

Компонент ОПОП 15.03.02 "Технологические машины и оборудование"
наименование ОПОП

направленность (профиль) /специализация
Инжиниринг технологического оборудования
Б1.В.09 (очная форма, заочная форма)
шифр дисциплины

по дисциплине **Методические указания к лабораторным работам**
Основы научных исследований

Разработчик (и):

Ершов М.А.

ФИО

доцент

должность

канд.техн.наук

ученая степень,
звание

Утверждено на заседании кафедры

Технологического и холодильного оборудо-
вания

наименование кафедры

протокол № 10 от 22.06.2022

Заведующий кафедрой

ТХО

подпись

В.А. Похольченко

ФИО

Мурманск
2021

Методические указания разработал – Ершов Михаил Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры Технологического и холодильного оборудования
Рецензент: Методические указания для лабораторных работ включают общие организационно-методические указания, перечень практических работ, список рекомендованной литературы и методические указания к практическим работам. Методические указания соответствуют требованиям рабочей программы дисциплины, изложены логично. С учетом уровня подготовки методические указания могут быть рекомендованы к использованию в учебном процессе для студентов направления (специальности) **15.03.02 "Технологические машины и оборудование"**

Методические указания обсуждены и одобрены на заседании кафедры Технологического и холодильного оборудования «22» июня 2021 г., протокол № 10.

ОБЩИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

№ п/п	Темы лабораторных занятий
1	2
	Очная форма
1	Лабораторная работа № 1 Интерполирование экспериментальных данных
2	Лабораторная работа №2 Расчет продолжительности замораживания мяса
3	Лабораторная работа №3 Приближенное интегрирование
4	Лабораторная работа №4 Номографический расчет продолжительности охлаждения
5	Лабораторная работа № 5 Сглаживание экспериментальных данных

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература:

1. Глазунов, Ю. Т. Моделирование процессов пищевых производств : учеб. пособие для вузов / Ю. Т. Глазунов, А. М. Ершов, М. А. Ершов ; Центр. учеб.-метод. каб. Гос. ком. РФ по рыболовству. - Москва : Колос, 2008. - 358 с.

2. Основы прикладных научных исследований : учебник для вузов / А. П. Болдин, В. А. Максимов. - Москва : Академия, 2012. – 333 с.

Дополнительная литература:

3. Вайнштейн М.З. Основы прикладных научных исследований [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Вайнштейн М.З., Вайнштейн В.М., Кононова О.В.— Электрон. текстовые данные.— Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, Поволжский государственный технологический университет, ЭБС АСВ, 2011.— 216 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/22586.html>.— ЭБС «IPRbooks».

4. Технология рыбы и рыбных продуктов : учебник для вузов / [Артюхова С. А. и др.] ; под ред. А. М. Ершова. - [2-е изд.]. - Москва : Колос, 2010. - 1063 с.

Лабораторная работа № 1
Интерполирование экспериментальных данных

Цель работы: научиться применять методы интерполяции при обработке результатов экспериментов

Задачи работы:

1. Научиться находить интерполяционный многочлен второй степени.
2. Решить задачу согласно варианту.
3. Полученный многочлен представить в виде графика.

Результаты экспериментов часто получают в виде таблицы значений функции. Например, при исследовании температурных изменений в определённой точке продукта во времени мы измеряем в различные его моменты $\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_n$ значения температуры t_0, t_1, \dots, t_n ; при исследовании плотности продукта в разных пространственных точках мы получаем совокупность координат x_0, x_1, \dots, x_n и отвечающие им значения $\rho_0, \rho_1, \dots, \rho_n$ и т.п. При обработке подобных результатов часто возникают следующие вопросы: каково аналитическое выражение полученной функции, какие значения табличная функция принимает при тех промежуточных значениях аргумента, для которых её измерения не проводились? В последнем случае по окончании экспериментов повторное измерение промежуточных значений функции может оказаться затруднительным или невозможным.

Ответы на эти вопросы могут быть получены на основе использования метода интерполяции. Задача эта ставится и решается следующим образом.

Для данных значений аргумента x_0, x_1, \dots, x_n и отвечающих им значений функции $y = f(x)$: $y_0 = f(x_0), y_1 = f(x_1), \dots, y_n = f(x_n)$ найти многочлен $y = P(x)$ степени n , удовлетворяющий условиям: $P(x_0) = y_0, P(x_1) = y_1, \dots, P(x_n) = y_n$ (рис. 1)

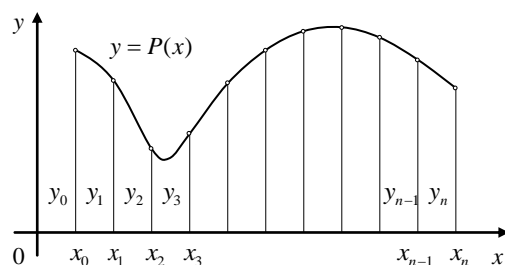


Рис. 1. Интерполируемая и интерполирующая функции

Иначе говоря, необходимо отыскать аналитическое выражение для многочлена, принимающего в заданных точках заданные значения. Точки x_0, x_1, \dots, x_n называют узлами интерполяции, а многочлен $P(x)$ – интерполяцион-

Варианты заданий

В процессе горячего копчения окуня морского были получены следующие значения температуры: $t_0; t_1; t_2$ ($^{\circ}\text{C}$), измеренной по толщине продукта x (см): $x_0; x_1; x_2$. Требуется отыскать многочлен $P(x)$ второй степени, для которого

1. $P(x_0) = t_0; P(x_1) = t_1; P(x_2) = t_2$. Используя полученный многочлен, определить температуру в точках x_3 и x_4 . Полученный многочлен представить в виде графика. На график нанести значения $P(x_3) = t_3; P(x_4) = t_4$.

№варианта	x_0	x_1	x_2	t_0	t_1	t_2	x_3	x_4
1	0	2	4	120	60	20	1	3
2	0	1	2	100	80	40	0,5	1,5
3	0	1	2	100	60	40	0,5	1,5
4	0	2	4	90	60	20	1	2
5	0	3	6	120	60	40	1,5	5
6	0	1	2	110	75	30	0,5	1,5
7	0	3	6	120	90	60	1,5	5
8	0	2	4	140	80	40	0,5	3
9	0	1	2	130	90	45	0,5	1,5
10	0	2	4	120	100	60	1	2,5

Лабораторная работа №2
Расчет продолжительности замораживания мяса

Цель – научиться определять продолжительность замораживания, теплофизические до и после замораживания, среднюю конечную температуру объекта, среднюю скорость замораживания

Пояснения к работе

Международный институт холода рекомендовал для приблизительного определения продолжительности замораживания продуктов формулу Планка в следующем виде:

$$\tau = \frac{q_3 \rho \cdot l}{3,6(t_{кр} - t_{охл.с.})N} \left(\frac{l}{4\lambda_m} + \frac{1}{\alpha} + \sum^n \delta_i / \lambda_i \right),$$

где τ – продолжительность замораживания, ч;

q_3 – полная удельная теплота, отводимая от рыбы при замораживании от начальной температуры \bar{t}_n до среднеконечной температуры $\bar{t}_{ск}$, кДж/кг;

ρ – плотность замороженного мяса, кг/м³;

l – толщина блока, м;

$t_{охл.с.}$ – температура охлаждающей среды, °С;

$t_{кр}$ – криоскопическая температура мяса, °С (для рыбы $t_{кр} = -2$ °С);

N – коэффициент зависящий от формы замораживаемого полуфабриката:

для блока рыбы при двустороннем замораживании $N=2$; форма близкая к цилиндру $N=4$; шарообразная форма $N=6$;

λ_m – коэффициент теплопроводности рыбы при средней температуре ее в процессе замораживания между криоскопической и среднеконечной температурами, Вт/(м град);

α – коэффициент теплоотдачи к теплоотводящей среде, Вт/(м²·град);

δ_i – толщина слоя паковки, (м);

λ_i – теплопроводность упаковочного материала, Вт/(м град);

$\sum^n \delta_i / \lambda_i$ – сумма термических сопротивлений слоев упаковки.

Определяем полную удельную теплоту, отводимую от рыбы при замораживании от начальной температуры \bar{t}_n до среднеконечной температуры $\bar{t}_{ск}$.

$$q_3 = C_0(t_n - t_{кр}) + W \cdot \varpi \cdot r + C_m(t_{кр} - t_{ск})$$

- C_0 – удельная теплоемкость мяса при температуре выше криоскопической:

$$C_0 = C_v B + C_{ж} Ж + C_{пв} пв,$$

где $C_v, C_{ж}, C_{пв}$ – удельная теплоемкость соответственно воды, жира, плотных веществ, кДж/(кг град);

$B, Ж, Пв$ – содержание в рыбе воды, жира, плотных веществ в долях единицы.

Для рыбы удельная теплоемкость соответственно воды, жира, плотных веществ:

$$C_v = 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град});$$

$$C_{ж} = 2,1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град});$$

$$C_{пв} = 1,34 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град});$$

- W содержание воды в рыбе в долях единицы.

- ϖ – доля вымороженной воды при температуре средней конечной $\bar{t}_{ск}$:

$$\varpi = 1 - \left(\frac{t_{кр}}{t_{ск}} \right)$$

- Определяем среднюю конечную температуру:

$$t_{ск} = \frac{t_{цк} + t_{нк}}{2},$$

где $t_{цк}$ - температура в центре объекта в конце процесса замораживания;

$t_{нк}$ - температура конечная на поверхности продукта, которая зависит от коэффициента теплоотдачи к теплоотводящей среде α и от температуры охлаждающей среды $t_{охл.с}$:

$$\alpha \approx 0 \div 40 \text{ Вт / (м}^2 \text{ град)} - t_{нк} = 0,8 \cdot t_{охл.с}$$

$$\alpha \approx 40 \div 100 \text{ Вт / (м}^2 \text{ град)} - t_{нк} = 0,9 \cdot t_{охл.с}$$

$$\alpha \approx > 100 \text{ Вт / (м}^2 \text{ град)} - t_{нк} = t_{охл.с}$$

- r – удельная теплота льдообразования, кДж/кг (для рыбы принимается равной 335 кДж/кг)
- Рассчитываем C_m - удельную теплоемкость мяса после замораживания, кДж/(кг·град):

$$C_m = C_0 - 2,1 \cdot W \cdot \varpi;$$

- Находим теплопроводность замороженной рыбы, Вт/(м² град):

$$\lambda_m = 1,74 W \varpi + 0,23.$$

Коэффициент теплоотдачи к теплоотводящей среде α , Вт/ (м²·град), зависит от типа морозильного аппарата. В рамках задания все морозильные аппараты разобьем на четыре типа:

- морозильные аппараты с принудительной циркуляцией воздуха (I тип):

$$\alpha = 8,73 v^{0,8};$$

где v - скорость движения воздуха относительно рыбы.

- морозильные аппараты с применением интенсивной циркуляции воздуха и использованием ребренных блок-форм (II тип):

$$\alpha = 40 \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{град)}.$$

- морозильные аппараты рассольного типа (III тип):

$$\alpha = 700 \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{град)}.$$

- морозильные аппараты кипящим хладагентом (IV тип):

$$\alpha = 1400 \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{град)}.$$

Пример решения задачи

Задание:

рассчитать продолжительность замораживания рыбы, определить среднюю скорость замораживания.

Исходные данные:

- морозильный аппарат с принудительной циркуляцией воздуха (I тип): $v = 5$ м/с;
- форма объекта замораживания: цилиндр, $N=4$;
- $l = 0,1$ м;
- химический состав рыбы:

- $B = 68 \%$;
- $\mathcal{Ж} = 13 \%$;
- $ПВ = 19 \%$.
- $t_n = 18 \text{ }^\circ\text{C}$;
- $t_{кр} = -2 \text{ }^\circ\text{C}$;
- $t_{цк} = -25 \text{ }^\circ\text{C}$;
- $t_{охл.с.} = -32 \text{ }^\circ\text{C}$;
- $r = 335 \text{ кДж/кг}$;
- $\rho = 950 \text{ кг/м}^3$;
- $\sum \delta_i / \lambda_i = 0,0034 \text{ (м}^2 \cdot \text{град) / Вт}$;
- $\alpha = 8,73 \text{ в}^{0,8}$; $\alpha = 8,73 \cdot 5^{0,8} = 31,63 \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{град)}$

Решение.

- Находим удельную теплоемкость мяса при температуре выше криоскопической:

$$C_0 = C_e B + C_{жс} \mathcal{Ж} + C_{нев} пв;$$

$$C_0 = 4,18 \cdot 0,68 + 2,1 \cdot 0,13 + 0,19 \cdot 1,34 = 3,37 \text{ кДж / (кг град)};$$

Определяем среднюю конечную температуру:

$$t_{ск} = \frac{t_{цк} + t_{нк}}{2};$$

$t_{нк}$ - температура конечная на поверхности продукта зависит от коэффициента теплоотдачи к теплоотводящей среде α и от температуры охлаждающей среды $t_{охл.с.}$:

$$t_{нк} = 0,8 \cdot t_{охл.с.}; t_{нк} = 0,8 \cdot -32 = -25,6 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{ск} = \frac{-25,6 - 25}{2} = -25,3 \text{ }^\circ\text{C}.$$

- Доля вымороженной воды при температуре средней конечной $t_{ск}$:

$$\varpi = 1 - \left(\frac{t_{кр}}{t_{ск}} \right); \varpi = 1 - \left(\frac{-2}{-25,3} \right) = 0,92$$

- Определяем удельную теплоемкость мяса после замораживания:

$$C_m = C_0 - 2,1 \cdot W \cdot \varpi; C_m = 3,37 - 2,1 \cdot 0,68 \cdot 0,92 = 2,06 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{град)}.$$

- Находим теплопроводность замороженной рыбы:

$$\lambda_m = 1,74 W \varpi + 0,23; \lambda_m = 1,74 \cdot 0,68 \cdot 0,92 + 0,23 = 1,32 \text{ Вт / (м}^2 \text{ град)}.$$

- Определяем полную удельную теплоту, отводимую от рыбы при замораживании от начальной температуры t_n до средней конечной температуры $t_{ск}$:

$$q_3 = C_0(t_n - t_{кр}) + W \cdot \varpi \cdot r + C_m(t_{кр} - t_{ск});$$

$$q_3 = 3,37(18 - (-2)) + 0,92 \cdot 0,68 \cdot 335 + 2,06(-2 - (-25,3)) = 332 \text{ кДж/кг}.$$

- Продолжительность замораживания:

$$\tau = \frac{q_3 \rho \cdot l}{3,6(t_{кр} - t_{охл.с.})N \left(\frac{l}{4\lambda_m} + \frac{1}{\alpha} + \sum \delta_i / \lambda_i \right)};$$

$$\tau = \frac{332 \cdot 950 \cdot 0,1}{3,6(-2 + 32) \cdot 4} \cdot \left(\frac{l}{4 \cdot 1,32} + \frac{1}{31,63} + 0,0034 \right) = 3,9 \text{ ч}$$

• Средняя скорость замораживания:

$$V = l/\tau; V = 0,1/3,9 = 0,025 \text{ м/ч}; V = 2,5 \text{ см/ч.}$$

Варианты заданий

№; вари- анта	Тип моро- зильного аппарата	Форма продукта	l, м	Химический состав продукта, %			Температура, °С		
				В	Ж	ПВ	t _н	t _{нк}	t _{охл.с}
1	1.v = 2 м/с	цилиндр	0,1	74	8	18	15	-18	-30
2	3	пластина	0,05	74	8	18	18	-20	-32
3	1.v = 3 м/с	цилиндр	0,07	74	8	18	16	-25	-33
4	1.v = 5м/с	цилиндр	0,05	78	3	19	18	-18	-34
5	4	пластина	0,07	70	9	21	10	-19	-45
6	1.v = 3 м/с	цилиндр	0,1	70	9	21	5	-22	-34
7	2	пластина	0,08	70	9	21	7	-28	-34
8	3	пластина	0,07	68	13	19	12	-19	-40
9	2	пластина	0,08	68	13	19	14	-20	-35
10	4	пластина	0,08	68	13	19	7	-23	-38
11	1.v = 3 м/с	цилиндр	0,1	68	13	19	18	-25	-32
12	4	пластина	0,07	79	2	19	10	-18	-38
13	1.v = 5м/с	цилиндр	0,1	79	2	19	3	-18	-45
14	2	пластина	0,07	79	2	19	5	-21	-46
15	3	пластина	0,07	74	8	18	7	-25	-36
16	1.v = 3 м/с	цилиндр	0,1	74	8	18	8	-26	-45
17	4	пластина	0,07	68	12	20	9	-20	-35
18	1.v = 7 м/с	пластина	0,1	68	12	20	13	-23	-40

Лабораторная работа №3
Приближенное интегрирование

Цель работы: изучить методы применения численного интегрирования.

Задачи работы:

- 1. Изучить правила использования формул для численного интегрирования.**
- 2. Научиться применять квадратурные формулы – формулу трапеций и формулу парабол (формулу Симпсона), выполнив расчетное задание.**

Одна из задач обработки экспериментальных результатов состоит в восстановлении характеристик процесса по его косвенным признакам. При этом исследователя зачастую интересует суммарная величина характеристики, накопленная к определённом времени или в ходе всего процесса. К подобным задачам относятся, например, определение потери влагосодержания продукта по известным данным о скорости его изменения в процессе сушки в различные моменты времени; нахождение суммарного содержания фенолов или кислот в процессе копчения по аналогичным данным. К таким задачам относится и нахождение общего количества тепла, израсходованного на нагревание продукта, по известному из эксперимента пространственно-временному распределению температуры и т.п.

В подобных случаях прибегают обычно к численному интегрированию табличных данных с помощью, так называемых, *квадратурных формул*. Также, как и при численном дифференцировании, их вывод основывается на замене функции интерполяционным полиномом. Только в роли приближаемой функции выступает здесь подынтегральная функция. Последующее интегрирование полинома и приводит к искомому результату.

Рассмотрим в дальнейшем две наиболее распространенные квадратурные формулы - формулу трапеций и формулу парабол (формулу Симпсона), иллюстрируя рассуждения геометрической интерпретацией.

Известно, что величина интеграла

$$\int_a^b y dx \tag{1}$$

для положительной функции представляет собой площадь криволинейной трапеции, т.е. фигуры, ограниченной снизу отрезком $[a, b]$, отложенным на оси Ox , сверху - графиком функции $y = f(x)$, а слева и справа - ординатами $f(a)$ и $f(b)$. Идея обоих методов основана на замене площади этой трапеции площадями иных фигур, которые мы способны выразить через имеющиеся в нашем распоряжении табличные значения функции $y(x)$.

Рассмотрим вначале *формулу трапеций*. Для вычисления интеграла (1) по формуле трапеций промежутки интегрирования $[a, b]$ делится на n равных частей длины $h=(b-a)/n$. Эта длина при табличном задании функции y равна шагу таблицы. Пусть

$$x_i = x_0 + ih, \quad y_i = f(x_i) \quad (i = 0, 1, \dots, n),$$

причём $x_0 = a, x_n = b$ (рис. 1).

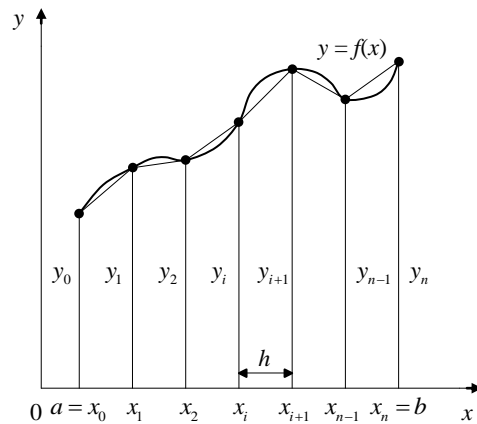


Рис. 1. Замена площади криволинейной трапеции суммой площадей трапеций

Рассмотрим промежуток $[x_i, x_{i+1}]$ и соединим верхние концы ординат y_i, y_{i+1} отрезком прямой линии. Тогда фигура, ограниченная этим отрезком, промежутком $[x_i, x_{i+1}]$ длины h и вертикальными отрезками, равными по длине ординатам y_i и y_{i+1} , представляет собой трапецию, в качестве оснований которой выступают указанные ординаты. Её площадь равна

$$\frac{y_i + y_{i+1}}{2} h.$$

Сумма площадей всех таких трапеций на отрезке $[a, b]$ и даёт приближенное значение определённого интеграла (1):

$$\int_a^b y dx \approx \frac{h}{2}(y_0 + y_1) + \frac{h}{2}(y_1 + y_2) + \dots + \frac{h}{2}(y_{n-1} + y_n).$$

Геометрически эта формула выражает замену криволинейной трапеции фигурой, ограниченной сверху ломаной линией с вершинами, отвечающими табличным значениям функции.

После элементарных преобразований формула трапеций записывается следующим образом:

$$\int_a^b y dx \approx h \left(\frac{y_0}{2} + y_1 + y_2 + \dots + y_{n-1} + \frac{y_n}{2} \right). \quad (2)$$

Формула парабол (формула Симпсона) представляет собой другой из наиболее простых и распространенных методов численного интегрирования. Несмотря на простоту, этот метод существенно точнее предыдущего. Формула Симпсона получается из следующих соображений.

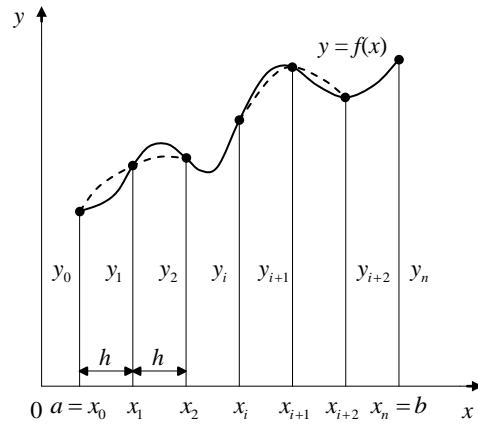


Рис. 2. Замена кривой (сплошная линия) параболой (пунктирные линии)

Пусть n является чётным числом, т.е. $n=2m$, а промежуток интегрирования $[a, b]$ разбит на элементарные промежутки так же, как и ранее. Тогда

$$h = \frac{b-a}{n} = \frac{b-a}{2m}.$$

Рассмотрим вначале удвоенный промежуток $[x_0, x_2]$ длиной $2h$ (рис. 2). На этом промежутке заменим функцию $y = f(x)$, отрезком параболы, проходящей через верхние концы ординат y_0, y_1, y_2 . Будем считать, что на промежутке $[x_0, x_2]$ площадь криволинейной трапеции, ограниченной сверху функцией $y = f(x)$, заменяется приближенно площадью другой криволинейной трапеции, ограниченной сверху указанной параболой. Последнюю площадь находим, записав уравнение соответствующей параболы в явном виде и проинтегрировав эту функцию в пределах от x_0 до x_2 . Это даёт

$$\int_{x_0}^{x_2} y dx \approx \frac{h}{3}(y_0 + 4y_1 + y_2).$$

Аналогично предыдущему на промежутке $[x_i, x_{i+2}]$ имеем

$$\int_{x_i}^{x_{i+2}} y dx \approx \frac{h}{3}(y_i + 4y_{i+1} + y_{i+2}).$$

Применяя этот приём на каждом удвоенном промежутке $[x_0, x_2], [x_2, x_4], \dots, [x_{2m-2}, x_{2m}]$, и складывая полученные результаты, находим

$$\int_a^b y dx \approx \frac{h}{3}(y_0 + 4y_1 + y_2) + \frac{h}{3}(y_2 + 4y_3 + y_4) + \dots + \frac{h}{3}(y_{2m-2} + 4y_{2m-1} + y_{2m}). \quad (3)$$

Это и есть искомая формула парабол. Введя обозначения

$$\sigma_1 = y_1 + y_3 + \dots + y_{2m-1},$$

$$\sigma_2 = y_2 + y_4 + \dots + y_{2m-2};$$

формулу (3) можно переписать в короткой форме как

$$\int_a^b y dx \approx \frac{h}{3}[(y_0 + y_{2m}) + 4\sigma_1 + 2\sigma_2]. \quad (4)$$

Итак, значение интеграла вновь выражается только через значения табличной функции и шаг таблицы.

Задание. В примере ПР № 3 были найдены скорости насыщения колбасных моделей карбонильными соединениями. Используя данные скорости насыщения $\partial c_1 / \partial \tau$ четвёртой колонки табл. примера ПР № 3, определить концентрацию карбонильных соединений в модели с целлофановой оболочкой через 60 часов после начала эксперимента, а по данным скорости насыщения $\partial c_2 / \partial \tau$ пятой колонки - концентрацию этих соединений в модели с куртизиновой оболочкой через 56 часов. Сравнить точность формул трапеций и парабол. Сделать вывод.

Пример

Решение. Очевидно, что

$$c(\tau_2) - c(\tau_1) = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{dc}{d\tau} d\tau.$$

В нашем случае $\tau_1 = 0$ и $c(\tau_1) = 0$. Поэтому концентрация вещества в момент τ_2 определяется по формуле:

$$c(\tau_2) = \int_0^{\tau_2} \frac{dc}{d\tau} d\tau.$$

Для ответа на первый вопрос используем формулу трапеций, принимая $h=4$ и $n=15$ Имеем

$$c_1(60) = \int_0^{60} \frac{dc_1}{d\tau} d\tau = 4 \left(\frac{1,242}{2} + 1,062 + 0,939 + \dots + 0,163 + \frac{0,152}{2} \right) \approx \approx 31,14 \text{ (ммоль/100 мл)}$$

Это и есть искомая формула парабол. Введя обозначения

$$\sigma_1 = y_1 + y_3 + \dots + y_{2m-1},$$

$$\sigma_2 = y_2 + y_4 + \dots + y_{2m-2};$$

формулу (3) можно переписать в короткой форме как

$$\int_a^b y dx \approx \frac{h}{3} [(y_0 + y_{2m}) + 4\sigma_1 + 2\sigma_2].$$

Вторую часть задачи решим методом Симпсона. Здесь по-прежнему $h=4$, а $2m=14$. Имеем

$$y_0 + y_{14} = 0,985 + 0,138 = 1,148,$$

$$\sigma_1 = 0,868 + 0,663 + 0,525 + 0,398 + 0,310 + 0,252 + 0,188 = 3,204,$$

$$\sigma_2 = 0,764 + 0,598 + 0,446 + 0,365 + 0,273 + 0,210 = 2,656.$$

Тогда

$$c_2(56) = \int_0^{56} \frac{dc_2}{d\tau} d\tau = \frac{4}{3} (1,148 + 4 \cdot 3,204 + 2 \cdot 2,656) \approx 25,70 \text{ (ммоль/100 мл)}.$$

Во второй и третьей колонках табл. примера ПР №3 приводятся значения концентрации карбонильных соединений, полученные в различные моменты времени экспериментально. Имеем отсюда $c_1(60) = 31,2$ и $c_2(56) = 25,7$. Сравнивая эти значения с нашими результатами замечаем, что для метода трапеций относительная погрешность результата составила величину 0,3%, а для метода Симпсона в рамках предусмотренной точности имеется полное совпадение экспериментальных и расчётных результатов.

Лабораторная работа №4
Номографический расчет продолжительности охлаждения

Цель работы: изучить номографический расчет продолжительности охлаждения

Задачи: изучить теоретическую часть работы; выполнить задание согласно варианту.

Теоретическая часть

Охлажденная рыба

Теплофизическая основа охлаждения сводится к понижению температуры тела посредством его теплообмена с окружающей средой. Полное аналитическое описание охлаждения пищевых продуктов нельзя осуществить, и приходится прибегать к упрощениям, выделяя наиболее важные стороны процесса. Теплофизические свойства охлаждаемых продуктов всегда считаются постоянными на протяжении охлаждения, кроме их энтальпий. Внешние условия охлаждения создаются в соответствии с технологическими надобностями и техническими возможностями, а влияние испарения влаги с поверхности продукта охлаждаемого воздухом на теплообмен подлежит учету. В охлажденной рыбе биохимические процессы лишь замедляются, поэтому она имеет ограниченный срок хранения, который зависит от вида гидробионта, его химического состава, качества сырья, условий охлаждения и хранения.

Охлаждение позволяет сохранить технологические свойства и пищевую ценность гидробионтов, выпустить из них наиболее высококачественные продукты с минимальным расходом энергии на 1 т продукта по сравнению с другими способами консервирования.

В результате охлаждения деятельность микроорганизмов и ферментов замедляется, что способствует увеличению сроков холодильного хранения.

Продолжительность холодильного хранения зависит от качества рыбы-сырца и температуры тела, которая должна быть от 0 до 4°C.

Особенности консервирования рыбы с помощью охлаждения

Охлаждение — способ консервирования, основанный на снижении скорости микробиологических и ферментативных процессов в тканях животных, птиц и рыбы. Продукт считается охлажденным, если его температура близка к начальной температуре t (криоскопической) — температуре замерзания межклеточного сока, представляющего собой растворы электролитов. Криоскопическая точка для различных продуктов находится в пределах от минус 0,6 до минус 2°C, а в среднем ее принимают равной минус 1°C. Процесс охлаждения заключается в передаче тепла от более нагретого тела (продукта) к менее нагретому (охлаждающая среда). Охлаждающей средой может служить любое вещество в твердом, жидком или газообразном виде, если его контакт с объектом не ухудшает его качества (отсутствие неприятного запаха и вкуса). Температура этого вещества должна быть не выше 0°C. Из охлаждающих средств наибольшее распространение имеют воздух, вода, лед, растворы различных солей, а также аммиак, фреон, криогенные жидкости (азот, кислород, двуокись углерода, двуокись углерода твердая). В зависимости от вида охлаждающей среды применяются различные способы охлаждения рыбы:

- охлаждение воздухом;
- охлаждение льдом;
- охлаждение погружением в жидкие охлажденные среды (морская вода, льдоводяная смесь, растворы хлорида натрия и хлорида кальция, смеси растворов хлорида натрия и хлорида кальция);
- охлаждение криогенными жидкостями.

Охлажденную рыбу высокого качества готовят из живой или уснувшей рыбы, перед охлаждением ее сортируют по видам и размерам. Срок хранения охлажденной рыбы можно увеличить, если перед охлаждением удалить внутренние органы и жабры.

1. Охлаждение воздухом.

Охлаждение воздухом в настоящее время используется редко, т. к. продолжительность охлаждения длительная, а сам процесс неэффективен. Этот способ используется для кратковременного нахождения рыбы (1 сутки не более) с целью направления ее на последующую переработку или разделку. Температура воздуха различная: до -10°C для крупного тунца и -3 – $(-5)^{\circ}\text{C}$ у других объектов.

2. Охлаждение льдом.

Охлаждение с использованием льда — наиболее распространенный и достаточно простой способ консервирования. На дно тары или емкости насыпают не менее 20% льда от массы рыбы, на него ровным слоем укладывают улов, на который насыпают новый слой льда и т. д. до заполнения емкости. Наверх лучше насыпать не менее 30–40% льда от массы рыбы.

Для увеличения сроков хранения рыбы применяют биостатический лед с добавкой биомицина из расчета 5 г на 1 т льда. Охлажденную рыбу в ящиках перевозят на транспортных рефрижераторах при температуре 0°C .

3. Охлаждение погружением в жидкие охлаждающие среды.

Осмотическое давление морской воды и тканевого сока рыбы приблизительно, но одинаково, поэтому при охлаждении в морской воде не происходит просаливания и значительного набухания тканей рыбы.

На некоторых судах рыбу охлаждают в бункерах морской водой, имеющей температуру от 0°C до -1°C в соотношении рыба : вода 1 : 1 или 2 : 1, температуру воды поддерживают подсыпкой льда. На других судах бункера снабжены наружными охладителями, и с их помощью охлаждают рыбу до $t = -3^{\circ}\text{C}$ в течение 1–2 ч без добавления льда. Эндотермные рыбы (тунцы) охлаждаются на судах в танках, имеющих температуру рассола хлорида натрия или хлорида кальция, или смеси растворов хлорида натрия и кальция около -12°C до температуры в поверхностном слое рыбы толщиной 1 см 0 – $(-1)^{\circ}\text{C}$ в течение 1–2 часов в зависимости от соотношения массы рыбы и рассола 1 : 1 или 1 : 2. На тех же судах для охлаждения тунцов использовали добавление в те же рассолы для охлаждения рыбы криогенные жидкости в соотношении рыба : криогенная жидкость (жидкий азот, жидкий воздух) 1 : 0,05. Продолжительность охлаждения составила 0,5 часа, а рыба имела в поверхностном слое толщиной 1 см температуру -1 – $(-2)^{\circ}\text{C}$.

Для удлинения сроков хранения рыбы ее погружали на 5 мин в ванну с водой, содержащей 25 г антибиотика на 1 м³, а затем охлаждали в льдоводяной смеси до конечной температуры 0 – 4°C .

На береговых предприятиях используют пресную воду и 2–3%-ные растворы соли. Рыбу же, предназначенную для посола, охлаждают в растворах соли концентрации 12–18%, которые имеют температуру от -12 до -18°C , погружая ее в холодную жидкую среду или орошением на конвейере.

Рыбу, охлажденную в жидкой среде, хранить возможно не более 5–6 суток, т. к. мясо набухает и теряются азотсодержащие вещества. В связи с этим ее в дальнейшем могут хранить во льду или в охлаждаемых помещениях при температуре воздуха -1 – $(-2)^{\circ}\text{C}$.

Производство охлажденной рыбы

Охлажденную рыбу изготавливают в соответствии с ТИ №10 по производству охлажденной рыбы

Прием, отбор проб и органолептическая оценка охлажденной рыбы производится по ГОСТ 7631-85 «Рыба, морские млекопитающие, морские беспозвоночные и продукты их переработки. Правила приемки, органолептические методы оценки качества, методы отбора проб для лабораторных испытаний».

Качество охлажденной рыбы регламентируется ГОСТ 814-96 «Рыба охлажденная» и ОСТ 15.58-85 «Рыба мелкая охлажденная». При этом обращается внимание на внешний вид рыбы: поверхность должна быть не побитой, чистой, естественной окраски; жабры от розового до темно-красного цвета; допускается сбитость чешуи без повреждения кожи; разделка должна быть правильной с допускаемыми небольшими отклонениями; консистенция плотная, может быть слегка ослабевшая, но не дряблая; запах свежей рыбы без порочащих запахов.

Ухудшение качества рыбы, добытой в холодных и умеренно холодных водах, в значительной степени связано с жизнедеятельностью психрофильных микроорганизмов, хорошо развивающихся при температуре 0–(+5)°С. При охлаждении рыбы эти микроорганизмы не теряют своей активности. На рыбе, выловленной в теплых водах, преимущественно встречается мезофильная микрофлора, менее устойчивая к воздействию низких температур. Эта рыба после надлежащего охлаждения менее подвержена порче, чем рыба холодных вод.

Большое влияние на качество охлажденной рыбы при хранении оказывают автолитические изменения, протекающие под воздействием протеолитических и липолитических ферментов, присутствующих в мышечной ткани и внутренних органах рыб. Эти изменения в значительной степени влияют на изменение вкусовых свойств мяса рыбы.

Пороки охлажденной рыбы

Дефекты охлажденной рыбы возникают в основном в результате ее посмертных изменений и особенно автолиза и бактериального разложения тканей, поэтому предупреждение пороков сводится к максимальному торможению этих процессов. Для торможения бактериальных процессов, приводящих к порче охлажденной рыбы, большое значение имеет санитарное состояние производства (чистота помещений, льда, тары, инвентаря, обслуживающего персонала).

Основные пороки охлажденной рыбы:

- 1) механические повреждения;
- 2) ослабевшая консистенция мышечной ткани;
- 3) лопанец;
- 4) кисловатый или гнилостный запах в жабрах;
- 5) наличие слизи мутного цвета с непонятным запахом.

Механические повреждения рыба может иметь от кусков льда при хранении, а также в процессе погрузки и выгрузки рыбы при небрежном обращении и неправильном использовании средств механизации. Ослабевшая консистенция связана с задержкой рыбы в орудиях лова и на палубе судна до начала охлаждения. Лопанец возникает вследствие ослабления и разрушения тонких стенок брюшной полости под влиянием автолиза. Появлению лопанца способствует механическое воздействие на рыбу крупных кусочков льда при ее транспортировке и хранении. Кислый или гнилостный запах в жабрах и слизи — результат воздействия на белки микрофлоры, интенсивно развивающейся при температуре около 0 °С. Появление этих запахов является следствием начинающегося распада крови и слизи, как наиболее лабильных компонентов охлажденной рыбы.

Морфометрические характеристики рыбы

Между массой рыбы G (кг) и ее абсолютной длиной L (м) существует связь, выражающаяся уравнением кубической параболы вида $G = K \cdot L^3$. Параметр параболы K выражается отношением абсолютной длины тела к его высоте B .

$$K = 90,36 \cdot \left(\frac{L}{B}\right)^{-1,495} .$$

Эмпирически, для тунцовых рыб в Северной Атлантике, связь между G (кг) и L' (см) выражаются формулами:

Эмпирически, для тунцовых рыб связь между G (кг) и L' (см) выражается формулами:

в Северной Атлантике — $G = 0,000018117 \cdot (L')^{13,0386}$,

в Индийском океане — $G = 0,000\ 040\ 5 \cdot (L')^{2,25}$.

Для ставриды, скумбрии, помолобуса, мелких тунцов предложены эмпирические зависимости между G (кг), L (м), толщиной тела в наибольшем сечении D_m , высотой тела D_b и площадью поверхности S .

$L = 0,19 G^{0,5} + 0,18$, м;

$D_m = 0,017G + 0,48$, м;

$D_m = 0,86D_b + 0,017$, м;

$S = 0,04G + 0,03$, м².

Структурно-механические характеристики рыбы

Сдвиговые свойства являются одной из наиболее важных характеристик мяса рыбы.

Среднюю плотность ρ (кг/м³) для небольшого объема определяют из соотношения

$$\rho = G/V,$$

где G — масса продукта, кг; V — объем продукта, м³.

Плотность рыбы в процессе обработки значительно изменяется. Например, плотность потрошеной рыбы составляет 1050...1080, непотрошеной — 1000...1010, мороженой — 922...887 кг/м³. Живая рыба имеет большую плотность, чем снулая. Плотность живого серебристого хека составляет 920, в состоянии посмертного окоченения 850, в мороженом виде 840 кг/м³.

Основные теплофизические характеристики (ТФХ)

В холодильной технологии наиболее важными теплофизическими свойствами рыбных и мясных продуктов являются удельная теплоемкость; теплопроводность, температуропроводность и энтальпия. Если считать пищевые продукты двухкомпонентными смесями, содержащими W частей воды и $(1 - W)$ частей сухих веществ с соответствующими удельными теплоемкостями воды c_w и сухих веществ $c_{св}$,

где $c_w = 4,19$ кДж/(кг·К) = 1 ккал/(кг·°С),

$c_{св} = 1,42$ кДж/(кг·К) = 0,34 ккал/(кг·°С), то удельная теплоемкость продукта C_0 в кДж/(кг·К) или ккал/(кг·°С) запишется в виде

$$C_0 = c_w \cdot W + c_{св} (1 - W),$$

Таким образом, чем больше воды в продукте, тем больше его теплоемкость.

Теплопроводность также зависит от химического состава продукта и при увеличении содержания воды (а, следовательно, уменьшении жирности) увеличивается:

$$\lambda = \lambda_w \cdot W + \lambda_c \cdot (1 - W),$$

где λ_w — теплопроводность воды, $\lambda_w = 0,6$ Вт/(м·К) = 0,5 ккал/(м·ч·°С); λ_c — теплопроводность сухих веществ, $\lambda_c = 0,255$ Вт/(м·К) = 0,52 ккал/(м·ч).

При температурах 0...30 °С значения λ и C изменяются незначительно.

При температурах 0–30 °С значения λ и C изменяются незначительно.

Продукты, содержащие значительное количество жира, характеризуются значением коэффициента теплопроводности, близким к 0,14 Вт/(м·К) или 0,12 ккал/(м·ч·°С).

Температуропроводность рыбы, мяса «а» в м²/с определяют по формуле

$$a = \frac{\lambda}{C \cdot \rho}$$

где λ — теплопроводность, Вт/(м·К);

c — удельная теплоемкость, кДж/(кг·К);

ρ — плотность, кг/м³.

Удельная энтальпия (теплосодержание) — количество тепла, содержащегося в единице массы продукта. За начало ее отсчета принимается значение удельной энтальпии при температуре -40°С в кДж/кг (или ккал/кг). При элементарном изменении температуры Δt приращение удельной энтальпии ΔC есть удельная теплота изобарного процесса.

$$\Delta i = C_0 \cdot \Delta t,$$

При температуре продукта от 0 до 30 °С, i в кДж/кг может быть рассчитана по формуле

$$i = ((0,75W + 0,25) \cdot t_p + 114W - 12,2) \cdot 4,187,$$

где W — массовая доля влаги в продукте, доли единицы; t_p — температура рыбы, °С.

Расчет необходимого количества холода для охлаждения рыбы

Удельная теплота процесса при изменении температуры единицы массы продукта на конечную величину вычисляется по формуле

$$g = \Delta i = (i_1 - i_2) = C_0 \cdot \Delta t,$$

где i_1 и i_2 — соответственно удельные энтальпии при начальной t_H и конечной t_K температуре продукта при охлаждении, в кДж/кг (ккал/кг); C_0 — удельная теплоемкость продукта, кДж/(кг·К) или ккал/(кг·°С).

Общее количество теплоты Q в кДж (или ккал), отводимое от продукта при охлаждении, определяется по формуле

$$Q = G \cdot g,$$

где G — масса продукта в кг,

или, используя формулу

$$Q = C_0 \cdot \Delta t \cdot G$$

Однако при этом требуется, чтобы удельная теплоемкость продукта в заданном интервале температур оставалась постоянной или было взято ее среднее значение, что удовлетворительно соблюдается при охлаждении, но нарушается, когда в продукте происходит льдообразование, особенно вблизи криоскопических температур. После смерти животного, рыбы температура в его тканях повышается в результате расщепления гликогена, креатинфосфата, АТФ

Количество выделенного удельного тепла из объекта g_1 в кДж/кг, зависящее от его вида, состояния, первоначальной температуры, определяется по формуле

$$g_1 = g' \cdot \tau,$$

где g' — скорость удельного тепловыделения объекта за счет внутренних экзотермических процессов, равная 0,6кДж/(кг·ч) при температуре 18...20 °С; τ — продолжительность пребывания объекта от момента убоя, вылова до начала охлаждения, в ч.

Для точности задания режимов охлаждения должны учитывать как экзотермичность биохимических процессов и тепловых эффектов массопереноса, а также выделение скрытого тепла (g'') при отвердевании жиров, не включенные в расчетные значения удельной теплоемкости или энтальпии.

$$g'' = \frac{G_{\text{ж}} \cdot r_{\text{ж}}}{G},$$

где $G_{\text{ж}}$ — масса жира в продукте, затвердевающего при конечной температуре; $r_{\text{ж}}$ — удельная теплота кристаллизации жира при конечной температуре, кДж/кг ($\approx 117,24$ кДж/кг).

$$r_{\text{ж}} = c_{\text{ж}} \Delta t,$$

где $c_{\text{ж}}$ — удельная теплоемкость жира, равная 2,09 кДж/кг; Δt — интервал температур от начальной до конечной температуры, °С

Влияние испарения и конденсации на баланс тепла при охлаждении следует учитывать, когда жидкая влага испаряется с поверхности продукта в воздух при

удельной теплоте испарения водяного пара $L_{\text{и}}$, а конденсация водяных паров из

воздуха на поверхность охлаждающих приборов сопровождается образованием «снеговой шубы» при удельной теплоте конденсации $L_{\text{к}}$, причем $L_{\text{к}} > L_{\text{и}}$.

Приняв $L_{\text{и}} = 2500$ кДж/кг (597 ккал/кг) и $L_{\text{к}} = 2835$ кДж/кг (677 ккал/кг), получим разность между значениями удельной теплоты конденсации и испарения, равную 13,3% от $L_{\text{к}}$. Пусть охлаждается G кг продукта, причем испарилось g''' кг влаги; относительная потеря влаги (усушка) составила

$$g_0 = \frac{g'''}{G},$$

Тогда за счет разности $L_{\text{к}}$ и $L_{\text{и}}$ охлаждающие приборы должны воспринять тепло, не отведенное от мяса, рыбы и т. д. ($Q_{\text{неот}}$)

$$Q_{\text{неот}} = G \cdot (L_{\text{к}} - L_{\text{и}}) \cdot g_0$$

Значение g_0 больше у тощих рыб, чем у жирных, вследствие повышенного содержания влаги в мясе и малого содержания липидов у тощих объектов, за- медляющих испарение влаги. Таким образом, тепло, отводимое при охлаждении продукта в воздухе и воспринимаемое приборами охлаждения, должно вклю- чать в себя удельную теплоту процесса, внутренние тепловыделения продукта, удельную теплоту кристаллизации липидов и тепловой эффект испарения- конденсации при охлаждении:

$$Q = G \cdot [C_0(t_{\text{н}} - t_{\text{к}}) + g_1 + g'' + g_0(L_{\text{к}} - L_{\text{и}})],$$

В этой формуле первое слагаемое в квадратных скобках можно заменить разностью удельных значений энтальпии ($i_{\text{н}} - i_{\text{к}}$) соответственно при $t_{\text{н}}$ и $t_{\text{к}}$ температуре охлаждаемого объекта, второе — представляющее собой удельные значения внутренних тепловыделений продукта за все время охлаждения, третье слагаемое — удельная теплота кристаллизации липидов, четвертое слагаемое — удельный тепловой эффект.

При охлаждении рыбы в ней происходят существенные физические и биохимические изменения. К физическим изменениям следует отнести увеличение плотности тканей и вязкости тканевых соков и крови, уменьшение массы рыбы за счет частичного испарения влаги с ее поверхности при охлаждении в воздушной среде (усушка рыбы). Степень усушки определяется свойствами рыбы и охлаждающей среды и условиями охлаждения. Из свойств рыбы, влияющих на степень усушки, важны плотность, размеры, наличие и характер упаковки в процессе охлаждения и хранения.

Чем больше воды в рыбе, тем больше влаги из нее испаряется, поэтому у тощих рыб усушка больше, чем у жирных, у которых содержание воды относительно меньше. Подкожный жировой слой выполняет защитную функцию, предотвращая испарение тканевой влаги. В рыбе с большой плотностью содержится больше органических веществ и, следовательно, относительно меньше воды. Размером отдельных экземпляров рыб определяется поверхность испарения. Упаковочные материалы в зависимости от их свойств могут полностью предохранять рыбу от испарения из нее влаги, либо затруднять, замедлять этот процесс, а если упаковка выполнена из гигроскопического материала, то она сама будет поглощать влагу из рыбы.

Степень усушки зависит от влажности, температуры и состояния охлаждающей среды (в покое или в движении). Количество влаги ΔG (в кг/ч), испаряющейся из рыбы в единицу времени, определяется по уравнению

$$\Delta G = \sigma F (x_n - x_k),$$

где σ - коэффициент испарения, кг/(м² ч);

F - площадь наружной поверхности продукта, м²;

x_n - влагосодержание воздуха у поверхности продукта, кг/кг;

x_k - влагосодержание воздуха в камере, кг/кг.

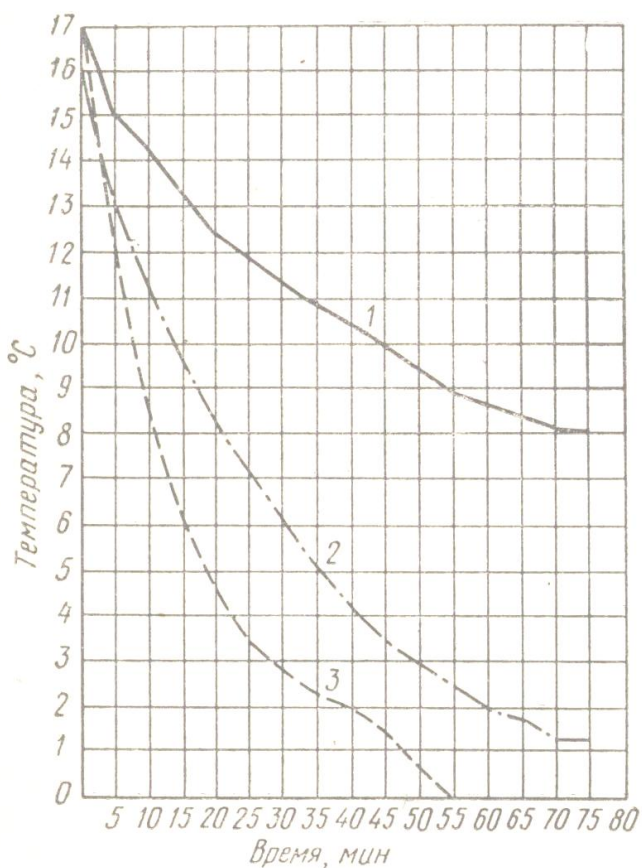
Коэффициент испарения σ показывает, сколько испаряется влаги с 1м² поверхности продукта при разности $x_n - x_k = 1$ в течение часа; Коэффициент испарения σ зависит от состояния поверхности и увеличивается с повышением скорости движения воздуха, обтекающего продукт.

После смерти животных наблюдается повышение температуры их тканей. Тепловыделения в этом случае значительно превосходят теплопродукцию при жизни организма. Это объясняется тем, что в начале посмертного периода возникают и энергично протекают процессы, связанные с расщеплением веществ, входящих в состав мышечной ткани (углеводы и эфиры фосфорной кислоты). Освобождающаяся в этих процессах энергия выделяется в виде тепла, так как она не может быть использована в физиологических процессах организма. Чем быстрее отводятся от биохимические процессы. Наиболее существенные посмертные химические изменения в рыбе, обуславливающие качество мышечной ткани при охлаждении и хранении, это изменения белковых веществ - миозина, актина и актомиозина, количественно преобладающих в тканях. В результате взаимодействия актина и миозина проявляется диссоциирующее действие аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ) и других нуклеозидтрифосфатов на актомиозин, а состояние актомиозинового комплекса оказывает большое влияние на свойства тканей, т.е. на их окоченение и ослабление. Мышечные волокна сохраняют эластичность только в присутствии достаточного количества АТФ. В свою очередь концентрация АТФ зависит от температуры; чем ниже температура в толще продукта, тем медленнее происходит распад АТФ. Следовательно, поддерживая ту или иную температуру тела свежей рыбы, можно регулировать протекающие в ней посмертные процессы. При низких температурах окоченение наступает позднее, так как концентрация АТФ продолжительное время остается на уровне, при котором невозможно образование актомиозинового комплекса. Быстрое охлаждение рыбы до криоскопической температуры задерживает образование актомиозинового комплекса и, следовательно, отодвигает сроки, окоченения, за которым (или параллельно с первичными посмертными изменениями) происходят уже разрушительные микробиологические процессы. При замедленном охлаждении рыбы темп развития микробиологических и биохимических процессов оказывается выше темпа охлаждения, и тогда нежелательные изменения в рыбе происходят раньше, чем она успевает охладиться.

Номографический расчет продолжительности охлаждения

Продолжительность охлаждения рыбы и других морепродуктов зависит от их свойств, свойств охлаждающей среды и условий, при которых протекает процесс (толщина продукта, тепловые показатели, плотность, температура охлаждающей среды, скорость и характер движения среды, влажность воздуха, коэффициент теплоотдачи от продукта к охлаждающей среде). Основные условия быстрого охлаждения рыбы - применение охлаждающей среды с более высокими значениями тепловых показателей; поддержание в процессе охлаждения возможно более низкой температуры среды; циркуляция жидкой или воздушной среды.

Охлаждение рыбы в жидкой среде должно протекать гораздо быстрее, чем в воздушной. Температура среды должна быть не ниже той температуры, при которой наступает замораживание рыбы. Вымерзание воды, содержащейся в тканях рыбы, начинается при температуре около минус 1°C , поэтому наиболее низкой температурой среды для охлаждения рыбы (с учетом допустимого перепада между температурой среды и конечной температурой охлажденного продукта) может быть температура минус 3- минус 4°C . Увеличивать скорость циркуляции среды сверх известного максимума также нецелесообразно, так как это влечет за собой большой расход энергии, а в случае охлаждения в воздушной среде происходит усушка продукта. На рис. 1 изображены кривые продолжительности охлаждения рыбы льдом и холодным рассолом ($t_p = -1^{\circ}\text{C}$).



Кривые продолжительности охлаждения рыбы толщиной 4 см:
1- на льду; 2 - во льду; 3 - в рассоле

А. П. Макашевым проведены опыты по охлаждению сардины в различных средах и в разных условиях. На основании этих опытов установлено, что скорость охлаждения рыбы в циркулирующей жидкой среде значительно выше, чем в мелкодробленом льду. Если скорость охлаждения сардины в мелкодробленом льду принять за единицу, то при прочих равных условиях скорость охлаждения в снежном льду будет выше в 1,3 раза, в охлажденной морской воде без циркуляции - в 2,9 раза, а в циркулирующей морской воде - в 5,2 раза. Для расчета продолжительности охлаждения продукта необходимо точное выражение упомянутой выше сложной зависимости - знание количественных выражений постоянных и переменных показателей объекта охлаждения и охлаждающей среды. В связи с этим расчет продолжительности охлаждения продукта труден и сложен, а на практике продолжительность охлаждения определяют на основе опытных данных. Для приблизительного теоретического расчета продолжительности охлаждения условно несколько упрощают процесс, в действительности состоящий из ряда разнообразных физических явлений. Так, например, отвод тепла при охлаждении рассматривается в условиях постоянной температуры теплоотводящей среды и постоянного коэффициента теплоотдачи на поверхности тела, а также отсутствия внешнего и внутреннего источников тепла.

Сущность номографического расчета продолжительности охлаждения

Точно определить теоретические условия охлаждения довольно сложно, поэтому необходимо ввести упрощения при расчете продолжительности охлаждения, особенно при отсутствии внутреннего источника тепла. В этом случае для тел правильной геометрической формы (пластина, шар, цилиндр) на основании теории подобия безразмерная температура θ в точке выражается как функция от чисел Био и Фурье и безразмерной координаты точки.

Для тел простой геометрической формы безразмерная температура θ может быть представлена зависимостью

$$\theta = \frac{\vartheta}{\vartheta_{\alpha}} = \varphi(Bi, Fo, \frac{x}{R})$$

где $\vartheta = t_{x,\tau} - t_c$ - избыточная температура в данный момент;

$\theta_{\alpha} = t_n - t_c$ - начальная избыточная температура;

$\frac{x}{R} = L$ - критерий геометрического подобия;

$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$ - критерий Био;

α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²/К), для циркулирующего воздуха $\alpha = 5,3 + 3,6v$, где v - скорость движения воздуха, м/с;

R - полутолщина пластины или радиус цилиндра, шара, м;

$Fo = \frac{\alpha \tau}{R^2}$ - критерий Фурье;

a - температуропроводность м²/ч.

τ - продолжительность охлаждения, ч

$t_{x,\tau}$ - температура тела в точке x в момент времени τ ;

t_n - начальная температура тела, °С;

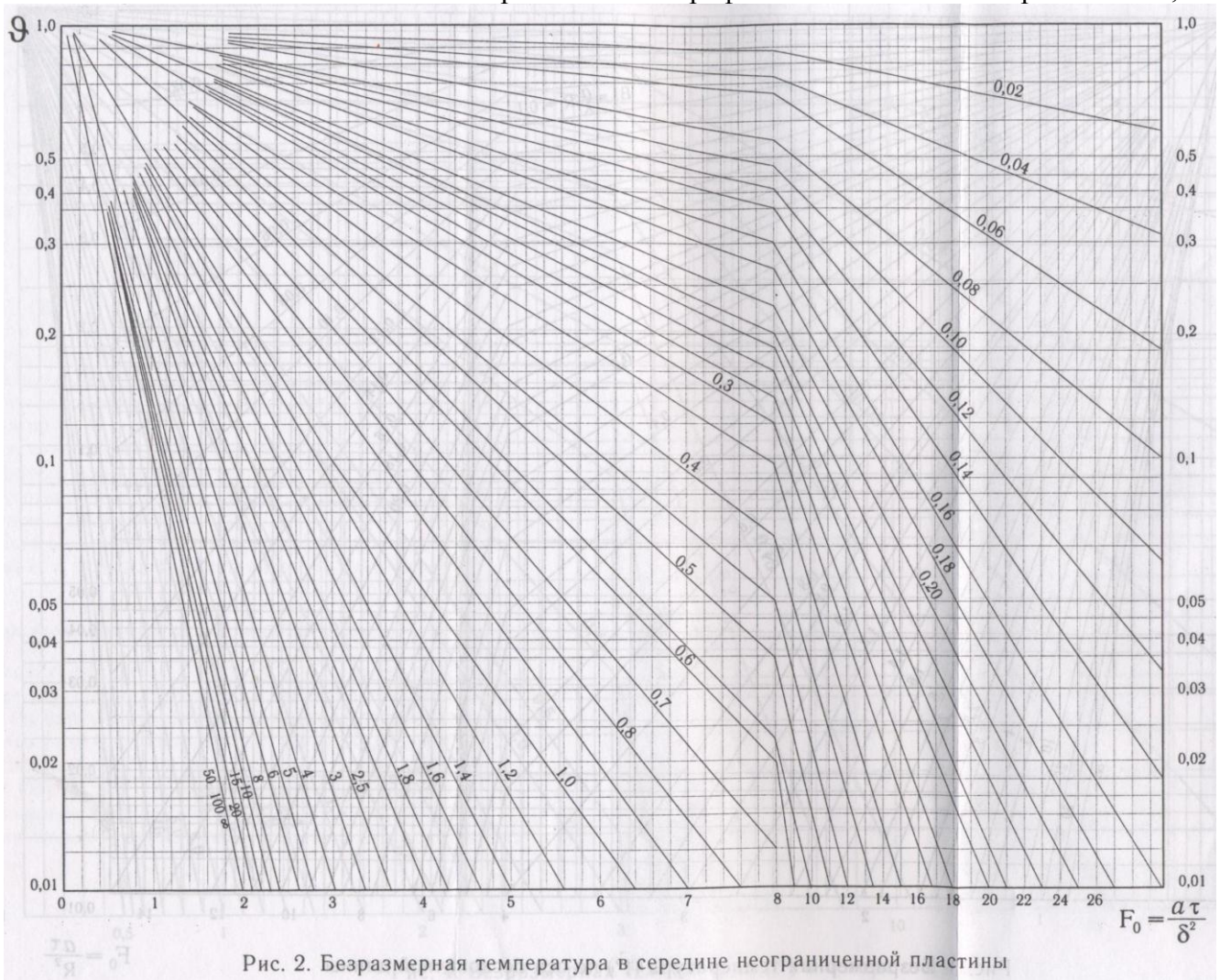
t_c - температура среды, °С.

Для решения технических задач обычно достаточно знать избыточную температуру в середине тела $\theta_{m,\tau}$. В этом случае для заданной формы тела приведенная зависимость упрощается:

$$\theta = \frac{\theta_{m,\tau}}{\theta_a} = \frac{t_m - t_c}{t_H - t_c} = \varphi'(Bi, Fo)$$

где t_m - температура в середине тела.

Эта зависимость выражена графически на рис. 2,



для плоской неограниченной пластины, на рис. 3 - для цилиндра и на рис. 4 - для шара.

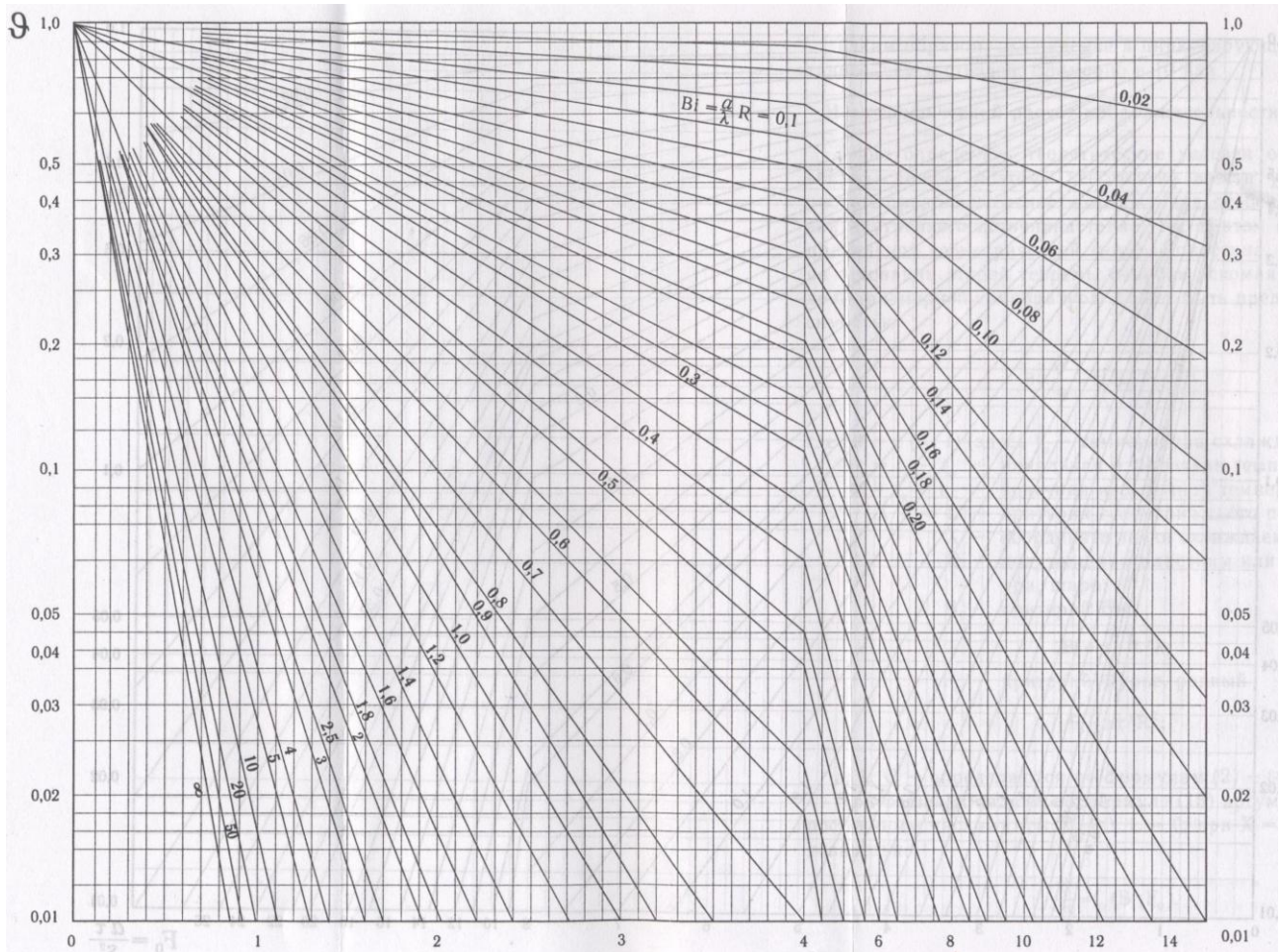
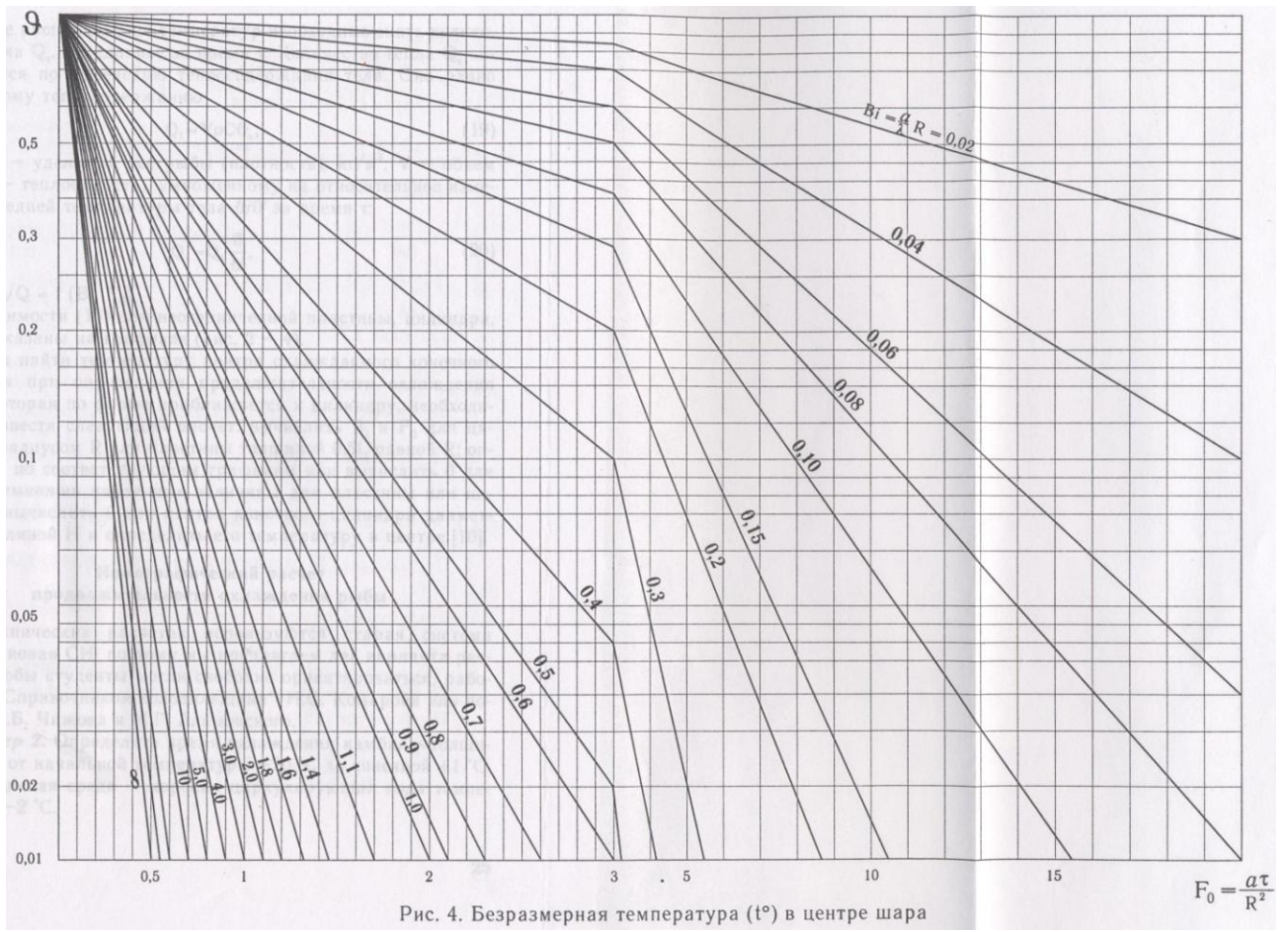


Рис. 3. Безразмерная температура (t°) по оси бесконечной длины

$$F_0 = \frac{\alpha \tau}{R^2}$$



Для определения величины $\theta_{m,\tau}$ сначала необходимо вычислить значения критериев Био и Фурье, по которым, пользуясь приведенными графиками, определяют $\frac{\theta_{m,\tau}}{\vartheta_a}$, зная ϑ_a легко вычислить $\theta_{m,\tau}$ для любого момента времени τ .

Пример. Допустим, что рыбу цилиндрической формы с начальной температурой тела 17°C охлаждают в холодильной камере, где она соприкасается со свободно циркулирующим воздухом температурой, минус 3°C . Рыба должна быть охлаждена до 0°C , средний диаметр рыбы 4 см, или 0,04 м.

Решение

Принимаем следующие исходные теплофизические характеристики рыбы: теплопроводность рыбы $\lambda = 0,4 \text{ Вт/(м К)}$; теплоемкость рыбы $c = 3,024 \text{ кДж/(кгК)}$, плотность $\gamma = 1010 \text{ кг/м}^3$, средний радиус рыбы $R = 0,02 \text{ м}$, скорость циркулирующего воздуха 2 м/с .

Вычисляем температуропроводность a рыбы, перед этим нужно для теплоемкости сделать перевод из кДж/(кгК) в Вт/(кгК) :

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma} = \frac{0,4}{0,84 \cdot 1010} = 0,00047 \text{ м}^2/\text{ч}$$

Определяем коэффициент теплоотдачи, пользуясь формулой Юргеса

$$\alpha = 5,3 + 3,6v, \text{ при скорости воздуха } v = 2 \text{ м/с } \alpha = 5,3 + 3,6 \cdot 2 = 12,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

По формуле $\frac{\theta_m}{\theta_a} = \frac{t_m - t_c}{t_n - t_c}$ находим

$$\frac{\theta_m}{\theta_a} = \frac{0 - (-3)}{17 - (-3)} = 0,15$$

Вычисляем критерий Био

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda} = \frac{12,5 \cdot 0,02}{0,4} = 0,63$$

По номограмме для цилиндрического тела, по известным теперь

$$\frac{\theta_m}{\theta_a} = 0,15 \text{ и } Bi = 0,63 \text{ находим критерий Фурье. Получаем } Fo = 1,85,$$

исходя из этого вычисляем продолжительность охлаждения рыбы при заданных условиях:

$$\tau = \frac{Fo \cdot R^2}{a} = \frac{1,85 \cdot 0,0004}{0,00047} = 1,57 \text{ часа.}$$

При помощи приведенных номограмм можно определить температуру в центре тела рыбы в процессе ее охлаждения, если известна продолжительность охлаждения.

При охлаждении рыбы цилиндрической формы в условиях, описанных выше, в течение 1,57 ч, температура в середине тела может быть определена следующим образом:

Определяем критерии Фурье Fo и Био Bi :

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{R^2} = \frac{0,00047 \cdot 1,57}{0,02^2} = 1,85$$

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda} = \frac{12,5 \cdot 0,02}{0,4} = 0,63$$

По той же номограмме находим безразмерную избыточную температуру при вычисленных критериях Fo и Bi ; эти значения $\frac{\theta_m}{\theta_a} = 0,15$, т. е. имеем:

$$\frac{\theta_m}{\theta_a} = \frac{t_m - t_c}{t_n - t_c} = \frac{t_m - (-3)}{17 - (-3)} = 0,15;$$

откуда $t_m = 0^\circ \text{C}$.

Однако номографический метод не точен, так как не учитывает ни внутреннего тепловыделения продукта, ни испарения влаги с его поверхности, если охлаждение происходит в воздушной среде.

В холодной жидкой среде охлаждение протекает значительно быстрее, чем в воздушной. Продолжительность охлаждения той же рыбы при прочих равных условиях в водном растворе, охлажденном до минус 3°С и находящемся в покое, определяют следующим образом.

Исходные данные $\lambda = 0,4$ Вт/(м К); теплоемкость рыбы $c = 3,024$ кДж/(кг·К), плотность $\gamma = 1010$ кг/м³, средний радиус рыбы $R = 0,02$ м, температуропроводность $a = 0,00047$ м²/ч. Коэффициент теплоотдачи для жидкой среды $\alpha = 200$ Вт/(м²·К).

Определяем безразмерную избыточную температуру

$$\frac{\theta_m}{\theta_a} = \frac{t_m - t_c}{t_n - t_c} = \frac{t_m - (-3)}{17 - (-3)} = 0,15$$

Вычисляем критерий Био

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda} = \frac{200 \cdot 0,02}{0,4} = 10$$

По известным теперь $\frac{\theta_m}{\theta_a} = 0,15$ $Bi = 10$ на номограмме находим значение критерия Фурье, т. е. $Fo = 0,45$.

Из выражения критерия Фурье $Fo = \frac{\alpha \tau}{R^2} = 0,45$

вычисляем продолжительность охлаждения рыбы τ при заданных условиях

$$\tau = \frac{Fo \cdot R^2}{\alpha} = \frac{0,45 \cdot 0,0004}{0,00047} = 0,38 \text{ часа.}$$

Вопросы для самопроверки

1. Охарактеризуйте понятие «охлажденная рыба».
2. Какие виды охлаждающих сред используются для охлаждения рыбы?
3. Какие показатели характеризуют качество охлажденной рыбы? Перечислите основные пороки охлажденной рыбы?
4. Перечислите морфометрические, структурно-механические, теплофизические характеристики рыбы.
5. Как рассчитать потребное количество холода для охлаждения рыбы?

Варианты заданий

Для группы 1

1. Определить продолжительность воздушного охлаждения рыбы до температуры 1°С. Форма тела близкая к пластине. Начальная температура 15°С. Скорость циркулирующего воздуха 2 м/с, температура воздуха минус 2°С. Средняя толщина рыбы 5 см. Теплофизические характеристики рыбы: теплопроводность рыбы $\lambda = 0,53$ Вт/(м К); теплоемкость рыбы $c = 3,65$ кДж/(кг К), плотность $\gamma = 1000$ кг/м³.

2. Определить продолжительность охлаждения рыбы в водной среде до температуры 1°С. Форма тела близкая к цилиндру. Начальная температура 10°С. Температура среды минус 2°С. Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 250$ Вт/(м²·К). Теплофизические характеристики рыбы: теплопроводность рыбы $\lambda = 0,53$ Вт/(м К); теплоемкость рыбы $c = 3,65$ кДж/(кг К), плотность $\gamma = 1020$ кг/м³, средний радиус рыбы $R = 0,03$ м.

3. Определить продолжительность охлаждения трески в водной среде до температуры 0°С. Форма тела близкая к цилиндру. Начальная температура 10°С. Температура среды минус 2°С. Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 250$ Вт/(м²·К). Теплофизические характеристики рыбы: теплопроводность рыбы $\lambda = 0,45$ Вт/(м К); теплоемкость рыбы $c = 3,72$ кДж/(кг К), плотность $\gamma = 1020$ кг/м³, толщина рыбы 10 см.

4. Определить продолжительность охлаждения трески в воздушной среде до температуры 1°C . Форма тела близкая к цилиндру. Начальная температура 15°C . Скорость циркулирующего воздуха 2 м/с , температура воздуха минус 2°C . Теплофизические характеристики рыбы: теплопроводность рыбы $\lambda = 0,47\text{ Вт/(м К)}$; теплоемкость рыбы $c = 3,68\text{ кДж/(кг К)}$, плотность $\gamma = 1045\text{ кг/м}^3$, толщина рыбы 8 см .

5. Определить продолжительность охлаждения филе трески в воздушной среде до температуры 2°C . Форма тела близкая к цилиндру. Начальная температура 13°C . Скорость циркулирующего воздуха 3 м/с , температура воздуха минус 2°C . Теплофизические характеристики рыбы: теплопроводность рыбы $\lambda = 0,47\text{ Вт/(м К)}$; теплоемкость рыбы $c = 3,71\text{ кДж/(кг К)}$, плотность $\gamma = 1020\text{ кг/м}^3$, толщина рыбы 3 см .

6. Определить продолжительность охлаждения рыбы в водной среде до температуры 0°C . Форма тела близкая к цилиндру. Начальная температура 8°C . Температура среды минус 3°C . Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 300\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Теплофизические характеристики рыбы: теплопроводность рыбы $\lambda = 0,55\text{ Вт/(м К)}$; теплоемкость рыбы $c = 3,8\text{ кДж/(кг К)}$, плотность $\gamma = 1030\text{ кг/м}^3$, средний радиус рыбы $R = 0,04\text{ м}$.

7. Определить продолжительность воздушного охлаждения рыбы до температуры 0°C . Форма тела близкая к пластине. Начальная температура 10°C . Скорость циркулирующего воздуха $1,5\text{ м/с}$, температура воздуха минус 2°C . Средняя толщина рыбы 5 см . Теплофизические характеристики рыбы: теплопроводность рыбы $\lambda = 0,57\text{ Вт/(м К)}$; теплоемкость рыбы $c = 3,55\text{ кДж/(кг К)}$, плотность $\gamma = 1020\text{ кг/м}^3$.

8. Определить продолжительность охлаждения трески в водной среде до температуры 0°C . Форма тела близкая к пластине. Начальная температура 8°C . Температура среды минус $1,5^{\circ}\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 350\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Теплофизические характеристики рыбы: теплопроводность рыбы $\lambda = 0,42\text{ Вт/(м К)}$; теплоемкость рыбы $c = 3,68\text{ кДж/(кг К)}$, плотность $\gamma = 1100\text{ кг/м}^3$, толщина рыбы 10 см .

Варианты заданий

Для группы 2

1. Определить продолжительность воздушного охлаждения рыбы до температуры 1°C . Форма тела близкая к пластине. Начальная температура 8°C . Скорость циркулирующего воздуха 3 м/с , температура воздуха минус 1°C . Средняя толщина рыбы 5 см . Теплофизические характеристики рыбы: теплопроводность рыбы $\lambda = 0,53\text{ Вт/(м К)}$; теплоемкость рыбы $c = 3,64\text{ кДж/(кг К)}$, плотность $\gamma = 1104\text{ кг/м}^3$.

2. Определить продолжительность охлаждения рыбы в водной среде до температуры 1°C . Форма тела близкая к цилиндру. Начальная температура 9°C . Температура среды минус 2°C . Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 300\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Теплофизические характеристики рыбы: теплопроводность рыбы $\lambda = 0,43\text{ Вт/(м К)}$; теплоемкость рыбы $c = 3,69\text{ кДж/(кг К)}$, плотность $\gamma = 1020\text{ кг/м}^3$, средний радиус рыбы $R = 0,05\text{ м}$.

3. Определить продолжительность охлаждения трески в водной среде до температуры 0°C . Форма тела близкая к цилиндру. Начальная температура 12°C . Температура среды минус 1°C . Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 350\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Теплофизические характеристики рыбы: теплопроводность рыбы $\lambda = 0,43\text{ Вт/(м К)}$; теплоемкость рыбы $c = 3,75\text{ кДж/(кг К)}$, плотность $\gamma = 1100\text{ кг/м}^3$, толщина рыбы 8 см .

4. Определить продолжительность охлаждения трески в воздушной среде до температуры 1°C . Форма тела близкая к цилиндру. Начальная температура 9°C . Скорость циркулирующего воздуха 2 м/с , температура воздуха минус 2°C . Теплофизические характеристики рыбы: теплопроводность рыбы $\lambda = 0,47\text{ Вт/(м К)}$; теплоемкость рыбы $c = 3,72\text{ кДж/(кг К)}$, плотность $\gamma = 1040\text{ кг/м}^3$, толщина рыбы 6 см .

5. Определить продолжительность охлаждения филе щуки в воздушной среде до температуры 1°C . Форма тела близкая к цилиндру. Начальная температура 13°C . Скорость циркулирующего воздуха 2 м/с , температура воздуха минус 2°C . Теплофизические характеристики рыбы: теплопроводность рыбы $\lambda = 0,5\text{ Вт/(м К)}$; теплоемкость рыбы $c = 3,59\text{ кДж/(кг К)}$, плотность $\gamma = 1144\text{ кг/м}^3$, толщина рыбы 3 см .

6. Определить продолжительность охлаждения рыбы в водной среде до температуры 0°C . Форма тела близкая к цилиндру. Начальная температура 10°C . Температура среды минус 2°C . Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 250\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Теплофизические характеристики рыбы: теплопроводность рыбы $\lambda = 0,42\text{ Вт/(м К)}$; теплоемкость рыбы $c = 3,61\text{ кДж/(кг К)}$, плотность $\gamma = 1030\text{ кг/м}^3$, средний радиус рыбы $R = 0,03\text{ м}$.

7. Определить продолжительность воздушного охлаждения рыбы до температуры 0°C . Форма тела близкая к пластине. Начальная температура 12°C . Скорость циркулирующего воздуха 4 м/с , температура воздуха минус 3°C . Средняя толщина рыбы 5 см . Теплофизические характеристики рыбы: теплопроводность рыбы $\lambda = 0,47\text{ Вт/(м К)}$; теплоемкость рыбы $c = 3,64\text{ кДж/(кг К)}$, плотность $\gamma = 1080\text{ кг/м}^3$.

8. Определить продолжительность охлаждения трески в водной среде до температуры 0°C . Форма тела близкая к пластине. Начальная температура 12°C . Температура среды минус 2°C . Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 200\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Теплофизические характеристики рыбы: теплопроводность рыбы $\lambda = 0,54\text{ Вт/(м К)}$; теплоемкость рыбы $c = 3,64\text{ кДж/(кг К)}$, плотность $\gamma = 1030\text{ кг/м}^3$, толщина рыбы 8 см .

Лабораторная работа № 5
Сглаживание экспериментальных данных

Цель – научиться применять методику сглаживания экспериментальных данных

Задачи:

- изучить теоретический материал;
- знать особенности применения формул для сглаживания;
- выполнить расчетное задание согласно варианту.

Выше было отмечено, что для повышения достоверности результатов исследования обычно стремятся получать как можно большее число экспериментальных точек. Поскольку ошибки в измерениях неизбежны, то с повышением количества измерений увеличивается и общий объём этих ошибок. Создают они своеобразный „шум”, содержащийся в экспериментальных данных. Этот „шум” проявляется в большем или меньшем разбросе результатов измерений относительно истинной кривой, характеризующей процесс. Регулярная составляющая выражается гладкой функцией своего аргумента, а случайная - представляет собой не связанный с регулярной составляющей случайный процесс, характеризующийся разбросом экспериментальных данных вокруг регулярной составляющей. Этот разброс не определяется однозначно принятыми в рассмотрение факторами.

Регулярная составляющая известна под различными названиями. Называют её *трендом, уровнем, детерминированной основой процесса, тенденцией*. Все эти термины основаны на интуитивном представлении о какой-то очищенной от помех внутренней сущности анализируемого процесса.

Предварительная обработка экспериментальных данных, кроме всего прочего, направлена на снижение влияния в числовом ряду случайной составляющей, т.е. на уменьшение „информационного шума” в результатах эксперимента. Она приближает числовой ряд данных к его тренду. Методика основана на *сглаживании* эмпирических данных, что приводит к замене таблицы опытных данных другой таблицей точек, близких к некоторой гладкой кривой предполагаемого тренда. Инструментом этого приближения служат *формулы сглаживания*.

Формулы сглаживания получают на основе многочленов, аппроксимирующих по методу наименьших квадратов группы экспериментальных данных.

Для внутренних участков таблицы количество точек для сглаживания выбирается нечётным, а само сглаживание осуществляется для средней точки. При этом реализуется последовательное движение вдоль таблицы. Например, по первым трём точкам y_1, y_2, y_3 сглаживают значение y_2 , затем по следующим точкам y_2, y_3, y_4 сглаживается значение y_3 и т.д.

Для сглаживания значений функции, лежащих вблизи концов таблицы, может использоваться и чётное число точек. Однако новое значение функции, по-прежнему, находится через её предыдущее значение в этой же точке и значения в соседних точках.

Рассмотрим формулы сглаживания для таблиц с постоянным шагом, полученные на основе линейной аппроксимации. Для сглаживания по трём точкам они имеют виды:

$$\bar{y}_0 = \frac{1}{3}(y_{-1} + y_0 + y_{+1}); \quad (1.1)$$

$$\bar{y}_{-1} = \frac{1}{6}(5y_{-1} + 2y_0 - y_{+1}); \quad (1.2)$$

$$\bar{y}_{+1} = \frac{1}{6}(-y_{-1} + 2y_0 + 5y_{+1}), \quad (1.3)$$

где y_0, \bar{y}_0 – значения исходной и сглаженной функции в средней точке; y_{-1}, \bar{y}_{-1} – значения исходной и сглаженной функции в предыдущей точке; y_{+1}, \bar{y}_{+1} – значения исходной и сглаженной функции в последующей точке.

Формулы для \bar{y}_{-1} и \bar{y}_{+1} применяются по краям таблицы. Формула для \bar{y}_0 используется во внутренних точках.

Аналогичные формулы имеются для реализации сглаживания рядов экспериментальных данных по пяти точкам:

$$\bar{y}_{-2} = \frac{1}{5}(3y_{-2} + 2y_{-1} + y_0 - y_2); \quad (2.1)$$

$$\bar{y}_{-1} = \frac{1}{10}(4y_{-2} + 3y_{-1} + 2y_0 + y_1); \quad (2.2)$$

$$\bar{y}_0 = \frac{1}{5}(y_{-2} + y_{-1} + y_0 + y_1 + y_2); \quad (2.3)$$

$$\bar{y}_{+1} = \frac{1}{10}(y_{-1} + 2y_0 + 3y_1 + 4y_2); \quad (2.4)$$

$$\bar{y}_{+2} = \frac{1}{5}(-y_{-2} + y_0 + 2y_1 + 3y_2). \quad (2.5)$$

Формула (2.1) используется для первой точки данных.

Формула (2.2) - для второй точки.

Формула (2.3) - во внутренних точках.

Формула (2.4) - для предпоследней точки.

Формула (2.5) - для последней точки.

При большом разбросе экспериментальных данных можно проводить многократное сглаживание. Поскольку эффективность этой процедуры быстро снижается, её целесообразно проводить от одного до трёх раз. О достижении достаточной гладкости таблицы можно судить по поведению конечных разностей сглаживаемой функции: в конце процедуры они должны изменяться достаточно плавно.

Пример. При изучении кинетики сушки мышечной ткани вареной рыбы была получена зависимость влагосодержания продукта y (%) от времени τ (мин), представленная в колонках 1 и 2 табл. 1. Выявить детерминированную основу процесса сушки.

Таблица 1

Исходные данные			Первое сглаживание		Второе сглаживание		Третье сглаживание	
1	2		3		4		5	
τ , мин	y	Δy	y	Δy	y	Δy	y	Δy
0	315	-25	316,0	-45,9	314,5	-44,5	310,9	-40,3
10	290	-100	270,1	-45,9	270,0	-44,5	270,6	-40,3
20	190	1	224,2	-46,8	225,5	-38,4	230,3	-37,3

30	191	-56	177,4	-37,4	187,1	-32,8	193,0	-32,0
40	135	-54	140,0	-16	154,4	-26,6	161,0	-25,5
50	81	22	124,0	-17,8	127,8	-17,6	135,5	-20,1
60	103	7	106,2	-14,8	110,2	-11,9	115,5	-15,5
70	110	-8	91,4	-2,2	98,2	-11,5	100,0	-11,7
80	102	-41	89,2	-8,8	86,7	-9,6	88,3	-10,2
90	61	9	80,4	-14	77,1	-8,0	78,0	-9,8
100	70	-11	66,4	-8,4	69,1	-10,0	68,3	-8,9
110	59	-19	58,0	-6,6	59,1	-9,6	59,4	-8,4
120	40	20	51,4	-12	49,5	-7,2	51,0	-8,0
130	60	-32	39,4	-7,2	42,2	-7,2	43,0	-6,7
140	28	-18	32,2	-2	35,0	-5,8	36,4	-5,3
150	10	13	30,2	-8,2	29,2	-3,4	31,1	-4,4
160	23	7	22,0	0,2	25,8	-2,8	26,7	-3,6
170	30	-11	22,2	0,2	23,0	-2,8	23,1	-3,6
180	19		22,4		20,3		19,5	

Решение. Проведём последовательное сглаживание экспериментальных данных по пят точкам. В колонках 3, 4 и 5 представлены соответственно результаты первого, второго и третьего сглаживания, полученные по формулам (2.1) - (2.5). Например, первое значение сглаженной функции в третьей колонке (первое сглаживание) таблицы получены следующим образом.

Для получения первого значения использована формула (2.1):

$$\bar{y}_{-2} = \frac{1}{5}(3 \cdot 315 + 2 \cdot 290 + 190 - 135) \approx 316,$$

На рисунке 1 представлен расчет, поясняющий формулу (2.1)

Рисунок 1 - Расчет по формуле (2.1)

Для получения второго значения использована формула (2.2):

$$\bar{y}_{-1} = \frac{1}{10}(4 \cdot 315 + 3 \cdot 290 + 2 \cdot 190 + 191) \approx 270,$$

На рисунке 2 представлен расчет, поясняющий формулу (2.2)

		Исходные данные			Первое сглаживание	
		1	2	3	4	5
		τ , мин	y	Δy	y	Δy
4	$y-2$	0	315	-25	316,0	-45,9
5	$y-1$	10	290	-100	$=1/10*(4*$	-45,9
6	y_0	20	190	1	224,2	-46,8
7	$y+1$	30	191	-56	177,4	-37,4
8	$y+2$	40	135	-54	140,0	-16

Рисунок 2 - Расчет по формуле (2.2)

Для получения третьего и последующих значений до предпоследнего значения использована формула (2.3):

$$\bar{y}_0 = \frac{1}{5}(315 + 290 + 190 + 191 + 135) \approx 224.$$

На рисунке 3 представлен расчет, поясняющий формулу (2.3).

		Исходные данные			Первое сглаживание	
		1	2	3	4	5
		τ , мин	y	Δy	y	Δy
4	$y-2$	0	315	-25	316,0	-45,9
5	$y-1$	10	290	-100	270,1	-45,9
6	y_0	20	190	1	$=1/5*(C4+$	-46,8
7	$y+1$	30	191	-56	177,4	-37,4
8	$y+2$	40	135	-54	140,0	-16
9		50	81	22	124,0	-17,8
10		60	103	7	106,2	-14,8

Рисунок 3 - Расчет по формуле (2.3)

Для получения предпоследнего значения использована формула (2.4):

$$y_{+1} = 1/10 \cdot (10 + 2 \cdot 23 + 3 \cdot 30 + 4 \cdot 19) = 22,2$$

На рисунке 4 представлен расчет, поясняющий формулу (2.4)

		Исходные данные			Первое сглаживание		Второе
		1	2	3	4	5	6
		τ, мин	y	Δy	y	Δy	y
1							
2							
3							
4	y-2	0	315	-25	316,0	-45,9	31,0
5	y-1	10	290	-100	270,1	-45,9	27,0
6	y0	20	190	1	224,2	-46,8	22,0
7	y+1	30	191	-56	177,4	-37,4	18,0
8	y+2	40	135	-54	140,0	-16	15,0
9		50	81	22	124,0	-17,8	12,0
10		60	103	7	106,2	-14,8	11,0
11		70	110	-8	91,4	-2,2	9,0
12		80	102	-41	89,2	-8,8	8,0
13		90	61	9	80,4	-14	7,0
14		100	70	-11	66,4	-8,4	6,0
15		110	59	-19	58,0	-6,6	5,0
16		120	40	20	51,4	-12	4,0
17		130	60	-32	39,4	-7,2	4,0
18	y-2	140	28	-18	32,2	-2	3,0
19	y-1	150	10	13	30,2	-8,2	2,0
20	y0	160	23	7	22,0	0,2	2,0
21	y+1	170	30	-11	=1/10*(C1	0,2	2,0
22	y+2	180	19		22,4		2,0

Рисунок 4 - Расчет по формуле (2.4)

Для получения последнего значения использована формула (2.5):

$$y_{+2} = 1/5 \cdot (-28 + 23 + 2 \cdot 30 + 3 \cdot 19) = 22,4$$

На рисунке 5 представлен расчет, поясняющий формулу (2.5)

		Исходные данные			Первое сглаживание		Вт
		1	2	3	4	5	
		τ, мин	y	Δy	y	Δy	y
1							
2							
3							
4	y-2	0	315	-25	316,0	-45,9	
5	y-1	10	290	-100	270,1	-45,9	
6	y0	20	190	1	224,2	-46,8	
7	y+1	30	191	-56	177,4	-37,4	
8	y+2	40	135	-54	140,0	-16	
9		50	81	22	124,0	-17,8	
10		60	103	7	106,2	-14,8	
11		70	110	-8	91,4	-2,2	
12		80	102	-41	89,2	-8,8	
13		90	61	9	80,4	-14	
14		100	70	-11	66,4	-8,4	
15		110	59	-19	58,0	-6,6	
16		120	40	20	51,4	-12	
17		130	60	-32	39,4	-7,2	
18	y-2	140	28	-18	32,2	-2	
19	y-1	150	10	13	30,2	-8,2	
20	y0	160	23	7	22,0	0,2	
21	y+1	170	30	-11	22,2	0,2	
22	y+2	180	19		=1/5*(-C1		

Рисунок 5 - Расчет по формуле (2.5)

Далее расчет повторяем для получения второго и третьего сглаживания – колонки 4, 5 табл.1. В этом случае исходными значениями являются данные предыдущего сглаживания.

Рядом со сглаженными значениями функции представлены конечные разности - Δy сглаженных величин, которые находятся вычитанием предыдущего значения из последующего ($\Delta y = y_1 - y_0$). Результаты, расположенные в последней колонке, показывают, что уже третье сглаживание исходных данных практически приводит к упорядочению конечных разностей по убыванию их абсолютной величины. Следовательно, эти результаты и можно принять за детерминированную основу процесса сушки мышечной ткани рыбы.

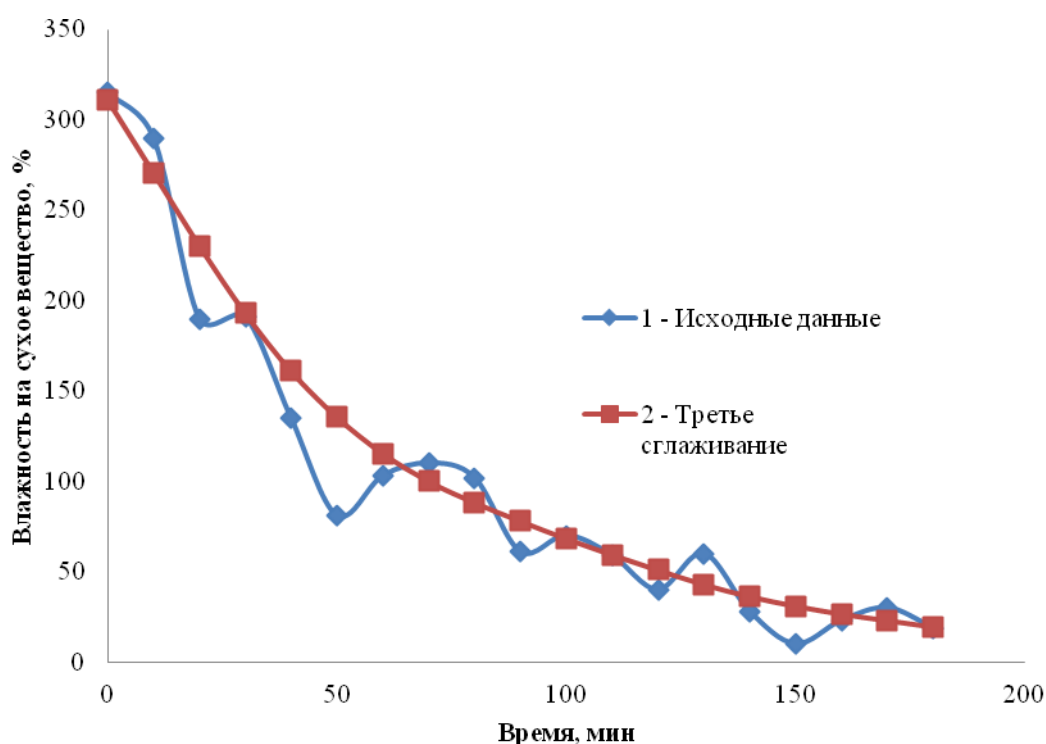


Рис. 6. Результаты эксперимента по измерению влагосодержания мышечной ткани варёной рыбы в процессе сушки:

1 — после непосредственных измерений, 2 — после третьего сглаживания исходных данных

Представляет интерес графическое сравнение исходных данных и результатов третьего сглаживания (рис. 6). Непосредственно по исходным данным (для удобства оценки они соединены на рисунке пунктирной линией), судить о закономерности изменения влагосодержания продукта во времени затруднительно. Видно, что результаты эксперимента имеют большой разброс. Однако, по мере их сглаживания характер поведения

результатов всё более отвечает форме теоретической кривой кинетики сушки (сплошная линия).

Можно заметить, что в начальный период процесса сушки на отрезке *AB* при изменении влагосодержания от 311% до 136% уменьшается оно очень быстро - зависимость от времени в первые 50 мин имеет характер прямой линии. В этот период из мышечной ткани удаляется наибольшее количество влаги. На 50-й минуте начальный период заканчивается. Влагосодержание в этот момент достигает своего критического значения.

Далее начинается второй период сушки. Он характеризуется тем, что влагосодержание во времени начинает изменяться всё медленнее. Кривая сушки становится выпуклой вниз и асимптотически приближается к прямой, параллельной оси абсцисс. Асимптота отвечает равновесному влагосодержанию продукта, которое в нашем случае можно принять равным 19%. При его достижении процессы десорбции влаги внутри продукта заканчиваются. Продукт приобретает такую влажность, при которой давление водяного пара непосредственно над ним равно парциальному давлению водяного пара в окружающем воздухе.

Такое поведение кривой, характеризующей детерминированную основу процесса сушки, физически можно объяснить следующим образом.

На участке *AB* удаляется влага, наименее прочно связанная с материалом, т.е. влага, содержащаяся в макрокапиллярах, диаметр которых превышает 0,5 мм. Удаляется также мезокапиллярная влага (диаметр мезокапилляров составляет от 0,5 до $2 \cdot 10^{-4}$ мм). В это время внутренние условия массопереноса постоянны и процесс протекает равномерно.

Участок *BC* соответствует удалению влаги из микрокапилляров (диаметр менее $2 \cdot 10^{-4}$ мм), осмотически связанной влаги и частично влаги, адсорбированной на внутренних поверхностях твёрдого вещества. Разнообразие форм связи влаги с твердой составляющей продукта требует на этом участке различных энергетических затрат на её удаление. Эти затраты становятся тем большими, чем дольше длится обезвоживание. Условия обезвоживания становятся нестационарными, и процесс сушки протекает неравномерно. Поэтому участок *AB* называют *участком постоянной скорости сушки*, а участок *BC* - *участком падающей скорости сушки*.

Задание. При изучении кинетики сушки мышечной ткани вареной рыбы была получена зависимость влагосодержания продукта y (%) от времени τ (мин), представленная табл. 2. Выявить детерминированную основу процесса сушки, выполняя расчет до третьего сглаживания по формулам для пяти точек. Рассчитать конечные разности Δy сглаженных величин. Расчет сглаживания и конечных разностей представить в таблице. Построить график исходных данных и детерминированной основы. Написать вывод.

Таблица 2 – Варианты заданий

Время τ , мин	Влажность на сухое вещество, %									
	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	314	313	311	310	307	306	304	303	302	301
10	288	287	285	284	281	280	278	277	276	275

20	188	187	185	184	181	180	178	177	176	175
30	189	188	186	185	182	181	179	178	177	176
40	133	132	130	129	126	125	123	122	121	120
50	79	78	76	75	72	71	69	68	67	66
60	102	101	99	98	95	94	92	91	90	89
70	108	107	105	104	101	100	98	97	96	95
80	100	99	97	96	93	92	90	89	88	87
90	59	58	56	55	52	51	49	48	47	46
100	69	68	66	65	62	61	59	58	57	56
110	58	57	55	54	51	50	48	47	46	45
120	38	37	35	34	31	30	28	27	26	25
130	58	57	55	54	51	50	48	47	46	45
140	29	28	26	25	22	21	19	18	17	16
150	12	11	12	11	13	12	10	12	13	14
160	24	23	21	20	17	16	14	13	12	11
170	28	27	25	24	21	20	18	17	16	15
180	27	26	24	23	20	19	17	16	15	14