

УДК 636.21

ББК 31.31

Г-94

Цуранов Олег Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры торгово-технологического оборудования Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Санкт-Петербургского торгового-экономического института (ГОУ ВПО СПбТЭИ), т.: (812)2977806;

Крысин Анатолий Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры торгово-технологического оборудования Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Санкт-Петербургского торгового-экономического института (ГОУ ВПО СПбТЭИ), т.: (812)2977806;

Бурылин Дмитрий Алексеевич, студент Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Санкт-Петербургского торгового-экономического института (ГОУ ВПО СПбТЭИ);

Вороненко Борис Авсеевич, доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий (СПбГУНиПТ), т.: (812)3153778.

ОСОБЕННОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРОДУКТОВ В ШКАФУ ИНТЕНСИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ВОЗДУХА

(рецензирована)

Особенности двухстадийного охлаждения продуктов в аппаратах интенсивного охлаждения, математическое описание процесса, анализ факторов, определяющих интенсификацию процесса, связь коэффициента затухания с интенсивностью охлаждения.

Ключевые слова: двухстадийное охлаждение, параметры интенсификации процесса охлаждения.

Tsuranov Oleg Alexeevich, Candidate of Technical Sciences, assistant professor of the Department of Trade and Technological Equipment of the SEI HPE "St. Petersburg Trade-Economic Institute" (SEI HPE SPbTEI), tel.: (812) 2977806;

Krysin Anatoliy Grigorjevich, Candidate of Technical Sciences, assistant professor of the Department of Trade and Technological Equipment of the SEI HPE "St. Petersburg Trade-Economic Institute" (SEI HPE SPbTEI), tel.: (812) 2977806;

Burylin Dmitri Alexeevich, a student of the SEI HPE "St. Petersburg Trade-Economic Institute" (SEI HPE SPbTEI);

Voronenko Boris Avseevich, Doctor of Technical Sciences, professor of St. Petersburg State University of Refrigeration and Food Technologies (SPbSURFT), tel.: (812) 3153778.

FEATURES OF COOLING PRODUCTS IN THE INTENSIVE COOLING CABINET WITH VARIABLE AIR TEMPERATURE

Features of two-stage cooling of products in the apparatus of intensive cooling, the mathematical description of the process, an analysis of factors determining the intensification of the process, the link attenuation coefficient with the intensity of cooling have been considered.

Keywords: two-stage cooling, the parameters of intensification of the cooling process.

Системы быстрого охлаждения продуктов, называемые часто системами Cook-Chill, реализуют процесс интенсивного охлаждения кулинарно-подготовленной продукции за время, длительность которого по технологическим соображениям не должна превышать 90 минут.

Температура охлаждаемого продукта зависит от технологического процесса его приготовления. В конце кулинарной обработки продукт имеет температуру обычно не выше 90°C.

В шкафу интенсивного охлаждения продукт рекомендуется охлаждать до температуры в центре 3...5°C.

Интенсивность охлаждения продукта зависит от принятого технологического решения. В холодильном оборудовании для охлаждения продукта реализуют режимы, которые часто именуются как "Soft Chill" и "Hard Chill".

При так называемом "мягком охлаждении" (Soft Chill) в процессе охлаждения продукта температура воздуха непрерывно понижается вплоть до нуля, после чего до конца процесса, при циклической работе холодильной машины, поддерживается на уровне 0...7°C.

В режиме "Hard Chill" температура воздуха в шкафу достигает -15...-20 °C и 40...50% дли-

тельности охлаждения поддерживается на этом уровне. Далее, в целях предотвращения подмерзания продукта, температуру воздуха повышают до среднеобъемной температуры 5°C . Охлаждение продолжают до достижения в центре продукта температуры $3 \dots 5^{\circ}\text{C}$.

Температуры воздуха $-15 \dots -20^{\circ}\text{C}$ и 5°C поддерживают посредством циклической работы холодильной машины.

Методы интенсификации процесса охлаждения продуктов

Технологической целью охлаждения является сокращение длительности процесса. Этим, в частности, обусловлено своеобразие режима "Hard Chill".

Средства достижения цели связаны с параметрами теплообмена между продуктом и охлаждающей средой.

Известно [1], что длительность охлаждения продукта зависит от следующих параметров теплообмена: определяющего геометрического размера R , температуры воздуха t_c , величины коэффициента теплоотдачи от продукта к теплоотводящей среде α . Мера влияния на длительность процесса каждой из перечисленных величин может быть установлена на основе анализа решения соответствующей задачи теплопроводности.

Геометрический размер продукта зависит от вида продукта. При охлаждении продуктов в функциональной емкости его геометрические размеры могут отличаться от глубины этой емкости.

Интенсификация теплообмена посредством увеличения скорости движения воздуха в охлаждаемом объеме, что обеспечивает увеличение коэффициента теплоотдачи от продукта к охлаждающей среде, ограничена технико-экономическими соображениями. В аппаратах интенсивного охлаждения она составляет $3 \dots 5$ м/с.

Наибольшие возможности интенсификации теплообмена связаны с понижением в охлаждаемом шкафу температуры воздуха. Возможности этого способа оценивают также на основе решения задачи теплопроводности.

Для тела в виде бесконечной плоскопараллельной пластины решение, например, для краевых условий III рода [1], имеет вид:

$$\frac{t(x, \tau) - t_c}{t_o - t_c} = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos\left(\mu_k \frac{x}{R}\right) e^{-\mu_k^2 \frac{a\tau}{R^2}}, \quad (1)$$

где $t(x, \tau)$ – температура в любой точке x объема продукта в любой момент времени τ , t_c – температура теплоотводящей среды, t_o – начальная температура продукта, $A_k = \frac{2 \sin \mu_k}{\mu_k + \sin \mu_k \cdot \cos \mu_k}$, μ_k – корни

характеристического уравнения $\text{ctg } \mu = \frac{1}{Bi} \mu$ (Bi – число Био, $Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda}$, где α – коэффициент теплоотдачи от поверхности продукта к теплоотводящей среде, λ – коэффициент теплопроводности продукта), R – половина толщины пластины, a – коэффициент температуропроводности продукта, $\text{м}^2/\text{с}$.

Представленное решение (1) отражает процесс охлаждения при постоянной температуре теплоотводящей среды (t_c), что отлично от реальных условий охлаждения продукта в шкафах интенсивного охлаждения. Однако, как тестовый вариант, оно может быть использовано для оценки параметров, влияющих на длительность охлаждения.

По результатам расчета для продукта размером $R = 0,02$ м при температуре воздуха -25°C построена графическая зависимость (рис. 1). Длительность охлаждения устанавливалась по достижении поверхностью продукта температуры, равной 0°C .

Анализ данных, представленных на рис. 1, свидетельствует, что понижение температуры воздуха ниже -25°C не отвечает технологическим требованиям. При длительности охлаждения продукта, равной 30 мин, температура в центре составила 13°C , что на 10°C выше технологически заданной.

На практике температура в шкафу в начале процесса охлаждения или равна температуре продукта или несколько от нее отличается, вследствие чего появляется необходимость в аналитическом решении задачи, учитывающей это важное обстоятельство.

Решение этой задачи представлено в работе [2]. Модель учитывает изменение температуры теплоотводящей среды во времени, позволяет связать длительность процесса со свойствами продукта и параметрами теплоотводящей среды.

Процесс охлаждения рассмотрен как составной, двухстадийный. Расчет по второй стадии выполняется после охлаждения поверхности продукта до принятой температуры, например, 5°C .

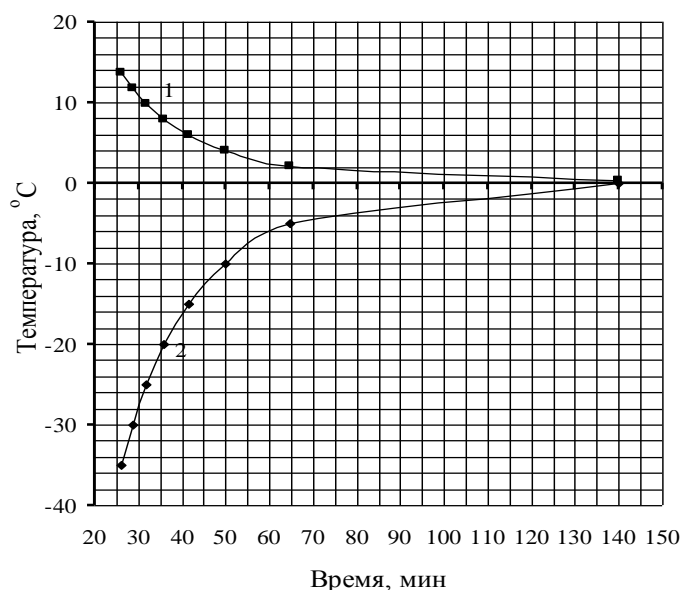


Рис. 1. Связь температуры в центре продукта (1) с температурой воздуха (2) (температура поверхности 0°C)
 Для I стадии решение в безразмерном виде получено методом интегрального преобразования Лапласа [2]:

$$T_1(X, Fo) = \frac{t_o - t_1(x, \tau)}{t_o - t_m} = 1 + \frac{Bi_1}{\varphi(Pd)} \cos(\sqrt{Pd} X) e^{-PdFo} - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{A_m}{1 - \frac{\mu_m^2}{Pd}} \cos(\mu_m X) e^{-\mu_m^2 Fo}, \quad (2)$$

где μ_m – последовательные положительные корни характеристического уравнения, $ctg \mu = \frac{\mu}{Bi_1}$;

$Pd = \frac{k R^2}{a}$ – число Предводителя (k – коэффициент затухания, 1/с).

Для второй стадии решение в безразмерной форме описывается выражением

$$T_2(X, Fo) = \frac{t_o - t_2(x, \tau)}{t_o - t_m} = 1 - T_c + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\mu_n X) e^{-\mu_n^2 Fo} \times$$

$$\left[T_c - \frac{\mu_n}{\sqrt{Pd}} \cdot \frac{\sin(\sqrt{Pd}) ctg(\mu_n) - \frac{\mu_n}{\sqrt{Pd}} \cos(\sqrt{Pd})}{\varphi(Pd) \left(1 - \left(\frac{\mu_n}{\sqrt{Pd}} \right)^2 \right)} - \right. \quad (3)$$

$$\left. \times \left[- \sum_{m=1}^{\infty} A_m \frac{\mu_n}{\mu_m} \cdot \frac{\sin(\mu_m) ctg(\mu_n) - \frac{\mu_n}{\mu_m} \cos(\mu_m)}{\left(1 - \left(\frac{\mu_m}{\sqrt{Pd}} \right)^2 \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{\mu_n}{\mu_m} \right)^2 \right)} \cdot e^{-\mu_m^2 Fo} \right] \right]$$

Анализ процесса интенсификации охлаждения продукта

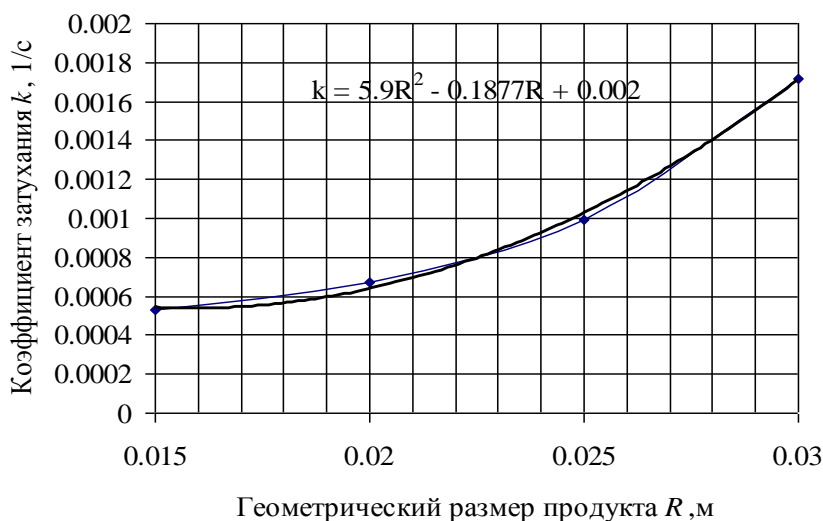


Рис. 2. Связь коэффициента затухания k с определяющим размером продукта R

Анализ процесса охлаждения на основе выражений (2-3) свидетельствует, что важным параметром, определяющим интенсивность охлаждения, является коэффициент затухания k . Значения величин k для продуктов различного размера отражены на рис. 2. Значения величин k для первой стадии соответствуют технологически заданной длительности охлаждения, равной 80 мин. На рис. 2 представлена линия тренда, аппроксимирующая полученные расчетные данные.

Одной и той же технологически заданной длительности охлаждения соответствует конкретная величина k . Например, при $R = 0,02\text{ м}$ коэффициент $k = 0,00067\text{ с}^{-1}$, при $R = 0,03\text{ м}$ коэффициент $k = 0,00172\text{ с}^{-1}$.

Интенсификация охлаждения достигается увеличением коэффициента k . На рис. 3-4 представлено распределение температуры в объеме продукта размером $R = 0,02\text{ м}$. При увеличении k с $k = 0,00041\text{ с}^{-1}$ до $k = 0,0007\text{ с}^{-1}$ (температура воздуха -25°C) длительность первой стадии сокращается с 80 мин до 50 мин. Однако, для достижения технологически заданной температуры в центре приходится увеличивать длительность второй стадии.

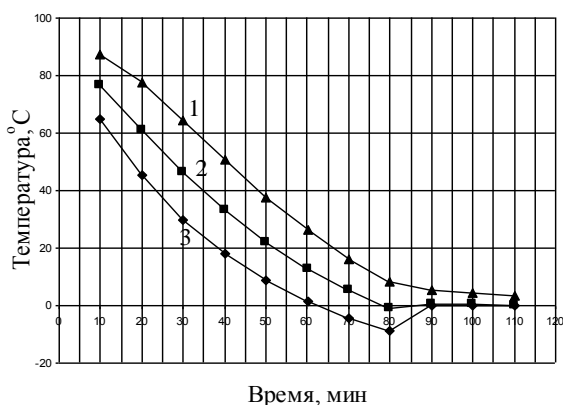


Рис. 3. Изменение температуры в центре (1), на поверхности продукта (2) и воздуха (3) ($R = 0,02\text{ м}$, $k = 0,00041\text{ с}^{-1}$)

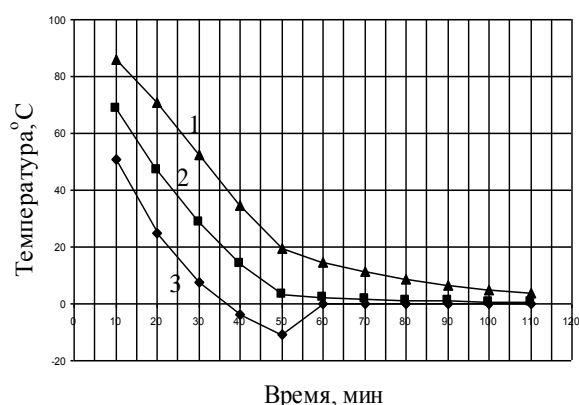


Рис. 4. Изменение температуры в центре (1), на поверхности продукта (2) и воздуха (3) ($R = 0,02\text{ м}$, $k = 0,0007\text{ с}^{-1}$)

Полная длительность процесса охлаждения (рис. 4) практически не отличается от процесса, представленного на рисунке 3. Эта закономерность однотипна той, что представлено на рис. 1. Она иллюстрирует тот факт, что в рамках технологически заданной полной длительности охлаждения, равной 90 минутам, интенсификация охлаждения на первой стадии нивелируется увеличением длительности второй стадии.

Охлаждение продукта в холодильных шкафах интенсивного охлаждения чаще всего обеспечивается непрерывной работой холодильной машины, реализующей ее холодопроизводительность.

Холодопроизводительность холодильной машины обычно составляет 80% полного тепловыделения от продукта. Запас холодопроизводительности обеспечивает понижение температуры кипения холодильного агента в воздухоохладителе и, соответственно, воздуха в охлаждаемом объеме.

Условия внешнего теплообмена между воздухом и продуктом неразрывно связаны с условиями внутреннего теплопереноса в продукте. Эта связь получила отражение в математической модели двухступенчатого охлаждения продукта [2].

В настоящей работе, в рамках отмеченного направления, представлены отдельные результаты исследований. Дальнейшие публикации должны быть дополнены материалами, устанавливающими связь процесса охлаждения с холодопроизводительностью холодильной машины.

ВЫВОДЫ

1. Предложенное аналитическое решение пригодно для выбора метода интенсификации охлаждения в отсутствие подмораживания продукта.

2. Интенсификация охлаждения продукта достигается увеличением коэффициента затухания k . Однако требование к достижению технологически заданной среднеобъемной температуры продукта $3...5^{\circ}\text{C}$ лимитирует сокращение полной длительности процесса.

Литература:

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
2. Цуранов О.А., Крысин А.Г., Вороненко Б.А. Особенности математического описания процесса охлаждения кулинарных изделий в аппаратах интенсивного охлаждения // Новые технологии. 2010. Вып. 3. С. 59-62.