Метод прогнозирования времени охлаждения тушки бройлера в погружных ваннах

И.В. Корнилов, канд. техн. наук, igor-v-kornilov@mail.ru

Задача рациональной и экономичной реализации регламентированного технологического процесса переработки птицы всегда находится в центре внимания. В равной мере это касается участка охлаждения тушек птицы с обязательным соблюдением временных характеристик непрерывного технологического цикла переработки. В статье представлен метод прогнозирования времени охлаждения тушки бройлера в погружных ваннах. Центральный тезис метода состоит в том, что процесс охлаждения рассматривается для системы тел, состоящей из ядра и оболочки, тушки птицы и охлаждающей воды соответственно. Для предложенного метода выполнены поверочные расчеты времени охлаждения продукта в погружных ваннах и рекомендованы значения коэффициента теплоотдачи между охлаждаемым продуктом и охлаждающей водой в зависимости от варианта погружного охлаждения.

1. Введение. Холодильная обработка мяса птицы и птицепродуктов должна обеспечивать быстрое удаление естественного тепла и последующее хранение продукции с гарантией качества и безопасности для здоровья человека. Начальная внутренняя температура парного мяса курицы колеблется около 40°C — идеальная среда для размножения патогенных бактерий, таких как сальмонелла и кампилобактерии. Без быстрого охлаждения эти бактерии размножаются экспоненциально, потенциально удваиваясь каждые 20 минут.

Цель проста: как можно быстрее снизить температуру тушки до 4°C или ниже (охлажденное мясо птицы). В этом температурном диапазоне значительно замедляется размножение бактерий, продлевается срок хранения продукта с нескольких часов до нескольких дней.

Прошедшие мойку потрошенные тушки птицы охлаждают погружным, воздушным, гидроаэрозольным или комбинированным способами в одну или две стадии.

При погружном охлаждении тушка птицы непрерывно перемещается через ряд охлаждающих ванн. Постоянная циркуляция воды в ваннах обеспечивает равномерное охлаждение продукта. В большинстве предприятий используется система противоточного охлаждения, при которой тушки движутся в одном направлении, а свежая холодная вода течет в противоположном. Такая схема максимизирует эффективность охлаждения, минимизируя при этом расход воды. Весь процесс охлаждения обычно занимает от 35 до 60 минут, в зависимости от размера тушки и начальной температуры.

При одностадийном охлаждении температура проточной ледяной воды обычно поддерживается в пределах 0-2°C, при двухстадийном охлаждении — в первую по ходу движения тушки птицы ванну предохлаждения подается либо ледяная вода, либо проточная водопроводная вода [1], либо использованная ледяная вода после ванны окончательного охлаждения.

2. Методы исследования. Все процессы охлаждения тел демонстрируют схожее поведение: после первоначальной задержки температура в тепловом центре тела экспоненциально снижается. Безразмерная разность температур Y при охлаждении тела в зависимости от времени определяется следующим образом [2]:

$$Y = \frac{T-Tm}{Ti-Tm} = je^{-2{,}303\cdot\theta/f}, \qquad (1)$$

где T — текущая температура тела, °С; Tm — температура охлаждающей среды, °С; а Ti — начальная температура тела, °С; θ — время охлаждения тела, с; j — фактор, мера задержки между началом охлаждения и экспоненциальным снижением температуры продукта; f — фактор, представляет собой время, необходимое для 90% снижения безразмерной разности температур.

Согласно теории регулярного теплового режима, разработанной Г.М. Кондратьевым [3], фактор f характеризует регулярный режим охлаждения тела. И в этой связи следует упомянуть о таком важном параметре регулярного режима как m, $с^{-1}$, — темп охлаждения, который характеризует интенсивность охлаждения и не зависит ни от координат тела, ни от времени. Темп охлаждения определяется следующими параметрами

$$m = \alpha \cdot \Psi \cdot \frac{F_{br}}{C_{br}}, \quad (2)$$

где α — коэффициент теплоотдачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; Ψ — коэффициент неравномерности распределения температур в теле, в течении всего регулярного режима остается постоянным; F_{br} — внешняя поверхность тела, м^2; C_{br} — полная теплоёмкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{К}}$, br — индекс, в качестве тела принята тушка бройлера.

Для многих практических задач охлаждения тела точное аналитическое решение получено в форме бесконечного ряда (3)

$$Y = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \exp\left(-\omega_n^2 \cdot \frac{a \cdot \theta}{r_o^2}\right) \cdot \frac{1}{\omega_n \cdot \frac{r}{ro}} \cdot \sin\left(\omega_n \cdot \frac{r}{r_o}\right), \quad (3)$$

где Cn — начальные тепловые амплитуды, определяются начальными условиями при охлаждении; ω_n — корни характеристического уравнения (4), радиан; r_0 — радиус шара (рассматривается охлаждение шара, простейшая геометрическая форма наиболее близкая к форме тушки птицы), м; r/r_0 — относительный радиус; a — коэффициент температуропроводности, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$.

$$1 - \omega \cdot ctg(\omega) = Bi, \quad (4)$$

где Bi — безразмерное число Био, $Bi = \frac{\alpha \cdot L}{k}$, характеризует связь между полем температуры в теле и условиями теплоотдачи на его поверхности; L — характерный размер, радиус r_o или половина толщины тела, м; k — теплопроводность, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

Ряд (3) быстро сходится, так как на основании неравенства

$$\omega_1 < \omega_2 < \omega_3 \ldots < \omega_n \ldots \quad (5)$$

с увеличением ω_n экспоненциальная функция быстро уменьшается. Начиная с некоторого момента времени пространственно-временное изменение температурного поля продукта будет с удовлетворительной точностью описываться первым членом ряда с наименьшим положительным корнем ω_1. Решение (3) получено при условии неизменности теплофизических параметров тела a, k, C_p и коэффициента теплоотдачи α.

В методе [4] время охлаждения тушки бройлера рассчитывается с помощью приближения первого члена ряда к аналитическому решению для конвективного охлаждения шара:

$$\theta = \frac{3 \cdot \rho \cdot Cp \cdot L^2}{\omega_1^2 \cdot k \cdot E} \ln\left(\frac{j}{Y}\right). \quad (6)$$

где ρ — плотность продукта, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; Cp — удельная теплоёмкость продукта, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$; E — эквивалентная размерность теплопередачи, и ω_1 — наименьший положительный корень,

$$0 < \omega_1 \leq \pi. \quad (7)$$

Учет геометрии продукта F_{br}, в частности формы тушки птицы, подробно разработан в работах A.C. Cleland, например, в [5], — используется коэффициент формы E, называемый эквивалентной размерностью теплопередачи, который сравнивает общую теплопередачу с теплопередачей через кратчайшее измерение тела L.

Уравнение (4) является характеристическим уравнением процесса охлаждения шара с теплообменом на его поверхности [6], графическое решение представлено на рис. 1.

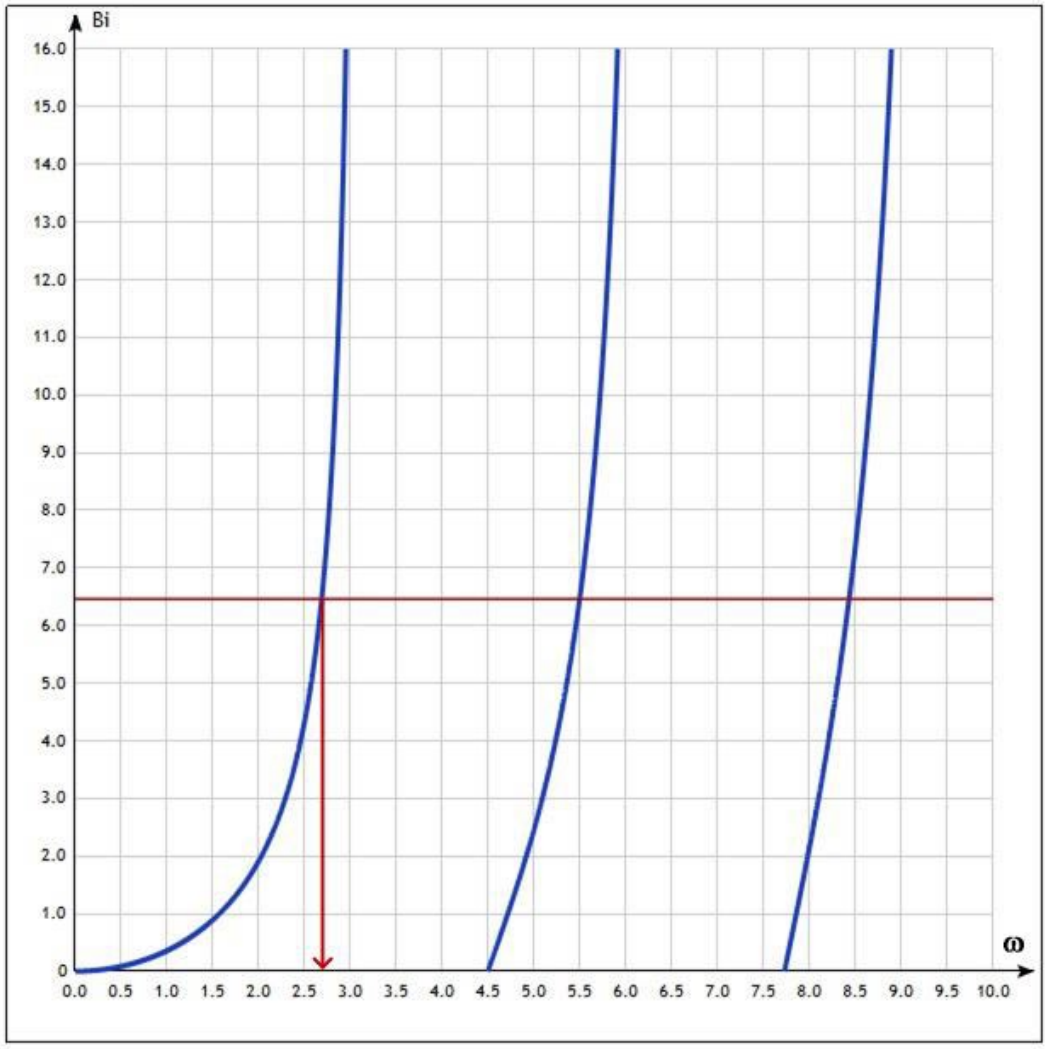


Рис. 1. Графическое решение уравнения (4). В частности, решение уравнения при охлаждении в воздушном фризере свиного окорока [2]: $\alpha_a = 48 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ (a — индекс, относящийся к воздуху), число Bi = 6,46 (ось ординат), $\omega_1 = 2{,}68$ (ось абсцисс)

В процессе охлаждения продукта коэффициент теплоотдачи α может принимать значения от некоторой минимальной величины до максимальной, в пределе $\alpha \rightarrow \infty$. В [3] доказывается следующее: предельное значение темпа охлаждения есть величина конечная, m_∞, и прямо пропорциональная температуропроводности продукта:

$$a = K_F \cdot m_\infty, \tag{8}$$

где K_F — коэффициент пропорциональности, зависит только от формы и размеров продукта, называется коэффициентом формы, м^2.

Из графика на рис. 1 следует, что значению m_∞ соответствует положительный корень характеристического уравнения равный $\omega_{1\,\infty} = \pi$. С ростом коэффициента теплоотдачи значение ω_1 стремится к $\omega_{1\,\infty}$ слева.

В [2] уточняется, что формула (6) применяется для прогноза времени охлаждения продукта в интенсивной струе воздуха.

3. Предлагаемый метод прогнозирования времени охлаждения тушки птицы при погружении в ванны (МПО) базируется на следующих положениях.

3.1 Процесс охлаждения рассматривается для системы тел [3]: ядро и оболочка. Охлаждаемое ядро (тушка бройлера) помещено в охлаждающую оболочку (ледяная вода).

3.2 В этом случае в характеристическом уравнении учитывается тот факт, что ядро охлаждается хорошо перемешиваемой жидкостью и жидкость теряет тепло в результате теплообмена с окружающей средой [6]:

$$1 - \omega \cdot ctg(\omega) + \frac{\Phi}{3} \cdot \omega^2 = Bi, \tag{9}$$

где Φ — отношение полной теплоёмкости охлаждающей оболочки к полной теплоёмкости охлаждаемого ядра.

Для охлаждающей оболочки понятие хорошо перемешиваемой жидкости означает, что ее температура во всех точках одинакова, не является функцией координат.

3.3 Темп охлаждения системы тел записывается следующей формулой

$$m_w = \frac{\alpha_w \cdot F_w}{C_{br} \cdot \left(\frac{1}{\Psi} + \frac{C_w}{C_{br}}\right)}, \tag{10}$$

где *Cw* и *Fw* — полная теплоёмкость и площадь наружной поверхности оболочки (окружающей охлаждающей воды); *w* — индекс, относящийся к воде.

При охлаждения продукта в интенсивной струе воздуха в соответствии с (2) темп охлаждения записывается следующим образом

$$m_a = \Psi \cdot \frac{\alpha_a \cdot F_{br}}{C_{br}}, \tag{11}$$

Для оценки величины темпа охлаждения водой m_w в сравнении с темпом охлаждения воздухом m_a рассмотрим отношение $\frac{m_w}{m_a}$:

$$\frac{m_w}{m_a} = \frac{\alpha_w}{\alpha_a} \cdot \frac{F_w}{F_a} \cdot \frac{1}{\left(1 + \Psi \cdot \frac{C_w}{C_{br}}\right)}. \tag{12}$$

Выполним анализ (12):

— в правой части первый множитель, отношение коэффициента теплоотдачи хорошо перемешиваемой воды к коэффициенту теплоотдачи воздуха, $\frac{\alpha_w}{\alpha_a} > 10$;

— второй множитель, отношение наружных поверхностей оболочки и ядра, $\frac{F_w}{F_{br}} > 1$;

— значение знаменателя третьего множителя незначительно превысит 1,0, поскольку для коэффициента неравномерности температурного поля ядра в рассматриваемом случае справедливо $\Psi < 0{,}17$.

Уместно записать, что темп охлаждения ядра в хорошо перемешиваемой жидкости на порядок превышает темп охлаждения ядра в интенсивной струе воздуха

$$\frac{m_w}{m_a} \cong \frac{\alpha_w}{\alpha_a} \geq 10. \qquad (13)$$

Справедливость вывода (13) подтверждается примером из [3]: при охлаждении стального куба водой и воздухом отношение темпов охлаждения характеризуется значением

$$\frac{m_w}{m_a} = \frac{4{,}32\frac{1}{\text{час}}}{0{,}254\frac{1}{\text{час}}} = 17{,}0.$$

3.4 Из теории регулярного теплового режима известно, что при охлаждении тел одинаковой формы в воде, в масле или при интенсивном обдуве воздухом, когда значения числа *Bi* велики [3], справедливо следующее соотношение

$$\frac{m_w}{m_a} \sim \frac{m_{\infty w}}{m_{\infty a}}, \text{ или } m_{\infty w} \sim m_{\infty a} \cdot \frac{m_w}{m_a},$$

$$\text{или } \omega_{1\infty w} > \omega_{1\infty a} = \pi. \qquad (14)$$

В [7] приведены точные значения корней характеристического уравнения (9) в зависимости от отношения теплоёмкостей ядра и оболочки, $\varphi = \frac{C_{p\,br}}{C_{p\,w}}$, для случая, когда хорошо перемешиваемая жидкость не теряет тепло в окружающую среду.

Решения ω_n получены графическим способом: исходное уравнение (9) представлено двумя функциями

$$tan(\omega) \text{ и } \frac{\omega}{1 + \frac{\omega^2}{3 \cdot \varphi}}, \qquad (15)$$

точки пересечения которых, дают искомые корни, — ω_1 показаны в таблице 1.

Таблица 1. Значения наименьших корней ω_1 уравнения (9)

φ	0,0	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0
$\omega 1$	3,142	3,152	3,161	3,188	3,233	3,312	3,506	3,726	3,972	4,236

Анализ (15) и данных в таблице 1 позволяет констатировать:

— параметр $3 \cdot \varphi$, отношение теплоёмкостей ядра и оболочки, является характеристикой процесса охлаждения шара в хорошо перемешиваемой жидкости и определяет ход кривой (9);

— при $\varphi \to 0$ первый корень характеристического уравнения (9) стремится к величине $\pi = 3{,}142$ справа.

3.5 Расчет времени охлаждения тушки птицы в погружной ванне выполняется по формуле (6), в которой наименьший корень характеристического уравнения определяется из (9) и находится в интервале

$$\pi < \omega_{1\,w} < 2\pi. \quad (16)$$

4. Обсуждение и результаты. Известные в настоящее время методы прогнозирования времени погружного охлаждения тушки птицы основаны на статистической обработке данных натурных экспериментов:

— в [8] эмпирическая модель позволяет рассчитать отведенное от тушки относительное количество тепла в зависимости от коэффициента теплоотдачи, времени пребывания в ванне, массы тушки бройлера. Уравнение получено для погружных ванн с насосной циркуляцией воды и дополнительным барботажем воздухом. Рекомендовано осредненное значение коэффициента теплоотдачи (apparent heat transfer coefficient), $\alpha \geq 2000\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$;

— в [9] представлена эмпирическая модель определения времени охлаждения по типу (1). Экспоненциальная функция $exp\left(-\frac{B}{Cp\cdot W}\times\theta\right)$ в модели содержит: B — обобщенный параметр теплоотдачи с размерностью $\left[\frac{\text{кДж}}{\text{с}\cdot\text{К}}\right]$; $C_{p\,br}$ и W_{br}, кг, — удельная теплоёмкость и масса продукта соответственно. Обобщенный параметр B определяется только из натурного эксперимента.

На основе приближенного аналитического решения построены модель (6) и метод [4]:

— преимущество метода: для практических задач охлаждения с удовлетворительной точностью можно ограничиться первым членом ряда точного аналитического решения (3);

— недостаток метода: демонстрирует высокую точность расчета только при охлаждении продукта в интенсивной струе воздуха, для задач погружного охлаждения нет данных о его эффективности. Следует отметить, что при разработке метода эксперименты проводились как в воздушном туннеле, так и в погружной ванне с циркуляцией рассола (29%-ный раствор хлорида кальция) с температурой +1°С.

4.1 При построении графиков (рис. 2 и 3) и проведении расчетов в соответствии с МПО приняты исходные данные, приведенные в таблице 2. Теплофизические параметры постоянны, значение коэффициента теплоотдачи осредненное.

Таблица 2. Теплофизические параметры

Параметры	Бройлер при +40°С, [10]	Ледяная вода при +1°С, CoolPack
Плотность, кг/м^3	1040	1000
Удельная теплоёмкость, Дж/кг/К	3340	4070
Теплопроводность Вт/м/К	0,549	0,571

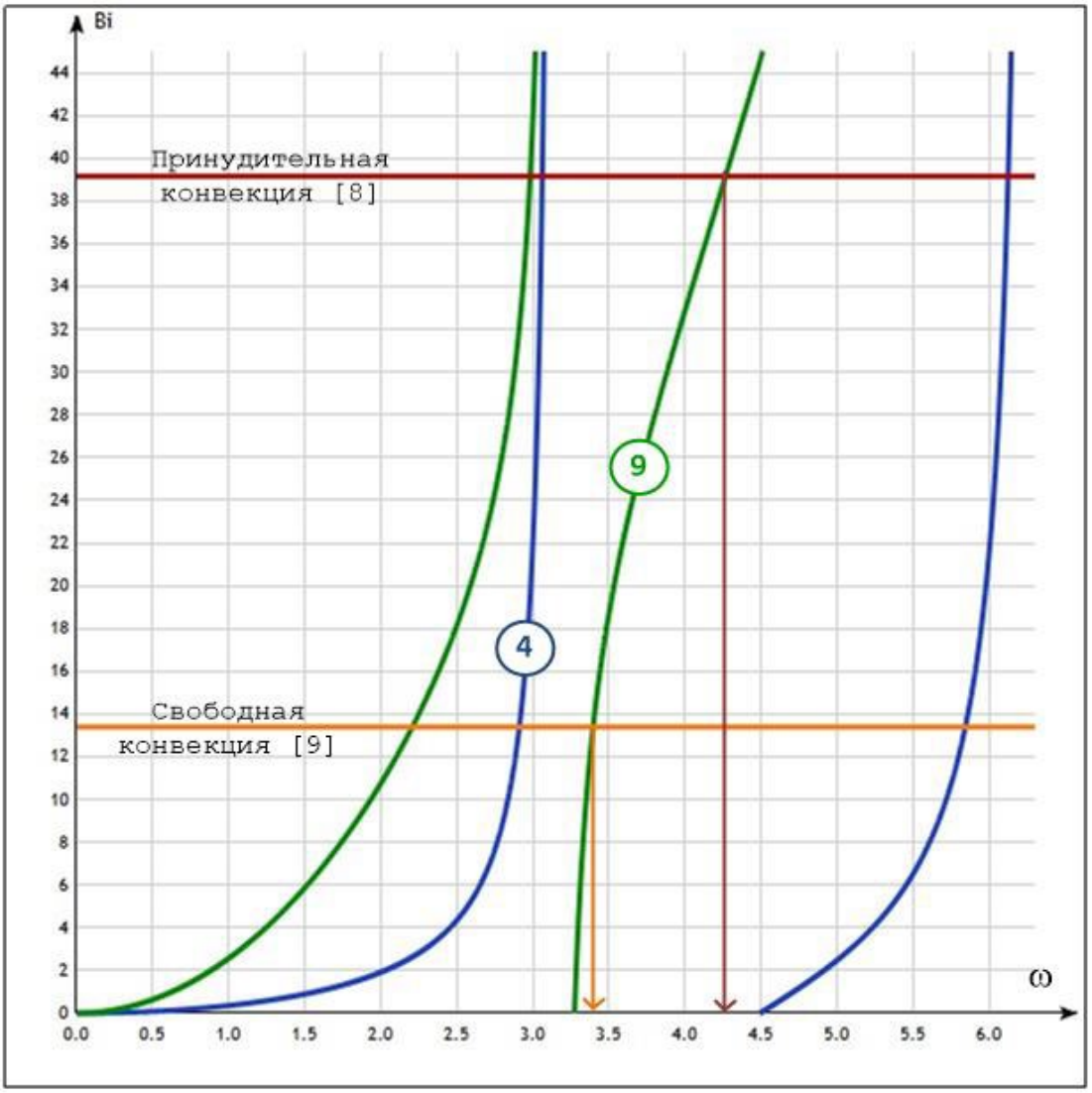


Рис. 2. Расчетные графики: уравнение (4) при охлаждении воздухом, и уравнение (9) при погружном охлаждении в воде. Определены корни характеристических уравнений для погружного охлаждения при принудительной конвекции и при свободной конвекции воды

Из анализа рис. 1 и 2 следует, что для практических задач по охлаждению тел общая часть функций (4) и (9), а именно 1 - $\omega \cdot ctg(\omega)$, устанавливает следующие области определения: на интервале $0 < \omega_{1a} < \pi$ при охлаждении воздухом, на интервале $\pi < \omega_{1w} < 2\pi$ при охлаждении в погружной ванне, таблица 3. Общая часть функций определена при всех $\omega \neq n \cdot \pi$, при $0, \pi, 2\pi$ имеет вертикальные асимптоты. Отличие (4) и (9) состоит в том, что в функции (9) появляется дополнительный член $\Phi/3 \cdot \omega^2$, который учитывает тепловое взаимодействие продукта с хорошо перемешиваемой охлаждающей средой, и который приводит к «сдвигу» аргумента ω_1 в следующий интервал.

С увеличением коэффициента теплоотдачи α, в пределе $\alpha \to \infty$, значение корня характеристических уравнений (4) и (9) стремится к конечным величинам $\omega_{1\infty a} = \pi$ и $\omega_{1\infty w} = 2\pi$ соответственно.

Таблица 3. Расчетные зависимости времени охлаждения тушек птицы

Охлаждение воздухом	Охлаждение в погружной ванне
Расчетное уравнение времени охлаждения	
$$\theta = \frac{3 \cdot \rho \cdot Cp \cdot L^2}{\omega_1^2 \cdot k \cdot E} \; ln\left(\frac{j}{Y}\right)$$	
Характеристическое уравнение	
$1 - \; \omega \cdot ctg(\omega) = Bi$	$1 - \; \omega \cdot ctg(\omega) \; + \frac{\Phi}{3} \cdot \omega^2 \; = Bi$
Интервал решений ω_1	
$0 \; < \; \omega_{1\,a} \; < \; \pi$	$\pi \; < \; \omega_{1\,w} \; < \; 2\pi$

4.2 Выполнены расчеты времени процесса охлаждения тушки птицы и коэффициента теплоотдачи для известных данных фактических замеров на птицефабрике (ПФ), натурных экспериментов в погружных ваннах и численного моделирования.

Таблица 4. Результаты экспериментов по охлаждению тушек птицы в погружных ваннах

№	Описание эксперимента / *комментарий*	Расчет α_w, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$
1	**ПФ проект**: погружная ванна типа «спин-чиллер» на первой стадии охлаждения L = 12 м, ∅ = 2,1 м. Вес тушки 1,4 кг, температура тушки на входе / выходе +38°C / +15°C. Проточная ледяная вода +1°C и барботаж воздухом. Время пребывания 17 минут. **ПФ фактически**: погружная ванна, см. выше. Вес тушки 1,8 кг, температура тушки: +42°C / +20°C. Проточная вода +5,5°C и барботаж воздухом. Время пребывания 17 минут.	340
	По результатам обследования установлено, что подача свежей ледяной воды ванну сократилась в ~2 раза, вследствие непредусмотренного проектом разбора ледяной воды другими потребителями.	
2	**[8]**: последовательное охлаждение тушки бройлера в двух погружных ваннах, L1 = 6 м, L2 = 12 м. Проточная вода и барботаж воздухом. Вес тушки 1 кг. Температура тушки: +28°C / +11°C. Охлаждающая вода +7,5°C, общее время пребывания в двух ваннах 1772 секунды (29,5 минут). Выполнен расчет коэффициента теплоотдачи при принудительной циркуляции воды (apparent heat transfer coefficient), рекомендовано значение $\alpha_w > 2000 \; \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$.	420
	Получено осредненное значение коэффициента теплоотдачи при принудительной конвекции.	
3	**[9]**: погружная ванна без протока и барботажа воды. Вес тушки 1,4 кг, температура тушки: +40°C / +4°C. Вода/лёд с температурой +0°C, время пребывания 4800 секунд (80 минут).	140

	Получено осредненное значение коэффициента теплоотдачи для случая свободной конвекции.	
4	**[10]**: на основе данных известных из натурных экспериментов выполнено CFD-моделирование охлаждения тушек бройлера весом 1,8 кг. В бак с тушками птицы подавалась свежая ледяная вода с температурой +1°C: а) в одном случае выполнялась только насосная циркуляция охлаждающей воды. Начальная температура тушки +38°, после часа охлаждения температура в центре тушки снизилась до +7,11°C; б) в другом случае дополнительно к насосной циркуляции воды проводился барботаж воздухом. Начальная температура тушки +40°C, после часа охлаждения температура в центре тушки снизилась до +5,31°C.	230 (а) 340 (б)
	По представленным в [10] графически линиям тока скорости воды в баке, средние по объему значения скорости для случая (а) составили от 0,1 до 0,3 м/с. Для случая (б) — от 0,35 до 0,75 м/с. В локальных зонах подачи воздуха в бак скорости воды достигали 3 м/с.	
5	**[11]**: погружная ванна без протока и барботажа воды. Вес тушки 2,1 кг, температура тушки: +37°C / +4°C. Вода/лёд с температурой +1°C, время пребывания 7000 секунд (116,6 минут).	100

4.3 Обсуждение результатов таблицы 4.

4.3.1 Полученные в соответствии с МПО значения коэффициента теплоотдачи для процессов охлаждения продукта в погружных ваннах соответствуют рекомендациям в таблице 5.

Таблица 5. Ориентировочные значения коэффициентов теплоотдачи

Охлаждающая среда	Коэффициент теплоотдачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$
[2]: 26-% рассол $CaCl_2$, принудительная циркуляция	420-473
[12]: вода, принудительная циркуляция	200-500
[12]: рассолы и гликоли, принудительная циркуляция	150-600

4.3.2 Из таблицы 1 определим точное значение $\omega_{1\,w}$ для условий охлаждения тушки бройлера в хорошо перемешиваемой ледяной воде для случая, когда отсутствуют потери тепла в окружающую среду. Значению отношения $\varphi = \frac{c_{p\,br}}{c_{p\,w}} = \frac{3340\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}}{4070\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}} = 0{,}8206$ соответствует $\omega_{1\,w} = 3{,}659 = \omega_{1\,w\ well-st}$. Очевидно, что с ростом теплообмена с окружающей средой справедливо выражение $\omega_{1\,w} \geq \omega_{1\,w\ well-st}$, охлаждение происходит при принудительной конвекции. В случае, когда $\omega_{1\,w} < \omega_{1\,w\ well-st}$, т.е., когда температурное поле оболочки неравномерно и является функцией координат, охлаждение происходит при свободной конвекции. Граничному значению $\omega_{1\,w\,well-st}$ по кривой (9) из рис. 2 соответствует значение числа Био, равное Bi = 24,28, и, далее, из выражения для числа Био в (4) вычисляется граничное значение коэффициента теплоотдачи, равное 266 $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$.

4.3.3 В дальнейшем при выполнении расчетов времени охлаждения тушек птицы рекомендуется пользоваться значениями коэффициента теплоотдачи, учитывающего варианты погружного охлаждения, таблица 6.

Таблица 6. Расчетные значения α_w в зависимости от варианта погружного охлаждения

Вариант охлаждения тушки птицы	$\alpha_{w\ \text{реком}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$
Погружное охлаждение без принудительной конвекции	100-150
Погружное охлаждение с насосной циркуляцией охладителя	230-350
Погружное охлаждение с насосной циркуляцией + барботаж воздухом	300-450

4.3.4 Дискуссионной можно считать рекомендацию в [8] (позднее транслирована в [2]): обеспечить при погружном охлаждении $\alpha_w > 2000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, см. в таблице 4 эксперимент № 2. При стремлении числа *Bi* вверх по асимптоте до значения 191 и выше, при $\alpha_w \geq 2000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, первый корень характеристического уравнения (9) достигнет практически предельного значения $\omega_{1w\,\infty} \cong 6{,}23$, см. рис. 3. *Для справки: в таблице 1 в [8] указаны результаты расчетов коэффициента α_w, который изменялся в диапазоне от 2188 до 2847 Вт/м²/К.*

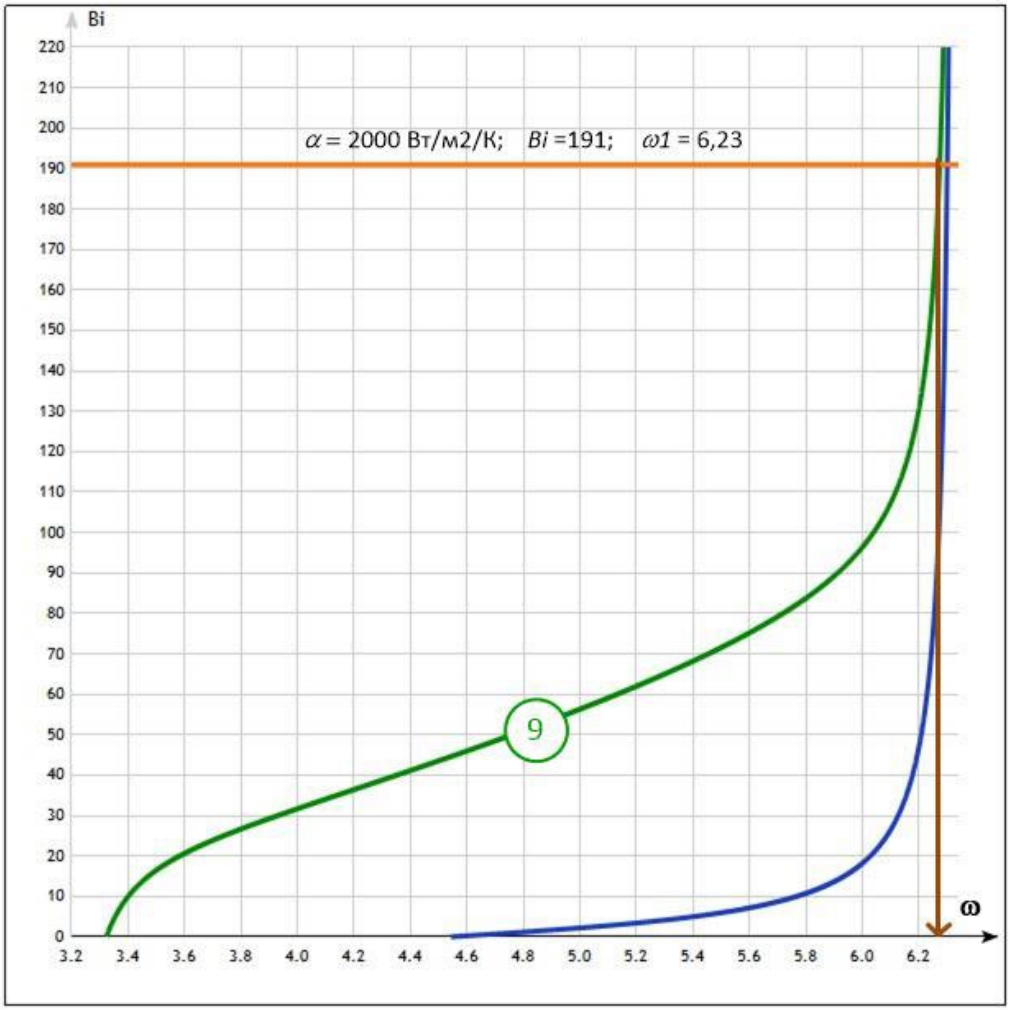


Рис. 3. По мере возрастания α охлаждаемое тело реагирует на действие охлаждающей среды слабее, в пределе при $\alpha \to \infty$ темп охлаждения есть конечная величина

В [13] представлены экспериментальные значения осредненного коэффициента теплоотдачи при погружной охлаждении продукта, которые варьировались от 256 $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$ для свободной конвекции и до 2071 $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$ при сильном барботаже воздухом. Сообщается, что корни характеристического уравнения (4) были рассчитаны для измеренных осредненных значений α_w — в работе не представлены. В резюмирующей части [13] указывается, что коэффициенты теплоотдачи могут быть увеличены в 8 раз, однако перемешивание воды не является пространственно однородным, поскольку оно зависит от сложных движений пузырьков воздуха и воды в резервуаре. В своей последующей работе [9] авторы в расчетах времени θ при погружном охлаждения используют не экспериментально измеренный коэффициент теплоотдачи, а обобщенный параметр теплоотдачи B, указано выше.

4.3.5 Выявлены типичные ошибки при проектировании процесса охлаждения в погружных ваннах:

— недостаточная подача свежей ледяной воды в погружные ванны, обусловленная: (а) неправильным расчетом требуемого расхода ледяной воды на 1 кг веса тушки птицы; (б) некорректным проектированием контура подачи ледяной воды (напорно-расходная характеристика насосного агрегата и/или трассировка контура); (в) не предусмотренный проектом разбор ледяной воды другими потребителями;

— фактический вес тушки, как правило, существенно, на 25-35%, превышает проектное значение.

5. **Выводы**. Предложен метод прогнозирования времени охлаждения θ, с, тушки бройлера в погружных ваннах на предприятиях птицепереработки. Центральный тезис метода состоит в том, что процесс охлаждения рассматривается для системы тел, состоящей из ядра и оболочки, тушки птицы и охлаждающей воды соответственно. Вследствие чего, при погружном охлаждении первый корень ω_1 характеристического уравнения точного аналитического решения находится в интервале $\theta(\omega_1) \in (\pi, 2\pi)$, в отличие от случая охлаждения тушки бройлера в интенсивной воздушной струе, для которого область определения заключена в интервале $\theta(\omega_1) \in (0, \pi)$.

Расчет времени охлаждения выполняется по известной формуле приближения первого члена ряда к аналитической формуле, в которой учтена форма тушки.

Для предложенного метода выполнены поверочные расчеты времени охлаждения продукта в погружных ваннах по известным данным замеров на птицефабрике, натурных экспериментов и CFD-моделирования. Рекомендованы значения коэффициента теплоотдачи между охлаждаемым продуктом и охлаждающей водой в зависимости от варианта погружного охлаждения.

В дальнейшем планируется рассмотреть вопросы эффективности охлаждения тушек птицы гидроаэрозольным и комбинированным способами.

Литература:

1. А.И. Цветков. Холодильная обработка и хранение мяса птицы и птицепродуктов. Пособие. ВНИИПП, Москва, 2001.

2. ASHRAE Handbook. Refrigeration. 2018.

3. Г.М. Кондратьев. Регулярный тепловой режим. Технико-теоретическая литература, Москва, 1954.

4. Z. Lin, et al. A simple method for prediction of chilling times for objects of two-dimensional irregular shape. International Journal of Refrigeration 19(2):95-106. 1996.

5. A.C. Cleland, et al. A simple method for prediction of heating and cooling rates in solids of various shapes. International Journal of Refrigeration 5(2):98-106. 1982.

6. H.S. Carslaw, J.C. Jaeger. Conduction of heat in solids. Oxford, 1959.

7. S. Paterson. The heating or cooling of a solid sphere in a well-stirred fluid. Proc. Phys. Soc. 1947.

8. C.H. Veerkamp, et al. Factors influencing cooling of poultry carcasses. Journal of Food Science, 39:980-984. 1974.

9. B.A.M. Carciofi, et al. Experimental results and modeling of poultry carcass cooling by water immersion. Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2010.

10. W.S. Cotrim, et al. Modeling and simulation of broiler carcass precooling by computational fluid dynamics. Journal of Food Process Engineering, 2021.

11. L.G.G. Rodrigues, et al. Poultry carcasses chilled by forced air, water immersion and combination of forced air and water immersion. Journal of Food Process Engineering, 2014.

12. А.И. Цветков. Создание участка замораживания тушек птицы на птицеперерабатывающих предприятиях. Рекомендации. ГУ ВНИИПП, Москва, 2004.

13. J.B. Laurindo, et al. On-line monitoring of heat transfer coefficients in a stirred tank from the signatures of the resultant force on a submerged body. International Journal of Refrigeration, 2010.