

7. Храмов А. Г. Феномен молочной сыворотки. СПб.: Профессия, 2011. 804 с.
8. Рябцева С. А. Технология лактулозы. М.: ДеЛи принт, 2003. 232 с.
9. Лодыгин А. Д. Разработка инновационных технологий пребиотических концентратов на основе вторичного молочного сырья: дис... д-ра техн. наук: 05.18.04/ Лодыгин Алексей Дмитриевич. Ставрополь: ГОУ ВПО «Северо-Кавказский государственный технический университет», 2012. 333 с.
10. Храмов А. Г. Технологическая платформа линейки пребиотических концентратов бренда «Лакто-бел» // Переработка молока. 2014. № 5. С. 36–40.

УДК 637.23

Чеботарев Евгений Алексеевич, Малсугенов Александр Владимирович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РАСЧЕТА ОХЛАДИТЕЛЯ ПЛАСТИНЧАТОГО МАСЛООБРАЗОВАТЕЛЯ

Предложен новый подход к математическому описанию процесса охлаждения в пластинчатом теплообменнике скребкового типа маслообразователя, что позволяет совершенствовать тепловой расчет.

Ключевые слова: охладитель скребкового типа, процесс охлаждения, математическое описание, расчетные формулы.

Chebotarev Evgeny Alekseevich, Malsugenov Aleksandr Vladimirovich
IMPROVED THERMAL DESIGN FOR REFRIGERANT IN
PLATE BUTTER-MAKING MACHINE

The item focuses on a new approach to the mathematical description of cooling in a plate-type scraper heat exchanger in butter-making machines, which allows improving the thermal design.

Key words: scraper-type refrigerant, cooling, mathematical description, design formula.

Охладители скребкового типа нашли широкое применение в составе пластинчатых маслообразователей для охлаждения высокожирных сливок при производстве сливочного масла методом преобразования.

Применения традиционной методики теплового расчета [1], когда в формулах используют только конечные и начальные температуры теплоносителей, для полноценного математического описания процесса охлаждения в роторно-пластинчатом охладителе, по нашему мнению, недостаточно. И связано это с тем, что каждый продуктовый зазор снабжен перемешивающим устройством и для определения параметров термомеханического воздействия, необходимо учитывать среднюю температуру продукта в каждом из этих зазоров.

В конечном результате необходимо установить связь между температурой продукта в процессе охлаждения и поверхностью теплопередачи

$$t_{np} = f(F), \quad (1)$$

где t_{np} – температура продукта, °C; F – площадь теплообменной поверхности, м².

Рассмотрим процесс охлаждения в роторно-пластинчатом охладителе при противоточном движении продукта и хладоносителя (см. рис.).

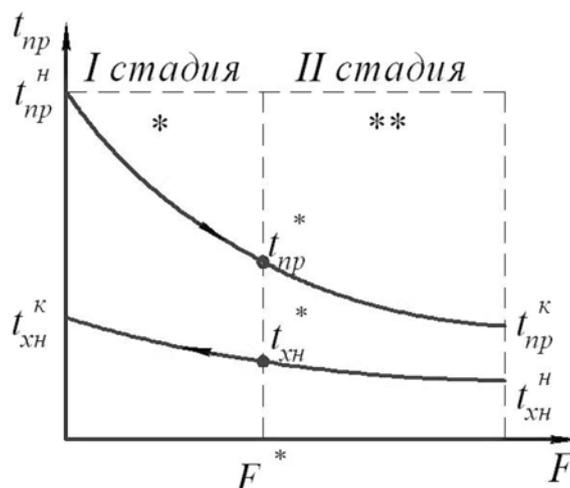


Рис. График к определению параметров процесса охлаждения, соответствующих промежуточному значению температуры продукта t_{np}^*

Выделим на графике изменения температуры продукта некоторую промежуточную температуру t_{np}^* , которой соответствует определенная температура хладоносителя t_{xn}^* и поверхность теплообмена F^* . В этом случае процесс охлаждения условно разделяется на две стадии: I стадию, в результате которой продукт охлаждается до температуры t_{np}^* , и II стадию, в ходе которой продукт охлаждается до конечной температуры t_{np}^k , при этом II стадия влияет на I вследствие противоточного движения в охладителе.

Запишем соответствующие условия теплового баланса:

$$Q_{xn} = Q_{np} + Q_{mex} + Q_{крисст} ; \quad (2)$$

$$Q_{xn}^* = Q_{np}^* + Q_{mex}^* + Q_{крисст}^* ; \quad (3)$$

$$Q_{xn}^{**} = Q_{np}^{**} + Q_{mex}^{**} + Q_{крисст}^{**} ; \quad (4)$$

$$Q_{np} = Q_{np}^* + Q_{np}^{**} ; \quad (5)$$

$$Q_{xn} = Q_{xn}^* + Q_{xn}^{**} ; \quad (6)$$

$$Q_{mex} = Q_{mex}^* + Q_{mex}^{**} ; \quad (7)$$

$$Q_{крисст} = Q_{крисст}^* + Q_{крисст}^{**} , \quad (8)$$

где Q_{xn} , Q_{xn}^* , Q_{xn}^{**} – теплота, отводимая с хладоносителем, соответственно в процессе всего охлаждения, на I и на II стадиях, Вт; Q_{np} , Q_{np}^* , Q_{np}^{**} – теплота, отводимая от продукта, соответственно в процессе всего охлаждения, на I и II стадиях, Вт; Q_{mex} , Q_{mex}^* , Q_{mex}^{**} – теплота, привносимая в продукт за счет энергии механического перемешивания, соответственно в процессе всего охлаждения, на I и II стадиях, Вт; $Q_{крисст}$, $Q_{крисст}^*$, $Q_{крисст}^{**}$ – скрытая теплота кристаллизации, выделяемая соответственно в процессе всего охлаждения, на I и II стадиях, Вт.

При математическом описании процесса охлаждения в роторно-пластинчатом охладителе приняты следующие допущения:

- не учитывается изменение интенсивности теплопередачи вдоль радиуса охлаждающей пластины;
- продукт постоянно движется вдоль теплообменной поверхности, т. е. не учитываются переходы из одного продуктового зазора в другой;
- не учитывается теплообмен между охладителем и окружающей средой.

Поверхность теплопередачи F^* , при которой температура продукта достигает значения $t_{\text{пр}}^*$ в соответствии с основным уравнением теплопередачи [2] определяется зависимостью

$$F^* = \frac{Q_{\text{хн}}^*}{k^* \cdot \Delta t^*}, \quad (9)$$

где k^* – среднее значение коэффициента теплопередачи на I стадии; Δt^* – средняя логарифмическая разность температур продукта и хладоносителя на I стадии, °С.

Количество отводимой хладоносителем теплоты на I стадии $Q_{\text{хн}}^*$ определяется по формуле (3), данную зависимость можно записать в следующем виде

$$Q_{\text{хн}}^* = c_{\text{пр}}^{\text{cp}*} \cdot \text{Пр} \cdot (t_{\text{пр}}^{\text{н}} - t_{\text{пр}}^*) + Q_{\text{мех}}^* + Q_{\text{крит}}^*, \quad (10)$$

где $A_{\text{пр}}^{\text{cp}*}$ – удельная теплоемкость продукта при его средней температуре на I стадии $t_{\text{пр}}^{\text{cp}*}$, Дж/(кг·К); $t_{\text{пр}}^{\text{н}}$ – начальная температура продукта, °С; Пр – производительность охладителя, кг/с.

Среднее значение коэффициента теплопередачи на I стадии k^* определяется по формуле [2] (без учета налета на теплообменной поверхности)

$$k^* = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1^*} + \frac{\lambda_{\text{см}}}{\delta_{\text{см}}} + \frac{1}{\alpha_2^*}}, \quad (11)$$

где α_1^* – среднее значение коэффициента теплоотдачи со стороны продукта на I стадии, Вт/(м²·К); α_2^* – среднее значение коэффициента теплоотдачи со стороны хладоносителя на I стадии, Вт/(м²·К); $\lambda_{\text{см}}$ – коэффициент теплопроводности материала пластины, Вт/(м·К); $\delta_{\text{см}}$ – толщина стенки охлаждающей пластины, м.

Коэффициент теплоотдачи со стороны хладоносителя α_2^* определяется следующей функциональной зависимостью

$$\alpha_2^* = f(P'; t_{\text{хн}}^{\text{cp}*}), \quad (12)$$

где P' – расход хладоносителя в одной пластине, л/с; $t_{\text{хн}}^{\text{cp}*}$ – средняя температура хладоносителя на I стадии, °С.

Для определения коэффициента теплоотдачи α_2^* движение хладоносителя внутри охлаждающей пластины рассмотрим как движение в канале щелевидной формы [3]

$$\alpha_2^* = \frac{Nu^* \cdot \lambda_{\text{хн}}^*}{D_{\text{экв}}}, \quad (13)$$

где Nu^* – критерий подобия Нуссельта при средней температуре хладоносителя на I стадии $t_{\text{хн}}^{\text{cp}*}$; $\lambda_{\text{хн}}^*$ – коэффициент теплопроводности хладоносителя при $t_{\text{хн}}^{\text{cp}*}$, Вт/(м·К); $D_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр, м.

В результате, для расчета коэффициента теплоотдачи α_2^* (в охлаждающей пластине к охладителю маслообразователя типа ОУА) получена формула

$$\alpha_2^* = 5923 \cdot P' + 471. \quad (14)$$

Таким образом, в уравнении (11) параметром, меняющимся в процессе охлаждения, является только коэффициент α_1^*

$$\alpha_1^* = 0,29 \sqrt{n \cdot z \cdot c_{\text{пр}}^{\text{cp}*} \cdot \lambda_{\text{пр}}^{\text{cp}*} \cdot \rho_{\text{пр}}^{\text{cp}*}}, \quad (15)$$

где n – частота вращения скребкового вала, об/с; z – число скребков; $\rho_{\text{пр}}^{\text{cp}*}$ – плотность продукта при температуре $t_{\text{пр}}^{\text{cp}*}$, кг/м³; $\lambda_{\text{пр}}^{\text{cp}*}$ – коэффициент теплопроводности продукта при температуре $t_{\text{пр}}^{\text{cp}*}$, Вт/(м·К).

Средняя логарифмическая разность температур продукта и хладоносителя на I стадии Δt^* равна

$$\Delta t^* = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}^*}{\ln \left(\frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}^*} \right)}, \quad (16)$$

где Δt_{\max} – максимальная разность температур в охладителе, °C; Δt_{\min}^* – минимальная разность температур в охладителе на I стадии, °C.

Максимальная и минимальная разность температур для рассматриваемого случая определяются по формулам:

$$\Delta t_{\max} = t_{np}^H - t_{xn}^k; \quad (17)$$

$$\Delta t_{\min}^* = t_{np}^* - t_{xn}^*, \quad (18)$$

где t_{xn}^k – конечная температура хладоносителя, °C.

Каждому значению температуры продукта t_{np}^* соответствует свое значение температуры хладоносителя t_{xn}^* , и поскольку продукт и хладоноситель движутся противотоком, то для определения t_{xn}^* воспользуемся уравнениями теплового баланса.

Подставив уравнение (5) в (4) получим

$$Q_{xn}^{**} = Q_{np} - Q_{np}^* + Q_{mex}^{**} + Q_{крисст}^{**}. \quad (19)$$

После преобразований в уравнении (19) получим

$$t_{xn}^* = t_{xn}^H + \frac{c_{np}^{cp} \cdot Pr \cdot (t_{np}^H - t_{np}^k) - c_{np}^{cp*} \cdot Pr \cdot (t_{np}^H - t_{np}^*) + Q_{mex}^{**} + Q_{крисст}^{**}}{c_{xn} \cdot P}, \quad (20)$$

где c_{np}^{cp} – удельная теплоемкость продукта при его средней температуре в охладителе t_{np}^{cp} , Дж/(кг·К); t_{np}^H и t_{np}^k – соответственно начальная и конечная температура продукта, °C; c_{xn} – удельная теплоемкость хладоносителя, Дж/(кг·К); P – общий расход хладоносителя, л/с.

Подставив формулу (20) в (18) получим

$$\Delta t_{\min}^* = t_{np}^* - \left(t_{xn}^H + \frac{c_{np}^{cp} \cdot Pr \cdot (t_{np}^H - t_{np}^k) - c_{np}^{cp*} \cdot Pr \cdot (t_{np}^H - t_{np}^*) + Q_{mex}^{**} + Q_{крисст}^{**}}{c_{xn} \cdot P} \right). \quad (21)$$

Уравнение (4.9) с учетом формул (4.10), (4.11) и (4.16) можно представить в следующем виде

$$F^* = \frac{c_{np}^{cp*} \cdot Pr \cdot (t_{np}^H - t_{np}^*) + Q_{mex}^* + Q_{крисст}^*}{\left(\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1^*} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2^*}} \right) \cdot \left(\frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}^*}{\ln \left(\frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}^*} \right)} \right)}. \quad (22)$$

Поскольку в охладитель поступают высокожирные сливки с массовой долей молочного жира, соответствующей определенному виду масла, то можно получить математическое описание процесса охлаждения для конкретных видов масла.

Для высокожирных сливок с массовой долей жира соответствующей ассортименту сливочного масла, уравнение для расчета удельной теплоемкости, можно представить в следующем виде [4]

$$c_{np} = A \cdot t_{np} + B, \quad (23)$$

где A и B – коэффициенты уравнения, зависящие от массовой доли жира.

Подставив уравнение (23) в (10), получим

$$Q_{xh}^* = (A \cdot t_{np}^{cp*} + B) \cdot Пр \cdot (t_{np}^H - t_{np}^*) + Q_{mex}^* + Q_{крисл}^* \quad (24)$$

После раскрытия скобок в уравнении (24) получим

$$Q_{xh}^* = Пр \cdot \left[\frac{A}{2} (t_{np}^{H^2} - t_{np}^{*2}) + B(t_{np}^H - t_{np}^*) \right] + Q_{mex}^* + Q_{крисл}^* \quad (25)$$

Для сливок с массовой долей жира, соответствующей ассортименту сливочного масла, уравнение (15) можно представить в следующем виде [4]

$$\alpha_1^* = 0,29 \sqrt{n \cdot z \cdot (C \cdot t_{np}^{cp*} + D)}, \quad (26)$$

где C и D – коэффициенты уравнения, зависящие от массовой доли жира.

С учетом уравнений (14), (25) и (26) математическое описание процесса охлаждения для частных случаев можно представить следующим образом

$$F^* = \frac{Пр \cdot \left[\frac{A}{2} (t_{np}^{H^2} - t_{np}^{*2}) + B(t_{np}^H - t_{np}^*) \right] + Q_{mex}^* + Q_{крисл}^*}{I} \cdot \Delta t^* \quad (27)$$

$$\frac{I}{0,29 \sqrt{n \cdot z \cdot (C \cdot t_{np}^{cp*} + D)} + 1,25 \cdot 10^{-4} + \frac{I}{(5923 \cdot P' + 471)}}$$

Уравнение (21) с учетом формулы (23) запишем в следующем виде

$$\Delta t_{min}^* = t_{ю}^* - \left(t_{xh}^H + \frac{Пр \left[(A \cdot t_{np}^{cp} + B) \cdot (t_{np}^H - t_{np}^K) - (A \cdot t_{np}^{cp*} + B) \cdot (t_{np}^H - t_{np}^*) \right] + Q_{mex}^{**} + Q_{крисл}^{**}}{c_{xh} \cdot P} \right) \quad (28)$$

После раскрытия скобок в уравнение (28) и получим

$$\Delta t_{min}^* = t_{np}^* - \left(t_{xh}^H + \frac{Пр \left[\frac{A}{2} (t_{np}^{*2} - t_{np}^{K^2}) + B(t_{np}^* - t_{np}^K) \right] + Q_{mex}^{**} + Q_{крисл}^{**}}{4200 \cdot P} \right) \quad (29)$$

Значения коэффициентов A , B , C и D , в зависимости от массовой доли жира в высокожирных сливках, представлены в таблице.

Таблица

Коэффициенты уравнений (26) ... (29)

| Массовая доля жира, % | Вид масла | Коэффициенты | | | |
|-----------------------|--------------|--------------|------|--------|--------|
| | | A | B | C | D |
| 82,5 | Вологодское | 6,655 | 2053 | 662,1 | 425988 |
| 78 | Любительское | 6,374 | 2155 | 658,36 | 476269 |
| 72,5 | Крестьянское | 6,031 | 2280 | 650,78 | 544162 |
| 70 | Российское | 5,875 | 2337 | 645,23 | 576882 |

Предлагаемый подход и полученные формулы позволяют дифференцировать расчет применительно к каждому продуктовому зазору охладителя и обеспечить тем самым более точный с практической точки зрения результат.

Литература

1. Маслов А. М. Аппараты для термообработки высоковязких жидкостей. Л.: Машиностроение, 1980. 208 с.
2. Кавецкий Г. Д., Васильев Б. В. Процессы и аппараты пищевой технологии. –М.: Колос, 2000. 551 с.
3. Юдаев Б. Н. Техническая термодинамика. Теплопередача: учеб. для неэнергетич. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1988. 479 с.
4. Малсугенов А. В. Исследование процесса охлаждения в пластинчатых маслообразователях с целью совершенствования их конструкции и технологических параметров работы: дис. ... канд. техн. наук. Ставрополь, 2009. 189 с.