

# Теплоотдача при оросительной дефростации пищевых продуктов

Д-р техн. наук, проф. С.В. ФРОЛОВ, А.Л. РЕЙНЕСБЕРГ

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий

С.Н. ГОРЯЙНОВ

Компания «Парнас-Холдинг»

---

*It is considered irrigation thawing of foodstuffs. It consists in successive irrigation of water at 20...22 °C (15 –25 g/sec per 1 m<sup>2</sup>) by means of pneumatic sprayer with fine-dispersated dispersion. It is offered the analytic solution of hydrodynamic and heat transfer problem for slow flowing pellicle of water on a vertical surface under the action of power of gravity. It is obtained correlation for heat irradiation coefficients and optimal expenditure of water. The results are compared with the experimental data on thawing of beef leg.*

---

При дефростации мясных туш и других пищевых продуктов серьезной проблемой является необходимость более быстрого по возможности проведения процесса с одновременным обеспечением достаточно высокого качества оттаявшего продукта.

В процессе дефростации регулируемые параметрами являются только коэффициент теплоотдачи и тем-

пература теплоподводящей среды. Но изменение температуры теплоподводящей среды ограничено технологическими требованиями, так как температура поверхности тела не должна подниматься выше определенного уровня. Что касается коэффициента теплоотдачи, то его повышение технологически не ограничено. Дефростация водой позволяет увеличить коэффициент

теплоотдачи в 3 раза, а также избежать усушки продукта.

При гидроаэрозольном способе дефростации продукт орошается водой (при максимально разрешенной согласно нормативной документации температуре 20...22 °С) путем аэрозольного распыления с использованием пневматических форсунок с мелкодисперсным распылом в количестве, достаточном для возникновения очень тонкой водяной пленки на вертикальной поверхности продукта, которая стекает вниз под действием силы тяжести. Благодаря мелкодисперсному распылу расход питьевой воды уменьшается до 15...25 г/с на 1 м<sup>2</sup> поверхности продукта.

При расчете продолжительности дефростации необходимо определить коэффициент теплоотдачи от водяной пленки к поверхности продукта. Известная теория Нуссельта [2] не совсем приемлема для нашего случая, поскольку в ней фигурирует усредненная по толщине слоя жидкости температура, в то время как известной является лишь начальная температура жидкости. Кроме того, необходимы соотношения, позволяющие определять расход воды для эффективного нагрева поверхности продукта.

Для решения этих задач исходим из следующих предположений:

- течение пленки носит ламинарный характер;
- силами, действующими в жидкости, являются сила тяжести и сила внутреннего трения (вязкости), инерционными силами пренебрегаем;
- взаимодействие пленки с окружающим воздухом как гидродинамическое, так и тепловое отсутствует.
- скорость жидкости в любой точке имеет только вертикальную компоненту;
- толщина пленки во всех точках поверхности одинакова;
- процесс является стационарным: ни скорость, ни температура жидкости от времени не зависят;
- толщина теплового пограничного слоя равна толщине пленки (т.е. вся пленка является пограничным слоем).

Введем систему координат: ось  $Ox$  направлена вниз; ось  $Oy$  – перпендикулярно поверхности от нее; начало координат расположено на поверхности, в точке первого соприкосновения жидкости с поверхностью (т.е. в верхней точке вертикальной поверхности). Пусть  $v(x,y)$  – скорость жидкости (м/с). Тогда уравнения движения выглядят следующим образом:

$$\frac{dv}{dx} = 0; \quad g + v \frac{d^2v}{dy^2} = 0; \quad v(x,0) = 0; \quad \frac{dv}{dy}(x,\delta) = 0, \quad (1)$$

где  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  
 $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с;  
 $\delta$  – толщина пленки, м.

Первое из уравнений (1) – это уравнение неразрывности, из которого следует, что скорость зависит только от координаты  $y$ . Второе – это уравнение Навье – Стокса, в котором оставлены только слагаемые, отвечающие силе тяжести и силе внутреннего трения. Далее идут граничные условия: условие «прилипания» на поверхности и условие отсутствия трения пленки о воздух.

Решение уравнений (1) выглядит следующим образом:

$$v(y) = \frac{g}{\nu} \left( \delta y - \frac{y^2}{2} \right). \quad (2)$$

При этом расход жидкости на единицу оmyваемого периметра  $Q$  (м<sup>2</sup>/с) равен:

$$Q = \int_0^\delta v(y) dy = \frac{g\delta^3}{3\nu}; \quad \delta = \sqrt[3]{\frac{3\nu Q}{g}}. \quad (3)$$

Соотношение (3) устанавливает необходимую связь между расходом жидкости  $Q$  и толщиной пленки  $\delta$ .

Теперь рассмотрим тепловые уравнения. Запишем уравнение теплопроводности для пограничного слоя [2]:

$$a \frac{d^2t}{dy^2} = v(y) \frac{dt}{dx} = \frac{g}{\nu} \left( \delta y - \frac{y^2}{2} \right) \frac{dt}{dx}; \quad (4)$$

$$t(0,y) = t_{\text{нач}}; \quad t(x,0) = t_{\text{пов}}; \quad \frac{dt}{dx}(x,\delta) = 0,$$

где  $t(x,y)$  – распределение температуры в слое;

$a$  – коэффициент температуропроводности жидкости, м<sup>2</sup>/с;

$t_{\text{нач}}$  – начальная температура жидкости, °С;

$t_{\text{пов}}$  – температура поверхности, °С.

Приближение пограничного слоя заключается в том, что в левой части уравнения (4) опущена вторая производная по  $x$ . К уравнению теплопроводности имеются начальное условие и два граничных. Второе граничное условие следует из предположения, что теплообмен между жидкостью и окружающим воздухом отсутствует.

Задачу (4) решаем методом разделения переменных. Вначале введем безразмерные переменные:

$$\xi = x/\delta; \quad \zeta = y/\delta; \quad \text{Pe} = Q/a; \quad \Theta = (t - t_{\text{пов}})/(t_{\text{нач}} - t_{\text{пов}}), \quad (5)$$

где  $\text{Pe}$  – число Пекле, служащее мерой отношения конвективного и молекулярного переноса тепла в пленке.

В переменных (5) задача (4) выглядит следующим образом:

$$\frac{d^2\Theta}{d\zeta^2} = 3\text{Pe} \left( \zeta - \frac{\zeta^2}{2} \right) \frac{d\Theta}{d\zeta}; \Theta(0, \xi) = 1; t(\xi, 0) = 0;$$

$$\frac{d\Theta}{d\xi}(\xi, 1) = 0. \quad (6)$$

Делим в (6) переменные [2]:

$$\Theta(\xi, \zeta) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i Y_i(\zeta) \exp\left(-\frac{\kappa_i \xi}{3\text{Pe}}\right); Y_i(0) = Y_i(1) = 0;$$

$$Y_i'' + \kappa_i \left( \zeta - \frac{\zeta^2}{2} \right) Y_i = 0;$$

$$A_i = \frac{\int_0^1 \left( \zeta - \frac{\zeta^2}{2} \right) Y_i(\zeta) d\zeta}{\int_0^1 \left( \zeta - \frac{\zeta^2}{2} \right) Y_i^2(\zeta) d\zeta}. \quad (7)$$

К сожалению, уравнение для  $Y_i(\zeta)$  не решается в квадратах, но легко решается численно.

Вычислим локальный коэффициент теплоотдачи  $\alpha(x)$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°C):

$$\begin{aligned} \alpha(x) &= \frac{\lambda_{\text{ж}}}{t_{\text{нач}} - t_{\text{пов}}} \frac{dt}{dy}(x, 0) = \frac{\lambda_{\text{ж}}}{\delta} \frac{d\Theta}{d\zeta} \left( \frac{x}{\delta}, 0 \right) = \\ &= \frac{\lambda_{\text{ж}}}{\delta} \sum_{i=1}^{\infty} A_i Y_i'(0) \exp\left(-\frac{\kappa_i x}{3\text{Pe}\delta}\right), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\lambda_{\text{ж}}$  – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·°C).

Глобальный коэффициент теплоотдачи получим усреднением локального по промежутку  $x \in [0, H]$ , где  $H$  – высота вертикальной стенки, м:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{H} \int_0^H \alpha(x) dx = \\ &= \frac{3\text{Pe} \lambda_{\text{ж}}}{H} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_i Y_i'(0)}{\kappa_i} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\kappa_i H}{3\text{Pe} \delta}\right) \right] = \\ &= \frac{\text{Pe} \lambda_{\text{ж}}}{H} \left[ 3 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_i Y_i'(0)}{\kappa_i} - 3 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_i Y_i'(0)}{\kappa_i} \exp\left(-\frac{\kappa_i H}{3 \text{Pe} \delta}\right) \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Поскольку собственные числа  $\kappa_i$  растут с увеличением номера  $i$ , то каждая последующая экспонента убывает быстрее предыдущей. Поэтому можно воспользоваться приближением первого члена ряда (это аналогично широко используемому приближению регулярного теплового режима [2]). Тогда получим:

$$\alpha = \frac{\text{Pe} \lambda_{\text{ж}}}{H} \left[ 3 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_i Y_i'(0)}{\kappa_i} - \frac{3 A_1 Y_1'(0)}{\kappa_1} \exp\left(-\frac{\kappa_1 H}{3\text{Pe}\delta}\right) \right]. \quad (10)$$

Для нахождения суммы в соотношении (10) можно воспользоваться соотношением теплового баланса. Действительно, в пределе очень больших значений высоты стенки  $H$  экспонента в (10) станет пренебрежимо мала. Физически это означает, что жидкость охлаждается практически до температуры стенки. Тогда

$$\alpha H (t_{\text{нач}} - t_{\text{пов}}) = QC (t_{\text{нач}} - t_{\text{пов}}), \quad (11)$$

где  $C$  – удельная теплоемкость жидкости, Дж/(кг·°C).

Из (11) следует, что сумма в (10) равна единице. Первое собственное число задачи (7)  $\kappa_1 \approx 5,6$  и кон-

станта  $\frac{3 A_1 Y_1'(0)}{\kappa_1} \approx 0,92$  определены численным ин-

тегрированием с использованием пакета MathCad 2001. Таким образом, окончательно имеем:

$$\alpha = \frac{QC\rho}{H} \left\{ 1 - 0,92 \exp\left[-\frac{\kappa_1 Ha (g/v)^{1/3}}{(3Q)^{4/3}}\right] \right\}, \quad (12)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Температура жидкости на выходе  $t_{\text{вых}}$  (°C) составит, очевидно:

$$t_{\text{вых}} = t_{\text{пов}} + 0,92 (t_{\text{нач}} - t_{\text{пов}}) \exp\left[-\frac{\kappa_1 aH (g/v)^{1/3}}{(3Q)^{4/3}}\right].$$

На рис. 1 изображен график зависимости (12) в виде зависимости между безразмерными комплексами  $A$  и  $B$ :

$$A = \frac{\alpha (vH)^{1/4}}{Ca^{3/4} g^{1/4}}; \quad B = \frac{Qv^{1/4}}{(Ha)^{3/4} g^{1/4}}.$$

Коэффициент теплоотдачи достаточно быстро увеличивается с ростом расхода воды  $Q$  примерно до значения

$$Q \approx \frac{(Ha)^{3/4} g^{1/4}}{v^{1/4}} \quad (13)$$

(соответствует значению  $B \approx 1$ ), а далее его рост существенно замедляется. Таким образом, повышать расход воды больше [см. уравнение (13)] не имеет смысла, так как это весьма незначительно увеличит теплоотдачу.

Для выбора температуры воды и определения продолжительности процесса воспользуемся известными соотношениями [3]. Температура поверхности в ходе процесса оттаивания  $t_{\text{пов}}$  (°C) равна:

$$t_{\text{пов}} = t - \frac{t - t_{\text{кр}}}{1 + \text{Bi} \left[ \frac{1 - (1-d)^{2-1/\Phi}}{2-1/\Phi} \right]}; \quad (14)$$

$$\text{Bi} = \alpha R / \lambda_{\text{пр}}; \quad \Phi = V / (SR); \quad d = \Delta / R,$$

где  $\Delta$  – толщина оттаившего слоя туши, м;

$t$  – температура нагревающего агента, °С;

$t_{\text{кр}}$  – криоскопическая температура продукта, °С

$R$  – определяющий размер тела (расстояние от поверхности до наиболее удаленной от нее точки внутри тела), м;

$\text{Bi}$  – безразмерное число Био;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

$\lambda_{\text{пр}}$  – коэффициент теплопроводности оттаившей части тела, Вт/(м·°С);

$\Phi$  – безразмерный коэффициент формы;

$V$  – объем туши, м<sup>3</sup>;

$S$  – площадь поверхности туши, м<sup>2</sup>.

Продолжительность процесса  $\tau$  как функция от  $\delta$  ( $\delta$  – безразмерная толщина оттаившего слоя продукта):

$$\tau = q\rho R^2 \Phi \times \left[ \left( \frac{1}{\text{Bi}} + \frac{\Phi}{2\Phi - 1} \right) \left[ 1 - (1-d)^{1/\Phi} \right] - \frac{1 - (1-d)^2}{2(2\Phi - 1)} \right] \times \lambda_{\text{пр}} (t - t_{\text{кр}}) \left\{ 1 + \frac{2-1/\Phi}{\text{Bi} [1 - (1-d)^{2-1/\Phi}]} \right\}, \quad (15)$$

где  $q$  – удельная теплота плавления льда в теле, Дж/кг;

$\rho$  – плотность тела, кг/м<sup>3</sup>.

Для подтверждения возможности применения исходных соотношений провели эксперимент по дефростации говяжьей четвертины (бедренная часть) орошением водой. Четвертину подвешенной туши орошали водой с температурой  $t = 20$  °С вдоль всей длины. Высота вер-

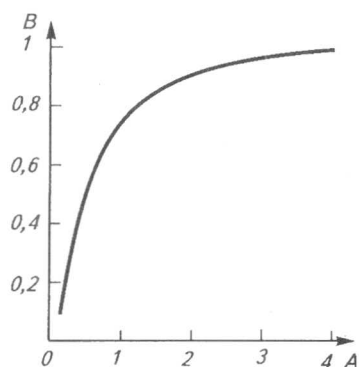


Рис. 1. Зависимость между безразмерными комплексами  $A$  и  $B$

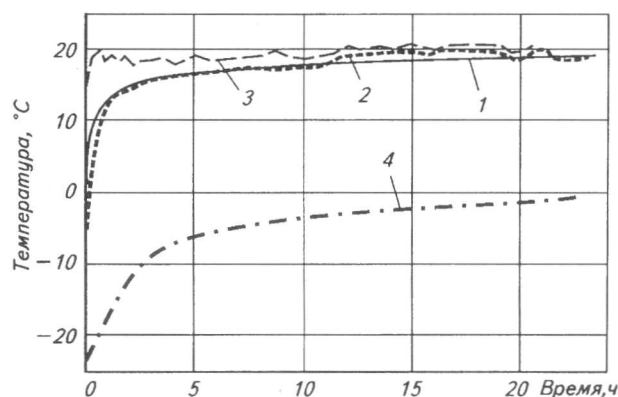


Рис. 2. Зависимость температуры поверхности от времени размораживания четвертины говядины (начальная температура  $t_{\text{нач}} = -18$  °С) водой температурой 20 °С:

- 1 – изменение температуры поверхности (теоретическая кривая); 2 – изменение температуры поверхности (экспериментальные значения); 3 – изменение температуры греющей среды; 4 – изменение температуры центра тела

тикальной стенки  $H$  составляла 1,2 м. Параметры воды при данной температуре:  $a = 1,427 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с;  $\nu = 1,006 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $C = 4183$  Дж/(кг·°С);  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>. Если расход воды равен 18 г/с (как в эксперименте), то из соотношения (12) получим  $\alpha = 63$  Вт/(м<sup>3</sup>·°С). При этом расчетная продолжительность процесса составила 23,5 ч, продолжительность эксперимента – 22,9 ч. Небольшое ускорение эксперимента объясняется некоторым неконтролируемым превышением температуры греющей среды от заданного в расчетах значения ( $t = 20$  °С).

На рис. 2 представлены экспериментальные и теоретические значения температуры поверхности четвертины туши говядины (бедренная часть), которые хорошо согласуются между собой. Эксперимент также показал, насколько более интенсивно проходит дефростация продукта при использовании в качестве греющей среды воды вместо воздуха. При проведении аналогичных экспериментов, где в качестве греющей среды применяли только воздух той же температуры, процесс длился 38,7 ч.

### Список литературы

1. Владимиров В.С. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1981.
2. Соколов В.Н., Доманский И.В. Газожидкостные реакторы. – Л.: Машиностроение, 1976.
3. Фролов С.В., Куцакова В.Е., Кипнис В.Л. Тепло- и массообмен в расчетах процессов холодильной технологии пищевых продуктов. – М.: Колос-Пресс, 2001.