функцией времени, что делает возможным сравнение зависимостей средней скорости движения от средней температуры жидкости в сосуде для различного времени охлаждения и учёта раз-

личных эффектов. Для анализа таких зависимостей удобно применять обратный ход оси температуры, что соответствует временному её изменению.

На рис. 11 приведено сравнение средней скорости движения жидкости в охлаждаемом сосуде в зависимости от её средней температуры в численных экспериментах с учётом влияния поверхностного натяжения и без него. График подчеркивает отмеченное выше влияние поверхностного натяжения на исследуемое конвективное течение, а именно: интенсивность движения всегда выше в случае нисходящего по стенкам течения, поверхностное натяжение ускоряет его, а затем, вследствие противодействия восходящему потоку, возникают периодические колебания скорости вблизи поверхности.

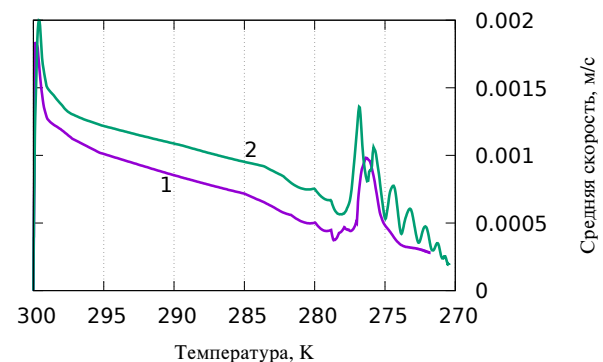


Рис. 11. Зависимость средней скорости движения воды в сосуде от её средней температуры: 1 — без учёта влияния поверхностного натяжения и 2 — с учётом влияния сил поверхностного натяжения

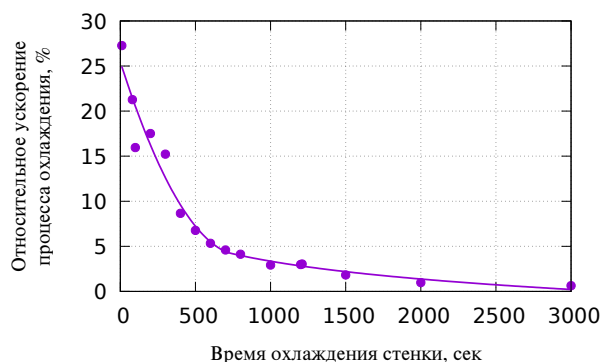


Рис. 12. Влияние поверхностного натяжения на скорость охлаждения воды в сосуде в зависимости от скорости охлаждения его стенок

В целом, повышение интенсивности теплопереноса, вызванного силами поверхностного натяжения, всегда приводит к ускорению охлаждения жидкости, но численный эксперимент показывает, что при достаточно малых скоростях охлаждения стенок сосуда влияние сил поверхностного натяжения незначительно.

Это иллюстрирует график на рис. 12, на котором показана зависимость относительной скорости ускорения процесса охлаждения воды в зависимости от скорости охлаждения стенок сосуда.

Из приведенного графика следует, что при достаточно медленных скоростях охлаждения стенок сосуда, что реализуется в том случае, если теплопроводность стенок сосуда низкая, влияние сил поверхностного натяжения незначительно. Тем не менее, при быстром охлаждении стенок сосуда поверхностное натяжение играет существенную роль и более чем на 20% ускоряет процесс общего охлаждения воды в экспериментальном сосуде.

Проведенное моделирование показывает, что в случае наличия свободной поверхности следует учитывать влияние сил поверхностного натяжения на процесс охлаждения воды при достаточно быстром (менее одного часа) темпе охлаждения. Несмотря на то, что структура течения при учете сил поверхностного натяжения всегда отличается от структуры течения без такого учета, так как около поверхности формируется отдельный вихрь, при длительном охлаждении это незначительно сказывается на теплопереносе.

В случае бактериальных суспензий изменение поверхностного натяжения в зависимости от её предыстории не может настолько кардинально изменить вид кривой охлаждения, как это зафиксировано в экспериментальной части работы.

4. Заключение

Конвективное течение содержащих воду жидкостей, помещенных в цилиндрический сосуд, при его охлаждении или нагреве вблизи температуры максимума плотности воды — сложное вихревое течение, зависящее от незначительных изменений механических и теплофизических параметров системы. Водные суспензии на основе бактерий, извлеченных из многолетнемерзлых пород, являются биологически активными жидкостями, изменяющими механические свойства среды под воздействием криогенных факторов так, чтобы это позволило им выжить в критических условиях фазового перехода. Изменение экспериментально фиксируемых параметров течения, возникающего при охлаждении или нагреве водной суспензии, служит чувствительным индикатором таких изменений и при разработке соответствующих методик может позволить их описать.

В заключение выражаю благодарность сотрудникам отдела биоресурсов ТюмНЦ СО РАН Субботину А.М. и Симоновой Е.О. за предоставленный биологический материал и студенту Тюменского нефтегазового университета Пирсону Кассанго за помощь в проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] Бильданова Л.Л. Основные свойства и особенности эволюции антифризных белков / Л.Л.Бильданова, Е.А. Салина, В.К. Шумны // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2012. Т. 16, № 1. С. 250–270.
- [2] Davies P.L. Ice-binding proteins: a remarkable diversity of structures for stopping and starting ice growth // Trends in Biochemical Sciences. 2014. Vol. 39, No. 11. С. 548–555.
- [3] Vedamuthu M., Singh S., Robinson G.W. Properties of Liquid Water – Origin of the Density Anomalies // J. Phys. Chem. 1994. Vol. 98, No. 9. Pp. 2222–2230.
- [4] Cho C.H., Singh S., Robinson G. W. Understanding all of water's anomalies with a nonlocal potential // J. Chem. Phys. 1997. Vol. 107, No. 19. Pp. 7979–7988.
- [5] Tanaka H. Simple Physical Explanation of the Unusual Thermodynamic Behavior of Liquid Water // Phys. Rev. Lett. 1998. Vol. 80, No. i. Pp. 5750–5753.
- [6] Anselmi C., Paz M.De., Marciano A., Pilo M., Sonnino G. Free convection experiments in water and deuterated mixtures at temperatures including the density maxima // Int. J. Heat Mass Transf. 1990. Vol. 33, No. 11. Pp. 2519–2524.
- [7] Sonnino G., and Paz M.De. Comparison between Experimental Data and Theoretical Calculations

- of Free Convection in Water near Its Density Maximum // *Mathl. Comput. Model.* 1997. Vol. 25, No. 6. Pp. 107–115.
- [8] Cawley M.F., and McBride P. Flow visualization of free convection in a vertical cylinder of water in the vicinity of the density maximum // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2004. Vol. 47, No. 6–7. Pp. 1175–1186.
- [9] Cawley M.F., McGlynn D., and Mooney P.A. Measurement of the temperature of density maximum of water solutions using a convective flow technique // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2006. Vol. 49, No. 11–12. Pp. 1763–1772.
- [10] Othman S. A Numerical Study of Transient Natural Convection of Water Near its Density Extremum // *International Conference on Mechanical and Manufacturing Engineering (ICME 2008)*, 21–23 May 2008, Johor Bahru, Malaysia. 6 p.
- [11] Букреев В.И. Влияние аномальной зависимости на поверхностное гравитационное течение // *Прикладная механика и техническая физика.* 2005. Т. 46, № 1(269). С. 63–69.
- [12] Букреев В.И., Гаврилов Н.В., Чеботников А.В. Влияние немонотонной зависимости плотности воды от температуры на свободную конвекцию от линейного источника тепла // *Прикладная механика и техническая физика.* 2011. Т. 52, № 1(305). С. 31–39.
- [13] Li Y.R., Hu Y.P., Ouyang Y.Q., and Wu C.M. Flow state multiplicity in Rayleigh-Benard convection of cold water with density maximum in a cylinder of aspect ratio 2 // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2015. Vol. 86. Pp. 244–257.
- [14] Симонов О.А., Симонова Е.О., Субботин А.М. Некоторые особенности кристаллизации льда в микробиологических системах // *Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы: Труды международной конференции.* 2015. С. 353–355.

Some details of the cooling process of bacterial suspensions

Simonov O.A.**,**

*Tumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tumen

**University of Tumen

The results of experimental studies of the cooling process of the water bacterial suspensions in a cylindrical vessel near the maximum density of water are present. Carried out direct numerical simulation of convective flow of water. Studied the flow regimes, the calculated integral parameters of the flow. Shows the influence of surface tension on the formation of flow structure, resulting in significantly changed the rate of cooling of the vessel.

Keywords: bacterial suspension, maximum density of water, free convection flow, Marangoni effect



Многофазные системы:
модели, эксперимент, приложения

ИМех им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН

Статья рекомендована к публикации
Программным комитетом VI Российской конференции
«Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения»