УДК 66.065.32-977

А. Г. Шемпелев, Д. Ф. Крупин

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НАГРЕВАНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ ЦЕЛЬНОМОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ В УНИВЕРСАЛЬНОМ ЕМКОСТНОМ АППАРАТЕ

Целью данной статьи является выбор методики поверочного расчета универсальных емкостных аппаратов для получения расчетных зависимостей температуры продукта от времени его нагревания и охлаждения при заданных геометрических размерах аппарата. В работе представлены основные преимущества универсальных емкостных аппаратов для использования в технологическом процессе производства молочной продукции и приведены разработанные методики для нагревания и охлаждения молочной продукции в теплообменных аппаратах при заданных геометрических размерах аппарата и начальных температурах греющего или охлаждающего теплоносителя. Проведена верификация данной методики с результатами испытаний. Представленная методика позволяет определить скорость нагревания или охлаждения продукции и значение температуры продукта в любой определенный момент времени и может быть использована для разработки автоматизированного программного обеспечения технологических процессов с использованием универсальных емкостных аппаратов.

Ключевые слова: универсальный емкостной аппарат, тепловой расчет, методика расчета, молочная продукция.

В настоящее время при производстве цельномолочной продукции все более широкое распространение получают универсальные емкостные аппараты (УЕА). Данный тип аппаратов по сравнению с другими обладают рядом технологических и эксплуатационных преимуществ, к которым, в частности, относятся [1–3]:

– сниженная металлоемкость;

– повышенная технологичность изготовления;

– возможность унификации по конструктивно-технологическим признакам и сокращение номенклатуры емкостных аппаратов в результате унификации.

© Шемпелев А. Г., Крупин Д. Ф., 2017

– в зависимости от температуры, подаваемой в унифицированную рубашку воды, аппарат может использоваться как для нагрева продукта, так и для его охлаждения.

– возможность использования аппаратов на предприятиях малой мощности;

– возможность создания автоматизированных участков, способных гибко перестраиваться с выпуска одного продукта на другой.

Основой указанных преимуществ является конструкция УЕА с использованием особой теплообменной рубашки с анкерными связями [4], в которой, благодаря принудительному распределению теплоносителя тонким слоем по большой площади, интенсифицирован процесс теплообмена.

Одной из проблем при разработке и эксплуатации УЕА является отсутствие надежных методик прямого и поверочного теплового расчета, позволяющих проектировать аппараты разной производительности для нагревания и охлаждения различных продуктов в различных температурных режимах, определения времени нагревания и охлаждения продуктов, разработки программного обеспечения для автоматизации технологических процессов.

При разработке таких методик могут быть использованы основные уравнения, применяемые при расчете водонагревателей-аккумуляторов с водяным обогревом, приведенных в [5].

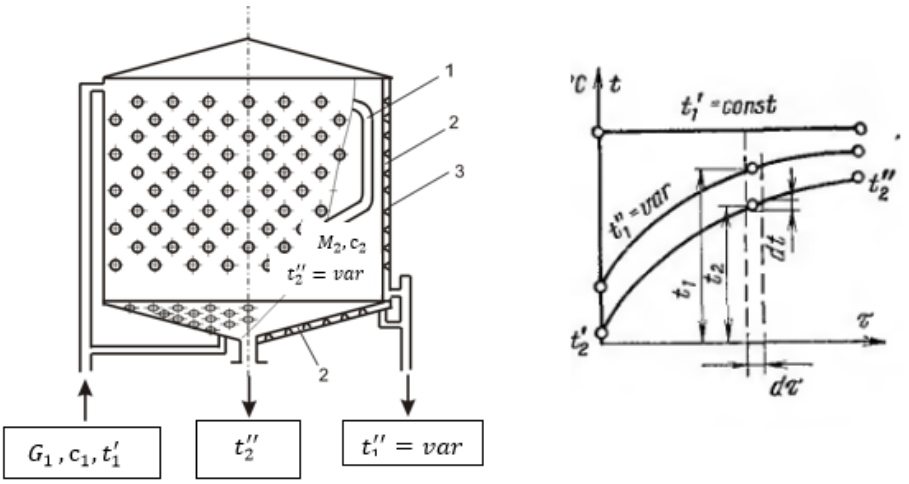

Рис. 1. Расчетная схема УЕА

1– мешалка; 2 – рубашка охлаждения; 3 – анкерные связи

Особенностью режима работы такого аппарата является то обстоятельство, что при постоянных расходе G_1 и температуре $t_1^{'}$ греющей (охлаждающей) воды температура ее на выходе из аппарата $t_1^{''}$ по мере нагревания воды в емкости увеличивается. Такой режим несколько усложняет расчет, так как необходимо использовать две переменные во времени: температуру t_1 и t_2.

В настоящей работе рассмотрена методика поверочного теплового расчета УЕА проводимого с целью получения расчетных зависимостей температуры определенного количества продукта от времени его нагревания и охлаждения при заданных геометрических размерах аппарата и начальных температурах греющего или охлаждающего теплоносителя.

Дифференциальные уравнения теплопередачи и теплового баланса в данном случае имеют вид:

$$dQ = kF\Delta t d\tau = G_1 c_1 (t_1' - t_1) dt = \mathrm{M}_2 \mathrm{c}_2 dt, \tag{1}$$

где $G_1 c_1$ и $\mathrm{M}_2 \mathrm{c}_2$ – полные теплоемкости теплоносителя и продукта;

Δt – средняя логарифмическая разность температур:

$$\Delta t = \frac{t_1^{'} - t_1}{\ln \frac{t_1^{'} - t_2}{t_1 - t_2}}; \tag{2}$$

Здесь t_1' – начальная температура теплоносителя;

t_1 и t_2 – температуры теплоносителя и продукта в рассматриваемый промежуток времени $d\tau$;

k – средний по поверхности коэффициент теплопередачи от горячего теплоносителя к продукту;

F – поверхность теплообмена.

Интегрированием уравнения (1) получена зависимость для определения удельной производительности аппарата

$$kF = G_1 c_1 ln \frac{1}{1 - \frac{\mathrm{M}_2 c_2}{G_1 c_1 \tau_2} ln \frac{t_1' - t_2'}{t_1' - t_2''}}, \tag{3}$$

где τ_2 – заданное время нагревания продукта.

t_2' и t_2'' – температуры продукта в начале и в конце нагрева.

Зная величину kF и величину коэффициента теплопередачи, определяемого по соответствующим формулам, в прямом тепловом расчете можно определить поверхность теплообмена.

Для определения коэффициента теплоотдачи от стенки к нагреваемой среде необходимо знать среднюю температуру последней. Она определяется приближенно по формуле:

$$t_{2cp} = t_1^{'} - \frac{t_2^{''} - t_2^{'}}{\ln \frac{t_1^{'} - t_2^{'}}{t_1^{'} - t_2^{''}}} \tag{4}$$

Среднюю температуру греющей среды на выходе находим по формуле:

$$t_{1cp}^{''} = t_{2cp} + (t_1^{'} - t_{2cp}) e^{-\frac{kF}{G_1 c_1}}. \tag{5}$$

Расчет нагревания продукта

Расчет нагревания продукта во времени определяется по зависимости, полученной из уравнения (3).

$$t_2 = t_1' - (t_1' - t_2') e^{-B}, \tag{6}$$

где

$$B = \frac{G_1 c_1}{M_2 c_2} \left(1 - \frac{1}{e^A}\right) \tau, \tag{7}$$

здесь

$$A = \frac{kF}{G_1 c_1} \tag{8}$$

Вычисляя значения t_2 для различных τ можно построить соответствующую зависимость. Для использования предложенной методики разработана программа для ЭВМ.

Расчет конечной температуры греющей воды во времени может быть осуществлен по зависимости:

$$t_1^{''} = \frac{t_1^{'} - t_2}{e^A} + t_2 \tag{9}$$

Расчет изменения расхода теплоты на нагрев продукта во времени при известных текущих значениях t_1' и t_1''

$$Q = G_1 c_1 \left(t_1^{'} - t_1^{''} \right) \tag{10}$$

Расчет охлаждения продукта

Проведенный обзор литературы показал, что наиболее целесообразно для расчета охлаждения в УЕА использовать соотношение

$$\tau \left(\frac{1 - A^{'}}{A^{'}} \right) = \frac{M \cdot c_{p1}}{G \cdot c_{p2}} \ln \frac{t_1^{'} - t_1^{''}}{t_1^{'} - t_2^{'}} = B^{'}, \tag{11}$$

где $A^{'}$ – характеристический параметр, определяемый по зависимости:

$$A^{'} = \frac{t_2^{'} - t_1^{''}}{t_2^{''} - t_1^{'}}, \tag{12}$$

где

τ – время, ч.

M – масса охлаждаемого продукта;

G – расход охлаждающей воды;

c_{p1} и c_{p2} – удельные массовые изобарные теплоемкости;

$t_1^{'}$ и $t_1^{''}$ - температуры молока в начале и конце охлаждения;

$t_2^{'}$ – температура охлаждающей воды на входе.

$t_2^{''}$ – температура охлаждающей воды на выходе в конце охлаждения.

Обозначив

$$B = B^{'} \frac{M \cdot c_{p1}}{G \cdot c_{p2}}, \tag{13}$$

После несложных преобразований получим:

$$\frac{t_1^{'} - t_2^{'}}{t_1^{'} - t_2^{''}} = e^{B}, \tag{14}$$

где

$$B = \tau \left(\frac{1 - A^{'}}{A^{'}} \right) \cdot \frac{G \cdot c_{p2}}{M \cdot c_{p1}}, \tag{15}$$

Отсюда зависимость температуры продукта при охлаждении от времени будет иметь вид:

$$t_1 = t_2^{'} + \left(t_1^{'} - t_2^{'}\right) \cdot e^{B}, \qquad (16)$$

На рисунке 2 представлены результаты расчетов нагрева и охлаждения молока в УЕА емкостью 1 м^3 при расчётных начальных температурах и расходах греющей и охлаждающей воды. На рисунке для сравнения показаны экспериментальные зависимости, полученные разработчиком аппарата и приведенные в [6]. Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей вызывает некоторые сомнения в корректности проведенных измерений или соблюдения расчетных режимов во временном диапазоне от 5 до 70 минут. Для проведения более достоверной верификации необходимо проведение дополнительных расчетов и экспериментов при нескольких уровнях расхода охлаждающей воды при нагревании и охлаждении и нагревании различных продуктов.

Таким образом, нами выбрана методика расчета нагревания и охлаждения цельномолочных продуктов, которая после уточнения позволит достаточно просто разработать программное обеспечение технологических процессов с использованием УЕА.

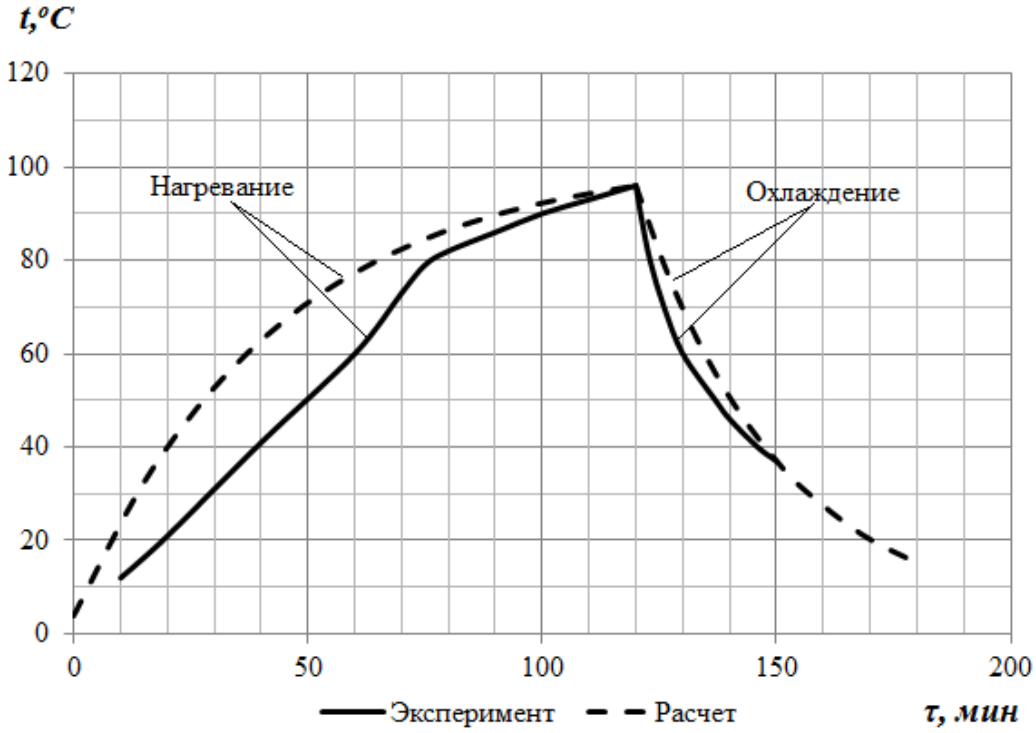

Рис. 2. Зависимость температуры молока от времени его нагревания и охлаждения в аппарате УЕА емкостью 1 м^3

Список литературы

1. *Русских В. М., Филинков А. С.* Применение универсальных емкостных аппаратов в новых организационно-технологических схемах // Молочная промышленность. – 2005. – № 3. – С. 55–57.

2. *Русских В. М., Филинков А. С.* Автоматизация получения продуктов в универсальных емкостных аппаратах // Рж 19Р-1. Химия и технология пищевых продуктов. – 2006. – № 14.

3. *Русских В. М., Филинков А. С.* Унификация емкостных аппаратов для молочной промышленности // Молочная промышленность. – 2004. – № 4. – С. 53–54.

4. Свидетельство на полезную модель 35953 РФ, МПК^7 A23C3/02, A23C3/04, A23L3/00. Универсальная емкость / В. М. Русских, А. С. Филинков (Россия). № 2003130866/13, заявл. 23.10.2003 // опубл. 20.02.2004.

5. *Лебедев П. Д.* Теплообменные, сушильные и холодильные установки. – М. : Энергия, 1972. – 320 с.

6. Производство и хранение молочных продуктов. – URL: http://www.mmrusskih.ru/proizvodstvo-i-hranenie-molochnyh-produktov-v-emkostnyh-apparatah/ (дата обращения 24.01.2017).

ШЕМПЕЛЕВ Александр Георгиевич – доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и гидравлики, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: agshem@mail.ru

КРУПИН Дмитрий Федорович – старший преподаватель кафедры теплотехники и гидравлики, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: kdf90@mail.ru