

Ф₈

XII Европейский конгресс работников НИИ мясной промышленности

Ленинградский технологический институт
холодильной промышленности. СССР

О ДОСТОВЕРНОСТИ ПРИБЛИЖЕННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ МЯСА

Н. А. Головкин и Л. И. Логинов

А Н Н О Т А Ц И Я

Предложенные ранее приближенные формулы для расчета процесса охлаждения мяса в воздухе при отрицательных температурах сопоставляются с точными расчетными формулами. Доказано, что приближенные методы позволяют получать данные, удовлетворяющие инженерным требованиям.

THE ALL-UNION RESEARCH INSTITUTE OF MEAT INDUSTRY
U S S R

ON THE VALIDITY OF APPROXIMATE METHODS
OF CALCULATION DURING MEAT CHILLING

Golovkin N.A., Loginov L.I.,
The Leningrad Technological Institute
of Refrigerating Industry.

S U M M A R Y

Previously suggested approximate formulae to calculate the process of meat air-chilling at under-zero temperatures are compared to the exact calculation formulae. It has been proved that approximate methods allow to receive data satisfying the engineering requirements.

UBER DIE GÜLTIGKEIT DER ANNÄHERNDEN BERECHNUNGSMETHODEN
BEIM FLEISCHABKÜHLEN

N.A.Golowkin, L.I.Loginow
Leningrader Technologisches
Institut der Kälteindustrie

Z U S A M M E N F A S S U N G

Die früher vorgeschlagenen Berechnungsformeln für Fleischkühlvorgang in der Luft bei Temperaturen unter 0°C werden den genauen Berechnungsformeln gegenübergestellt.

Es wird bewiesen, daß die mit Hilfe der annähernden Methoden gefundenen Werte die Ingenieuranforderungen ganz befriedigen.

A PROPOS DE L'AUTHEENTICITÉ DES MÉTHODES APPROXIMATIVES DE CAL-
CUL POUR LA RÉFRIGÉRATION DES VIANDES

N.A.Golovkin, L.I.Loguinov

S O M M A I R E

Les formules approximatives proposées pour le calcul du procédé de réfrigération des viandes en l'air aux températures négatives sont comparées aux formules exactes de calcul. On a démontré que les méthodes approximatives permettent de recevoir des données satisfaisantes aux demandes d'ingénieur.

О ДОСТОВЕРНОСТИ ПРИБЛИЖЕННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ МЯСА

Н.А. Головкин и Л.И. Логинов

Нами был предложен аналитический метод расчета продолжительности охлаждения мясных полутуш при отрицательных температурах воздушной среды, а также исследован теплообмен при доохлаждении и выравнивании температуры по объему полутуши во время хранения. Другими словами, был исследован процесс и найдены аналитические зависимости при применении ступенчатого способа охлаждения /1-3/.

Было показано, что для определения температуры поверхности t_n , продолжительности охлаждения $\bar{\tau}_k$, температуры центра t_y и среднеобъемной \bar{t} на первом этапе интенсивного охлаждения мясных полутуш можно применять формулы:

$$t_n = t_o - (t_o - t_c) A_1 \frac{\sin \mu_1}{\mu_1} \exp(-\mu_1^2 F_o), \quad (1)$$

$$\bar{\tau}_k = \frac{d^2}{4a\mu_1} \ln \left[\frac{A_1 (t_o - t_c)}{t_o + 1} \frac{\sin \mu_1}{\mu_1} \right], \quad (2)$$

$$t_y = t_o - (t_o - t_c) A_1 \exp(-\mu_1^2 F_o), \quad (3)$$

$$\bar{t} = t_o - (t_o - t_c) B_1 \exp(-\mu_1^2 F_o). \quad (4)$$

Для определения продолжительности доохлаждения и выравнивания температуры по объему $\bar{\tau}^*$ на втором этапе при тихом охлаждении была предложена формула:

$$\bar{\tau}^* = \frac{d^2}{a\mu_1^2} \ln \frac{2,4(t_{yk} + 1)}{\mu_1^2} \quad (2^x)$$

(В приведенных формулах обозначения общепринятые).

Поскольку предложенные формулы являются приближенными, возникла мысль рассмотреть точное решение задачи и сопоставить его с приближенным.

Математическая модель поставленной задачи, рассматривающей первый этап охлаждения, когда температура зависит лишь от времени $\bar{\tau}$ и расстояния до центра, сводится к решению уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial t(z, \bar{\tau})}{\partial \bar{\tau}} = a \left[\frac{\partial^2 t(z, \bar{\tau})}{\partial z^2} + \frac{2}{z} \frac{\partial t(z, \bar{\tau})}{\partial z} \right] \quad (5)$$

$0 \leq z \leq R$

при условиях:

$$t(z, 0) = f(z), \quad (6)$$

$$\frac{\partial t(R, \tau)}{\partial z} + \frac{\mathcal{L}}{R} [t(R, \tau) - t_c] = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial z} = 0, \quad t(0, \tau) \neq 0. \quad (8)$$

Решение этой задачи известно /4/ и может быть записано так:

$$t(z, \tau) = t_c + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mu_n}{\mu_n - \sin\mu_n \cos\mu_n} \cdot \frac{\sin\mu_n \frac{z}{R}}{z/R} \int_0^R [f(x) - t_c] \frac{\sin\mu_n \frac{x}{R}}{x/R} dx \cdot \exp(-\mu_n^2 Fo) \quad (9)$$

где μ_n - корни уравнения $\operatorname{tg} \mu = -\frac{\mu}{Bi-1}$

В нашем частном случае, когда начальное распределение температуры постоянно, т.е. $f(z) = t_0$ решение (9) будет выглядеть проще:

$$t(z, \tau) = t_0 - (t_0 - t_c) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \frac{R \sin\mu_n \frac{z}{R}}{z \mu_n} \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (10)$$

где $A_n = (-1)^{n+1} \frac{2Bi \sqrt{\mu_n^2 + (Bi-1)^2}}{\mu_n^2 + Bi^2 - Bi}$.

Температура поверхности определяется по формуле:

$$t_n = t_0 - (t_0 - t_c) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\sin\mu_n}{\mu_n} \exp(-\mu_n^2 Fo). \quad (11)$$

Для вычисления температуры центра t_y и среднеобъемной \bar{t} можно пользоваться формулами:

$$t_y = t_0 - (t_0 - t_c) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-\mu_n^2 Fo) \quad (12)$$

и
$$\bar{t} = t_0 - (t_0 - t_c) \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (13)$$

где $B_n = \frac{6Bi}{\mu_n^2 (\mu_n^2 + Bi^2 - Bi)}$

Экспериментальными исследованиями по охлаждению говяжьих полутуш было установлено, что коэффициент теплообмена \mathcal{L} в пределах инженерной точности может быть получен из безразмерного уравнения:

$$Nu = 0,37(Re)^{0,6} \quad (14)$$

Задаваясь условиями охлаждения d и t_c (используя соотношение (14)), теплофизическими характеристиками охлаждаемого объекта $-a$, R и t_0 , определяющим размером $d = 2R$, из формулы (11), положив $t_n = -1^\circ$, можно определить величину \bar{t}_k . Однако эти расчеты очень громоздки, так как получить из формулы (11) явное выражение для \bar{t}_k не представляется возможным.

Вычисление по точным формулам (11-13) были проведены на счетно-решающей машине. На основании этих вычислений построены графики 1-4, показывающие \bar{t}_k , $t(z, \bar{t}_k)$, $t_{цк}$ и t_k как функции температуры и скорости движения охлаждающего воздуха для частного случая, когда толщина бедра равнялась 20 см.

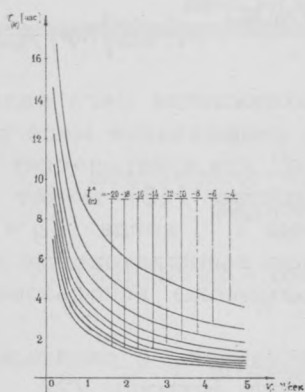


Рис. 1. Время достижения $t_n = -1^\circ$, в зависимости от t_c и v_c при толщине бедра 0,20 м

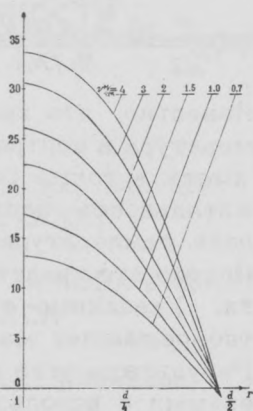


Рис. 2. Температурное поле бедра, толщиной 0,20 м, при $t_c = -10^\circ$ и различных v_c , когда $t_n = -1^\circ$

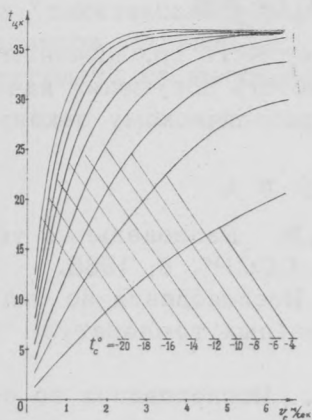


Рис. 3. Температура центра бедра ($t_{цк}$), толщиной 0,20 м, в зависимости от t_c и v_c при $t_n = -1^\circ$

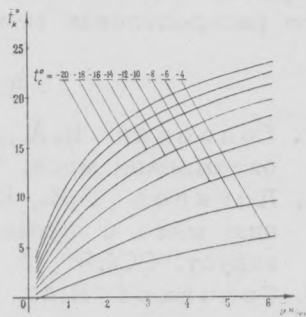


Рис. 4. Среднеобъемная температура бедра (\bar{t}_k), толщиной 0,20 м, в зависимости от t_c и v_c при $t_n = -1^\circ$

Результаты счета по точным формулам в сопоставлении с данными, полученными по приближенным формулам (1-4), ранее опубликованными /1/, показывают пригодность последних для инженерных расчетов.

Математическая модель второго этапа охлаждения, который, как было сказано, осуществляется в камерах тихого охлаждения, сводится снова к решению уравнения (5), но с новыми начальными условиями (11), которое определяется распределением температуры после первого этапа охлаждения ($\bar{t} = \bar{t}_k$).

Решение этой задачи может быть записано в виде:

$$t(z, \bar{t}) = t_{c_2} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2R\mu_m}{\mu_m - \sin\mu_m \cos\mu_m} \cdot \frac{\sin\mu_m \cdot \frac{z}{R}}{z} \left\{ (t_0 - t_{c_2}) \frac{\sin\mu_m - \mu_m \cos\mu_m}{\mu_m^2} \right. \\ \left. - (t_0 - t_{c_1}) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(\sin\mu_n - \mu_n \cos\mu_n)(\mu_n \sin\mu_m \cos\mu_m - \mu_m \sin\mu_n \cos\mu_m) \exp(-\mu_n^2 F_0)}{\mu_n (\mu_m^2 - \mu_n^2) (\mu_n - \sin\mu_n \cos\mu_n)} \right\} \exp(-\mu_m^2 F_0) \quad (15)$$

Известно, что критерием степени охлаждения мяса является температура в центре бедра. Полностью охлажденное мясо должно иметь в толще бедра температуру 4° , что и определяет продолжительность доохлаждения. По формуле (15) может быть найдена температура центра t_c и время \bar{t}^* , когда $t_c = 4^\circ$.

Однако это представляет значительные вычислительные трудности. Указанные трудности были преодолены использованием счетно-решающей машины.

Результаты этих расчетов были сопоставлены с данными, полученными с использованием приближенной формулы /2/,

$$t_c = \frac{12(t_{c_k} + 1)}{\mu_1^2} \exp(-\mu_1^2 F_0) - 1, \quad (16)$$

которая получилась, если ограничиться одним членом ряда, и когда начальное распределение подчиняется закону.

$$t(z, \bar{t}_k) = t_{c_k} - (t_{c_k} + 1) \frac{z^2}{R^2} \quad (17)$$

Эти сопоставления показали пригодность приближенных формул для определения \bar{t}^* и справедливость допущения начального распределения температуры по параболическому закону.

ЛИТЕРАТУРА

1. Головкин Н.А., Логинов Л.И. Рациональные условия охлаждения мяса, "Мясн. индустр. СССР", 5, 1965.
2. Логинов Л.И., Шеффер А.П. Исследования по охлаждению мяса с применением отрицательных температур, "Мясн. индуст. СССР", 3, 1966.
3. Головкин Н.А., Логинов Л.И. Исследования по охлаждению мяса с применением отрицательных температур. Доклад на XI Международном конгрессе по науке и технологии пищевой пром-сти, Варшава, 1966.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности, Гостехиздат, 1952.