

D 53 52

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ И ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



Кафедра технологии мясных,
рыбных продуктов
и консервирования холодом

РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ЗАМОРАЖИВАНИЯ ТЕЛ ПРОСТОЙ ФОРМЫ

Методические указания
к дипломному и курсовому проектированию
для студентов специальностей 260301, 260504,
бакалавров, магистрантов по направлению 552400
всех форм обучения

Второе издание, исправленное



Санкт-Петербург 2008

Фролов С.В. Расчет времени замораживания тел простой формы: Метод. указания к дипломному и курсовому проектированию для студентов спец. 260301, 260504, бакалавров, магистрантов по направлению 552400 всех форм обучения / Под. ред. В.И. Куцаковой. 2-е изд., испр. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2008. – 18 с.

Изложен необходимый теоретический материал для расчета времени замораживания тел простой формы (бесконечная пластина, бесконечный цилиндр, шар). Приведена программа, выполняющая все необходимые расчеты, и инструкция по пользованию ею.

Рецензент
Доктор техн. наук, проф. Л.В. Красникова

Рекомендованы к изданию редакционно-издательским советом университета

- © Санкт-Петербургская государственная академия холода и пищевых технологий, 1996
- © Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий, 2008

1. ВВЕДЕНИЕ. ФОРМУЛА ПЛАНКА

В холодильной технологии пищевых продуктов часто необходимо рассчитывать время замораживания тел различной формы. Наибольшее распространение при определении продолжительности замораживания получило выражение, известное как формула Планка (см. [1]). Эта формула была строго получена для тел простой формы (бесконечная пластина, бесконечный цилиндр и шар) на основании следующих упрощающих допущений:

1. Тело перед началом замораживания охлаждено до криоскопической температуры.
2. Теплоемкость замороженной части тела равна нулю.
3. Льдообразование в теле происходит полностью без переохлаждения при криоскопической температуре, теплофизические свойства замороженной части (в частности, коэффициент теплопроводности) не зависят от температуры.
4. Тело однородно, плотность его при замораживании не меняется, коэффициент теплоотдачи и температура среды не зависят от времени.

Если эти допущения выполнены, то время замораживания может быть получено в виде следующего выражения:

$$\tau_s = \theta \frac{R q \rho}{t_{кр} - t_c} \left(\frac{R}{2\lambda} + \frac{1}{\alpha} \right), \quad (1)$$

где τ_s - время замораживания (с), R - характерный размер тела (для пластины - половина толщины, для цилиндра и шара - радиус) (м), ρ - плотность тела ($\text{кг}/\text{м}^3$), q - удельная теплота фазового перехода ($\text{Дж}/\text{кг}$), λ - коэффициент теплопроводности замороженной части тела ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$), $t_{кр}$ - криоскопическая температура (К), t_c - температура среды, в которую погружено тело (К), θ - безразмерный фактор формы, равный: 1 - для пластины, $1/2$ - для цилиндра и $1/3$ - для шара.

Удельную теплоту фазового перехода в формуле (1) обычно вычисляют следующим образом:

$$q = W \omega q_{\text{воды}}, \quad (2)$$

где W - относительное влагосодержание тела (доли единицы), ω - доля вымороженной воды, $q_{\text{воды}}$ - теплота кристаллизации воды, $q_{\text{воды}} = 3,3 \cdot 10^5$ Дж/кг.

Для замораживания пластины имеется обобщение формулы (1) на случай различных коэффициентов теплоотдачи на двух сторонах пластины (см. [1]). Этот случай достаточно часто встречается на практике - если контейнер с замораживаемым продуктом лежит на полке в морозильном аппара-

те, то коэффициенты теплоотдачи на его нижней и верхней сторонах значительно отличаются. Пусть коэффициент теплоотдачи на нижней стороне пластины α_1 , а на верхней α_2 . Тогда фронты промораживания (границы раздела фаз), идущие в процессе замораживания от обеих поверхностей пластины вглубь, сойдутся не в центре пластины (как это будет иметь место в случае одинаковых коэффициентов теплоотдачи), а на некотором расстоянии R_1 от нижней стороны, причем если $\alpha_1 > \alpha_2$, то $R_1 < R$, и наоборот. (Напоминаем, что толщина пластины $2R$). Расстояние R_1 может быть вычислено по следующей формуле:

$$R_1 = \frac{2 R \alpha_1 (\lambda + R \alpha_2)}{2 R \alpha_1 \alpha_2 + \lambda (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (3)$$

Время замораживания может быть определено по формуле (1), в которой в качестве α берется α_1 , а в качестве R - R_1 из формулы (3).

Иногда формулу (1) применяют и для тел более сложной формы, определяя фактор формы θ эмпирически. Для некоторых форм (например, для параллелепипеда) имеются и теоретические формулы типа (1) (см. [1]), но они получены не строго и, кроме того, чрезвычайно громоздки. Поэтому на практике чаще аппроксимируют реальную форму тела одной из вышеперечисленных простых форм и для нее вычисляют продолжительность замораживания по формуле (1).

2. ОБСУЖДЕНИЕ ДОПУЩЕНИЙ, ПРИНЯТЫХ ПРИ ВЫВОДЕ ФОРМУЛЫ ПЛАНКА

2.1. Допущение, что тело перед началом замораживания охлаждено до криоскопической температуры, на практике обычно не выполняется. Как правило, тело перед загрузкой в морозильный аппарат имеет температуру $t_{нач} > t_{кр}$, которая равна температуре помещения, в котором хранился продукт. При погружении в замораживающую среду такое тело начинает замерзать не сразу. Вначале оно охлаждается до момента, когда температура его поверхности станет равна криоскопической. В этот момент температура внутри тела все еще выше криоскопической, и тело обладает некоторой среднеобъемной температурой t_1 , причем $t_{кр} < t_1 < t_{нач}$. После этого начинается собственно замораживание, т.е. продвижение фронта промораживания вглубь тела. Для того чтобы учесть влияние всех этих факторов на время замораживания, обычно поступают следующим образом. Вначале вычисляют время τ_1 , за которое поверхность охладится до криоскопической температуры, и среднеобъемную температуру t_1 , которую тело будет иметь на этот момент (для этого используют стандартные формулы для охлаждения тел простой формы - см. [2]). После этого вычисляют время собственно замора-

живания τ_2 по формуле (1), в которой вместо q берется:

$$q' = q + C_m (t_1 - t_{кр}), \quad (4)$$

где C_m - теплоемкость незамороженной части тела (Дж / (кг·К)). После этого итоговое время замораживания определяется как $\tau = \tau_1 + \tau_2$. Таким образом, избыточную теплоту, которую тело имеет вследствие своей недоохлажденности до криоскопической температуры на момент начала собственно замораживания, просто прибавляют к теплоте кристаллизации. Эта поправка не может считаться строгой, однако она позволяет, по крайней мере, уменьшить ошибку по сравнению с классической формулой Планка без добавок. Были предприняты некоторые попытки более строго учесть начальную температуру тела (см. [3]), однако в связи с необоснованностью принятых при этом допущений, а также чрезвычайной громоздкостью полученных формул эти способы почти не используются.

2.2. Допущение, что теплоемкость замороженной части тела равна нулю, также не выполняется. Для того чтобы получить время замораживания тела, необходимо решить так называемую задачу Стефана. Приведем ее формулировку для простейшего случая - предполагая, что выполнены допущения 1, 3 и 4. Пусть у нас имеется тело с внешней границей S_1 , охлажденное до криоскопической температуры $t_{кр}$. В момент времени $\tau = 0$ оно погружается в среду с температурой $t_c < t_{кр}$. В глубину тела начинает продвигаться фронт промораживания S_2 . Уравнения задачи Стефана выглядят следующим образом:

$$C_2 \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \nabla^2 t; \quad t \Big|_{S_2} = t_{кр}; \quad \lambda \frac{\partial t}{\partial n_1} \Big|_{S_1} = \alpha (t_c - t_{кр});$$

$$t(x, 0) = t_{кр} \quad (5)$$

$$q \rho \frac{d\Delta}{d\tau} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n_2} \Big|_{S_2}; \quad \Delta(0) = 0 \quad (6)$$

Здесь (5) - уравнение теплопроводности для замороженной части тела с двумя краевыми и одним начальным условием: C_2 - теплоемкость замороженной части тела (Дж / (кг·К)), x - координаты точки внутри замороженной части тела, $t(x, \tau)$ - распределение температуры внутри замороженной части тела, n_1 и n_2 - направления внешней нормали к соответственно S_1 и S_2 . ∇^2 - оператор Лапласа; (6) - уравнение движения фронта промораживания с начальным условием: $\Delta(\tau)$ - толщина замороженной части тела. Уравнение (6) обычно называют условием Стефана.

Задача (5) - (6) весьма сложна и почти никогда точно не решается. Если принять допущение 2, то, полагая в (5) $C_1 = 0$, мы получим уравнение $\nabla^2 t = 0$. Это означает, что распределение температуры внутри замороженной части тела является квазистационарным, т.е. в случае бесконечной пластины - линейным, в случае бесконечного цилиндра - логарифмическим, а в случае шара - гиперболическим. Подставив это квазистационарное распределение в уравнение движения фронта (6), можно получить закон движения фронта, а следовательно, и формулу для времени замораживания (1) для трех вышеперечисленных простых форм. Если же мы отказываемся от допущения 2, то, строго говоря, мы не имеем права пользоваться квазистационарным распределением. Существуют приближенные решения задач о промораживании пластины, цилиндра и шара, основанные на некоторых более точных, чем квазистационарное распределение, аппроксимациях функции $t(x, \tau)$ (см. [3], [4]). Полученные в результате этих решений формулы для времени замораживания имеют вид:

а) пластина

$$\tau_3 = \frac{R q \rho}{t_{кр} - t_c} \left(\frac{R}{2\lambda} + \frac{1}{\alpha} \right) + \frac{R C_1 \rho}{2} \left(\frac{R}{2\lambda} + \frac{1}{\alpha} \left(1 - \frac{\ln(1 + Bi)}{Bi} \right) \right). \quad (7)$$

б) цилиндр

$$\tau_3 = \frac{R q \rho}{2(t_{кр} - t_c)} \left(\frac{R}{2\lambda} + \frac{1}{\alpha} \right) + \frac{R^2 C_1 \rho}{2\lambda} \left(\int_0^{+\infty} \frac{Bi + 1 - (Bi(x+1) + 1) \exp(-x)}{x(Bi x + 2)} dx - \frac{1}{2} \right). \quad (8)$$

в) шар

$$\tau_3 = \frac{R q \rho}{3(t_{кр} - t_c)} \left(\frac{R}{2\lambda} + \frac{1}{\alpha} \right) + \frac{R C_1 \rho}{2} \left(\frac{R}{2\lambda} + \frac{Bi}{\alpha(Bi - 1)} \left(1 - \frac{\ln Bi}{Bi - 1} \right) \right). \quad (9)$$

Здесь $Bi = \alpha R / \lambda$ - критерий Био. Интеграл в (8), к сожалению, не может быть выражен через какие-либо табулированные функции, но его легко можно найти численно. Результаты численного счета показывают, что (8) неплохо аппроксимируется выражением

$$\tau_3 = \frac{R q \rho}{2(t_{кр} - t_c)} \left(\frac{R}{2\lambda} + \frac{1}{\alpha} \right) + \frac{R C_1 \rho}{2} \left(\frac{R}{2\lambda} + \frac{0,084 \ln Bi + 0,27}{\alpha} \right). \quad (10)$$

Видно, что в формулах (7) - (9) первые слагаемые представляют собой выражения, аналогичные формуле Планка (1), а вторые - добавки, учитывающие ненулевую теплоемкость замороженной части тела (если положить $C_1 = 0$, то вторые слагаемые в (7) - (9) обратятся в нуль).

Что касается случая замораживания пластины с разными коэффициентами теплоотдачи на разных сторонах, то, так же, как и в пункте 1, можно вычислять время замораживания по формуле (7), взяв в качестве α α_1 , а в качестве R R_1 , определяемое из уравнения

$$R_1 = \frac{2 R \alpha_1 (\lambda + R \alpha_2)}{2 R \alpha_1 \alpha_2 + \lambda (\alpha_1 + \alpha_2)} + \frac{C_1 (t_{к1} - t_c) \lambda^2}{(2q + C_1 (t_{кр} - t_c)) \alpha_1 \alpha_2} \times \frac{(\alpha_2^2 \ln(1 + \alpha_1 R_1 / \lambda) - \alpha_1^2 \ln(1 + \alpha_2 (2R - R_1) / \lambda))}{2 R \alpha_1 \alpha_2 + \lambda (\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (11)$$

Опять же первое слагаемое в (11) - это выражение, аналогичное формуле (3), а второе - добавка, обращающаяся в нуль при $C_1 = 0$. Уравнение (11) трансцендентное, его решение не может быть выписано в явном виде, но может быть найдено численно.

2.3. Предположение о том, что льдообразование в теле происходит полностью при криоскопической температуре, на практике также не выполняется. Вода в пищевых продуктах никогда не бывает чистой - в ней растворены соли, сахара и пр. Это приводит к тому, что вода вымораживается постепенно с понижением температуры. С этим же обстоятельством связана и зависимость теплофизических свойств замороженной части продукта от температуры. Однако это обстоятельство не является очень существенным. Дело в том, что подавляющая доля способной к вымораживанию (несвязанной) воды вымерзает в достаточно узком диапазоне температур. Например, в таких продуктах, как мясо, пресноводная рыба, яйца, молоко, салат, томаты в интервале температур от криоскопической до -5°C вымерзает более 80% несвязанной воды (см. [1]).

Что касается теплофизических параметров замороженной части, то коэффициент теплопроводности λ зависит от температуры не очень сильно. При понижении температуры от криоскопической до -30°C для большинства продуктов λ возрастает не более чем на 20%. Коэффициент теплоемкости замороженной части C_1 , напротив, меняется довольно сильно. При понижении температуры от криоскопической до -30°C для большинства продуктов C_1 уменьшается в 2-3 раза (см. [1]). Однако теплоемкость C_1 в формулу Планка (1) не входит. Она входит лишь во вторые слагаемые формул (7) - (9), которые сами составляют, как правило, 20-25% от общего

времени замораживания.

Таким образом, несмотря на реальную невыполнимость допущения 3, можно пользоваться формулами, полученными при использовании этого допущения. В качестве параметров λ и C₂ обычно берут средние их значения по диапазону температур, в котором происходит процесс, а в качестве доли вымороженной воды ω в формуле (2) - долю вымороженной воды при наименьшей температуре продукта, достигаемой в ходе процесса. Вносимая при этом погрешность обычно невелика.

2.4. Допущение 4, как правило, частично выполняется. Коэффициент теплоотдачи и температуру среды в процессе замораживания обычно стараются поддерживать хотя бы приблизительно постоянными. Плотность тела при замораживании уменьшается, но не очень сильно, не более чем на 10%. Что же касается однородности тела, то некоторые продукты являются однородными, а некоторые нет. Если продукт неоднороден, то время замораживания все равно приходится вычислять по тем же формулам, беря в качестве его теплофизических параметров их средние значения по объему тела.

3. НЕОБХОДИМОЕ ДООХЛАЖДЕНИЕ ПРОДУКТА

На практике обычно бывает недостаточно только заморозить продукт. Необходимо также доохладить его до требуемой для длительного хранения среднеобъемной температуры. Для этого необходимо знать распределение температуры в теле по окончании процесса собственно замораживания (т.е. на момент прохождения фазового перехода в центре тела), чтобы затем, по известным из математической физики формулам (см. [2]), рассчитать необходимое время доохлаждения. Из тех соображений, на основе которых была получена формула Планка, можно решить эту задачу только для случая бесконечной пластины. Действительно, принималось, что распределение температуры в замороженной части тела является квазистационарным, т.е. для пластины - линейным, для цилиндра - логарифмическим, а для шара - гиперболическим. Отсюда, учитывая, что на момент окончания собственно замораживания температура в центре тела равна криоскопической, а также учитывая условие теплоотдачи на внешней границе тела, для пластины можно получить поле температур в момент окончания замораживания:

$$t(x, \tau_1) = t_{кр} - (t_{кр} - t_c) \frac{Bi \cdot x}{Bi + 1 R} \quad (12)$$

Здесь x - координата поперек пластины (м), x = 0 отвечает центру пластины, а x = R - ее поверхности. Однако для цилиндра и шара такой формулы получить нельзя, так как квазистационарные распределения для них имеют особенность в центре. Следовательно, для решения этой проблемы для ци-

линдра и шара необходимо использовать более точные, чем квазистационарное распределение, аппроксимации поля температур в замороженной части.

К сожалению, решить эту проблему в полном объеме (т.е. найти аналитическое выражение для поля температур цилиндра и шара на момент окончания замораживания) пока не удается. Однако имеется частичное решение (см. [4]) - найдены приближенные выражения для среднеобъемной температуры цилиндра и шара в момент окончания замораживания. Эта температура равна (она обозначена t₂ в продолжение обозначений п. 2.1):

а) цилиндр

$$t_2 = t_{кр} - Bi (t_{кр} - t_c) \int_0^{+\infty} \frac{2(Bi+1) - (Bi x^2 + 2(Bi+1)(x+1)) \exp(-x)}{x (Bi x + 2)^2} dx; \quad (13)$$

б) шар

$$t_2 = t_{кр} - (t_{кр} - t_c) \left(\frac{3 Bi}{2(Bi-1)} - \frac{1}{2} - \frac{1}{Bi-1} + \frac{\ln Bi}{(Bi-1)^2} \right). \quad (14)$$

Интеграл в (13) может быть найден только численно. Результаты счета показывают, что (13) хорошо аппроксимируется выражением

$$t_2 = t_c + (t_{кр} - t_c) \frac{3 Bi + 5}{6 Bi + 5}. \quad (15)$$

Для вычисления необходимого времени доохлаждения приходится принимать, что на момент окончания замораживания температура цилиндра (шара) одинакова во всех его точках и равна t₂. Это, строго говоря, не так, однако результаты численного моделирования промораживания цилиндра и шара показывают, что в основном объеме этих тел по окончании замораживания температура будет почти одинаковой, и только в небольшом объеме около центра она заметно повышается (достигая t_{кр} в центре). Таким образом, вносимая этим допущением ошибка невелика.

4. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

В настоящем указании описывается программа, которая производит все необходимые расчеты. Она реализована на языке Quick Basic, превращена в непосредственно исполняемый .EXE - файл и упакована популярной утилитой LZEXE. Текст программы приведен в приложении. Опишем кратко ее структуру.

Строки 1 - 50. Вводим необходимые числовые данные, каждое из которых программа запрашивает по отдельности, что уменьшает вероятность ошибки при вводе. Для выявления возможной ошибки при вводе температур программа обеспечена защитой – строки 12 - 16. В этих строках происходит проверка: лежит ли значение криоскопической температуры между значениями начальной температуры и температуры среды, а также лежит ли значение температуры, до которого необходимо доохладить тело после замораживания, между значениями криоскопической температуры и температуры среды. Если это не так, программа выражает недовольство, проигрывает небольшой музыкальный фрагмент и вновь запрашивает данные.

Строки 52 - 94. Здесь происходят вычисления для случая бесконечной пластины. Программа вначале запрашивает коэффициенты теплоотдачи на обеих сторонах пластины (строки 52 - 55), рассчитывает координату схождения фронтов замораживания, исходя из формулы Планка (строка 63), время замораживания по Планку (строка 65), координату схождения фронтов с учетом теплоемкости замороженной части (строки 66 - 70), добавку к времени замораживания, учитывающую теплоемкость замороженной части (строки 71 - 73), среднеобъемную температуру пластины по окончании замораживания (строки 74 - 75), первые корни характеристического уравнения для охлаждения замороженной и незамороженной пластины (строки 76 - 81), необходимое время охлаждения до криоскопической температуры на поверхности и среднеобъемную температуру тела на этот момент (строки 82 - 85), необходимое время доохлаждения (если по окончании замораживания тело не достигло необходимой среднеобъемной температуры - в противном случае времени доохлаждения по умолчанию присваивается нулевое значение).

Строки 122 - 151 - то же для бесконечного цилиндра, 102 - 120 - для шара. Все необходимые для цилиндра интегралы вычисляются стандартным методом прямоугольников:

Строки 51, 86, 95, 101, 119, 121 и 148 являются управляющими - в зависимости от формы тела и от того, нужно ли доохладить тело после замораживания, они отдадут управление нужному блоку программы.

Строки 152 - 182. Здесь происходит вывод результатов на экран. Если вычисленное по приближению первого члена ряда время охлаждения (доохлаждения) оказывается отрицательным, то программа пишет, что оно незначительно (см. [2]).

Строки 183 - 189. Здесь программа запрашивает, нужно ли провести вычисления еще раз. Если нажать клавишу с буквой "Д" ("Да"), то программа снова начнет работать с самого начала. Если же нажать "Н" ("Нет"), то программа закончит работу.

5. ИНСТРУКЦИЯ ПО РАБОТЕ С ПРОГРАММОЙ

В настоящем разделе будет приведена подробная инструкция по пользованию программой. Она рассчитана на пользователя, не имеющего никаких на-

выков работы на компьютере.

1. Включить машину, т. е. воткнуть вилку блока питания в розетку, включить сам блок переключателем "сеть" и нажать кнопку "power" на корпусе.

2. Подождать около 1 минуты, пока машина загрузится, т. е. до появления на экране синих панелей (Norton Commander).

3. На экране будет виден курсор, который перемещается по экрану посредством нажатия кнопок со стрелочками (курсорных клавиш). Необходимо подвести курсор к названию файла "freeze.exe" и нажать клавишу "Enter".

4. После этого программа сама начнет запрашивать исходные данные. Вводить их следует посредством клавиш с цифрами. Вместо запятой, которая отделяет целую часть числа от дробной, нужно использовать точку (клавиша с буквой "ю"). Если целая часть числа равна нулю, то вводить перед точкой нуль не обязательно (например, число 0,5 можно набрать так: .5). При вводе отрицательных чисел перед ними необходимо набрать знак "минус" - клавиша справа от клавиши "ноль". После того, как число набрано, нужно нажать клавишу "Enter". После этого машина запросит следующее данное.

5. После того, как все данные будут введены, машина выдаст на экран расчетное время и спросит, нужно ли еще раз произвести расчет. Если нажать клавишу с буквой "Н", то программа закончит работу, и вы снова увидите на экране синие панели Norton Commander.

6. Если при вводе данных вы ошиблись и набрали не то:

а) если при этом вы не успели нажать клавишу "Enter", то вы можете убрать неправильные цифры с помощью клавиши "Back Space";

б) если вы уже нажали "Enter", т. е. ввели неправильное данное в программу, то придется досчитать до конца с неправильными данными, а затем запустить программу снова.

7. После того, как все вычисления закончены, нужно выключить машину в последовательности: обратной позиции 1 (кнопка "Power", переключатель "сеть" на блоке питания, вилка из розетки).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чижев Г.Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. - М.: Пищ. пром - сть, 1979. - 272 с.
2. Фролов С.В. Расчет времени охлаждения и нагревания тел простой формы: Метод. указания к дипломному проектированию для студентов технологических спец. - СПб.: СПбГАХПТ, 1996. - 20 с.
3. Бражников А.М. Теория термической обработки мясопродуктов. - М.: Агропромиздат, 1987. - 272 с.
4. Куцакова В.Е., Фролов С.В. Расчет времени замораживания с учетом времени охлаждения до криоскопической температуры, времени фазового перехода и времени доохлаждения замороженного объекта//Проблемы теплофизики и теплообмена в холодильной технике: Межвуз. сб. научн. тр. - СПб.: СПбГАХПТ, 1994. - С. 105 - 111.

ПРИЛОЖЕНИЕ

```

1 CLS
2 DEFINT I
3 PRINT " Задайте температуру окружающей среды ( градусы Цельсия )"
4 INPUT TA
5 PRINT " Задайте начальную температуру тела ( градусы Цельсия )"
6 INPUT TB
7 PRINT " Задайте среднееобъемную температуру , до которой необходимо "
8 PRINT " доохладить тело после замораживания ( градусы Цельсия )"
9 INPUT TS
10 PRINT " Задайте криоскопическую температуру ( градусы Цельсия )"
11 INPUT TC
12 IF TA > TC OR TB < TC OR TS > TC OR TS < TA THEN
13 PRINT "      Что за чушь ?! Задайте нормальные данные !"
14 PLAY "T3201>L20CDEDCDL10ECC"
15 GOTO 1
16 END IF
17 DT = (TA - TB) / (TA - TC)
18 PRINT "      Задайте размер тела (м) ( для пластины - толщину , "
19 PRINT "      для цилиндра и шара - радиус )"
20 INPUT R
21 PRINT "      Задайте влажность тела (доли единицы)"
22 INPUT s
23 PRINT "      Задайте долю вымороженной воды (доли единицы)"
24 INPUT ss
25 Q = 330000 * s * ss
26 PRINT "      Задайте плотность тела (кг/м^3)"
27 INPUT ro
28 PRINT " Задайте теплопроводность замороженной части тела (Вт/(м*К))"
29 PRINT "      ( напоминаем , что для льда эта величина равна 2.3 )"
30 INPUT LF
31 PRINT " Задайте удельную теплоемкость замороженной части тела
(Дж/(кг*К))"
32 PRINT "      ( напоминаем , что для льда эта величина равна 1800 )"
33 INPUT CF
34 KF = CF * ro * R ^ 2 / LF
35 PRINT " Задайте теплопроводность незамороженной части (Вт/(м*К))"
36 PRINT "      ( напоминаем , что для воды эта величина равна .55 )"
37 INPUT LUF
38 PRINT " Задайте удельную теплоемкость незамороженной части тела
(Дж/(кг*К))"
39 PRINT "      ( напоминаем , что для воды эта величина равна 4200 )"
40 INPUT CUF

```

```

41 KUF = CUF * ro * R ^ 2 / LUF
42 PRINT " Задайте термическое сопротивление ( толщина , деленная на "
43 PRINT "      теплопроводность ) упаковки ( м^2*К/Вт )."
44 PRINT "      Если ее нет , то введите ноль."
45 INPUT AUP
46 PRINT "      Задайте форму тела ( П - пластина , Ц - цилиндр , Ш - шар )"
47 WHILE INKEY$ <> "": WEND
48 DO
49 f$ = UCASE$(INKEY$)
50 LOOP UNTIL f$ = "G" OR f$ = "W" OR f$ = "I"
51 IF NOT f$ = "G" THEN GOTO 96
52 PRINT "Задайте коэффициенты теплоотдачи на одной и другой сторонах"
53 PRINT "      пластины (Вт/(м^2*К))"
54 INPUT A1
55 INPUT A2
56 IF A1 < A2 THEN SWAP A1, A2
57 A1 = 1 / (1 / A1 + AUP)
58 A2 = 1 / (1 / A2 + AUP)
59 BiF1 = A1 * R / LF
60 BiF2 = A2 * R / LF
61 BiUF1 = A1 * R / LUF
62 BiUF2 = A2 * R / LUF
63 X10 = (.5 * R ^ 2 / LF + R / A2) / (R / LF + 1 / A1 + 1 / A2)
64 X1 = X10
65 TMPL = Q * ro * (.5 * X1 ^ 2 / LF + X1 / A1) / (TC - TA)
66 DO
67 XX1 = (LOG(1+A1 * X1 / LF)) / A1 ^ 2 - (LOG(1+A2 * (R-X1) / LF)) / A2 ^ 2
68 XX1 = X10 + .5 * CF * ro * LF * XX1 / ((Q * ro / (TC - TA) + CF * ro / 2) * (R
/ LF + 1 / A1 + 1 / A2))
69 X1 = XX1
70 LOOP UNTIL ABS(XX1 - X1) < .001
71 TMFR = (Q * ro / (TC - TA) + CF * ro / 2) * (.5 * X1 ^ 2 / LF + X1 / A1)
72 TMFR = TMFR - .5 * CF * ro * LF * (LOG(1 + A1 * X1 / LF)) / A1 ^ 2
73 DTMF1 = TMFR - TMPL
74 MTH = 2 * LF ^ 2 * R + LF * (A1 * X1 ^ 2 + A2 * (R - X1) ^ 2) + (R * A1 *
A2 + 2 * LF * (A1 + A2)) * X1 * (R - X1)
75 MT = .5 * (TC-TA) * MTH / (R * (LF+A1 * X1) * (LF+A2 * (R - X1))) + TA
76 muf = 1.570796
77 mf = 1.570796
78 FOR i = 2 TO 13 STEP 1
79 muf = muf + 3.141593 * SGN(muf * (BiUF1 + BiUF2) * COS(muf) - (muf ^ 2 -
BiUF1 * BiUF2) * SIN(muf)) / 2 ^ i
80 mf = mf + 3.141593 * SGN(mf * (BiF1 + BiF2) * COS(mf) - (mf ^ 2 - BiF1 *
BiF2) * SIN(mf)) / 2 ^ i

```

```

81 NEXT i
82 nuf = .5 * (muf ^ 2 + BiUF1 + BiUF1 ^ 2) + .25 * (muf ^ 2 - BiUF1 ^ 2) *
SIN(2 * muf) / muf - .5 * BiUF1 * COS(2 * muf)
83 nuf = (muf * SIN(muf) + BiUF1 * (1 - COS(muf))) / nuf
84 DTMUF1 = KUF * LOG(DT * nuf) / muf ^ 2
85 TW = TA + (TC - TA) * (muf * SIN(muf) + BiUF1 * (1 - COS(muf))) / muf ^ 2
86 IF MT < TS THEN GOTO 152
87 nf1 = (LF + A1 * X1 + A1 ^ 2 * R ^ 2 / (LF * mf ^ 2)) * SIN(mf * X1 / R)
88 nf1 = nf1 - A1 ^ 2 * R * X1 * (COS(mf * X1 / R)) / (mf * LF)
89 nf2 = (LF - A1 * A2 * R ^ 2 / (mf ^ 2 * LF)) * SIN(mf) - (A1 + A2) * R *
(COS(mf)) / mf
90 nf2 = nf2 + (-A2 * R - LF + A2 * X1 + A1 * A2 * R ^ 2 / (LF * mf ^ 2)) *
SIN(mf * X1 / R)
91 nf2 = nf2 + (A1 * A2 * R * (R - X1) / (LF * mf) + (A1 + A2) * R / mf) *
COS(mf * X1 / R)
92 nf = nf1 / (A1 * X1 + LF) + nf2 / (A2 * (R - X1) + LF)
93 nf = nf / (.5 * (mf ^ 2 + BiF1 + BiF1 ^ 2) + .25 * (mf ^ 2 - BiF1 ^ 2) * SIN(2 *
mf) / mf - .5 * BiF1 * COS(2 * mf))
94 DTMF2 = KF * LOG((TC - TA) * nf * (SIN(mf) + BiF1 * (1 - COS(mf)) / mf) /
(TS - TA)) / mf ^ 2
95 GOTO 152
96 PRINT "          Задайте коэффициент теплоотдачи с поверхности тела
(Br/(м^2*К))"
97 INPUT a
98 a = 1 / (1 / a + AUP)
99 BiF = a * R / LF
100 BiUF = a * R / LUF
101 IF f$ = "W" THEN GOTO 122
102 TMPL = -Q * ro * R ^ 2 * (.5 + 1 / BiF) / (3 * LF * (TA - TC))
103 PF = BiF - 1
104 PUF = BiUF - 1
105 DTMF1 = (.25 + .5 / PF - .5 * LOG(BiF) / PF ^ 2) * KF
106 MT = TA - (1 - 1.5 * BiF * (.5 - 1 / PF + LOG(BiF) / PF ^ 2) / PF) * (TA - TC)
107 muf = 1.570796
108 mf = 1.570796
109 FOR i = 2 TO 13 STEP 1
110 muf = muf + 3.141593 * SGN(PUF * SIN(muf) + muf * COS(muf)) / 2 ^ i
111 mf = mf + 3.141593 * SGN(PF * SIN(mf) + mf * COS(mf)) / 2 ^ i
112 NEXT i
113 nuf = SQR(muf ^ 2 + PUF ^ 2) / (n .jf * (muf ^ 2 + BiUF * PUF))
114 nuf = 2 * nuf * BiUF * SIN(muf)
115 nf = SQR(mf ^ 2 + PF ^ 2) / (mf ^ 3 * (mf ^ 2 + BiF * PF))
116 nf = 6 * BiF ^ 2 * nf * SIN(mf)
117 DTMUF1 = KUF * LOG(nuf * DT) / muf ^ 2

```

```

118 TW = TA - (TA - TC) * 3 * BiUF / muf ^ 2
119 IF MT < TS THEN GOTO 152
120 DTMF2 = KF * LOG(nf * (MT - TA) / (TS - TA)) / mf ^ 2
121 GOTO 152
122 TMPL = -Q * ro * R ^ 2 * (.5 + 1 / BiF) / (2 * LF * (TA - TC))
123 TMF = .25 / 20 + .25 * (1 + BiF) * LOG(1 + 2 / (BiF * 20)) - .25
124 MTF = 1 - .5 * BiF * (BiF + 1) * (LOG(1 + .1 / BiF) - 2 / (20 * BiF + 2))
125 FOR i = 1 TO 399 STEP 1
126 y = i / 20
127 z = EXP(-y)
128 w = y + 2 / BiF
129 PF = 1 + 1 / BiF
130 TMF = TMF + (-y * z + PF * (1 - z)) / (y * w * 40)
131 MTF = MTF - (-y ^ 2 * z + 2 * PF * (1 - z - y * z)) / (y * w ^ 2 * 20)
132 NEXT i
133 DTMF1 = TMF * KF
134 MT = TA - (TA - TC) * MTF
135 mf = 1.2024
136 muf = 1.2024
137 FOR i = 1 TO 13 STEP 1
138 x = mf / 2
139 J0F = 1 - x ^ 2 + x ^ 4 / 4 - x ^ 6 / 36 + x ^ 8 / 576 - x ^ 10 / 14400
140 J1F = x - x ^ 3 / 2 + x ^ 5 / 12 - x ^ 7 / 144 + x ^ 9 / 2880
141 x = muf / 2
142 J0UF = 1 - x ^ 2 + x ^ 4 / 4 - x ^ 6 / 36 + x ^ 8 / 576 - x ^ 10 / 14400
143 J1UF = x - x ^ 3 / 2 + x ^ 5 / 12 - x ^ 7 / 144 + x ^ 9 / 2880
144 muf = muf + 1.2024 * SGN(BiUF * J0UF - muf * J1UF) / 2 ^ i
145 mf = mf + 1.2024 * SGN(BiF * J0F - mf * J1F) / 2 ^ i
146 NEXT i
147 DTMUF1 = KUF * LOG(2 * BiUF * DT / (muf ^ 2 + BiUF ^ 2)) / muf ^ 2
148 TW = TA - (TA - TC) * 2 * BiUF / muf ^ 2
149 IF MT < TS THEN GOTO 152
150 DTF = (MT - TA) / (TS - TA)
151 DTMF2 = KF * LOG(4 * BiF ^ 2 * DTF / (mf ^ 4 + (BiF * mf ^ 2))) / mf ^ 2
152 IF TW > TB THEN TW = TB
153 DTMUF2 = TMPL * CUF * TW / Q
154 CLS
155 PRINT "          Время охлаждения до криоскопической температуры на
поверхности"
156 IF DTMUF1 > 0 THEN PRINT "          ", DTMUF1, "с"
157 IF DTMUF1 < 0 THEN PRINT "          незначительно"
158 PRINT "          Время замораживания по Планку "
159 PRINT "          ", TMPL, "с"
160 PRINT "          Добавка ко времени замораживания , учитывающая

```



```
161 PRINT "      теплоемкость замороженной части тела "  
162 PRINT "      ", DTMF1, "с"  
163 PRINT "Добавка ко времени замораживания , учитывающая среднеобъ-"  
164 PRINT " емную температуру тела в момент начала замораживания "  
165 PRINT "      ", DTMUF2, "с"  
166 PRINT "      Итоговое время собственно замораживания"  
167 TM = TMPL + DTMF1 + DTMUF2  
168 PRINT "      ", TM, "с"  
170 PRINT "Среднеобъемная температура по окончании замораживания "  
171 PRINT "      ", MT, "С"  
172 PRINT "      Необходимое время доохлаждения"  
173 IF DTMF2 > 0 OR DTMF2 = 0 THEN PRINT "      ", DTMF2, "с"  
174 IF DTMF2 < 0 THEN PRINT "      незначительно"  
175 IF DTMUF1 < 0 THEN DTMUF1 = 0  
176 IF DTMF2 < 0 THEN DTMF2 = 0  
177 PRINT "      Итоговое время процесса"  
178 TT = TM + DTMUF1 + DTMF2  
179 PRINT "      ", TT, "с"  
180 QQ = Q + CUF * (TB - TC) - CF * (TS - TC)  
181 PRINT "      Теплота,отводимая от продукта за время процесса "  
182 PRINT "      ", QQ, "Дж/кг"  
183 PRINT "      Хотите запустить программу снова (Д/Н) ?"  
184 WHILE INKEY$ <> "": WEND  
185 DO  
186 kbd$ = UCASE$(INKEY$)  
187 LOOP UNTIL kbd$ = "L" OR kbd$ = "Y"  
188 IF kbd$ = "L" THEN GOTO 1  
189 END
```

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение. Формула Планка.	3
2. Обсуждение допущений, принятых при выводе формулы Планка.	4
3. Необходимое доохлаждение продукта.	8
4. Описание программы.	9
5. Инструкция по работе с программой.	10
Список литературы.	11
Приложение.	12

Фролов Сергей Владимирович

РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ЗАМОРАЖИВАНИЯ ТЕЛ ПРОСТОЙ ФОРМЫ

Методические указания
к дипломному и курсовому проектированию
для студентов специальностей 260301, 260504,
бакалавров, магистрантов по направлению 552400
всех форм обучения

Второе издание, исправленное

Редакторы

Т.Г. Смирнова, Е.Л. Масальцева

Корректор

Н.И. Михайлова

Подписано в печать 05.03.08. Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 1,16. Печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,0
Тираж 50 экз. Заказ № 73. С 68

СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9
ИИК СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9