

УДК66.045.2(045)

Аспирант К.А. Рашкин, профессор С.А. Бредихин,
(Московский гос. ун-т пищевых произ-в) кафедра процессов и аппаратов,
тел. 8-926-152-70-88

доцент В.М. Чесноков
(Московский гос. ун-т пищевых произ-в) кафедра высшей математики,
тел. (495) 676-48-13

Тепловая обработка вязких продуктов в пластинчатом скребковом аппарате

Проанализировано использование различных типов теплообменных аппаратов в зависимости от технологий производства. Приведен анализ областей применимости теплообменных аппаратов в зависимости от вязкости перерабатываемого продукта. Поставлена задача по аналитическому определению необходимой площади поверхности теплообмена с применением дифференциальных уравнений теплопереноса в движущихся жидких средах, записанных в цилиндрической системе координат при осесимметричном распределении температуры, без учета диссипации энергии.

The current work analyzes the use of different types of heat exchangers, depending on the technology of production. It is taken the detail analysis of the ways of applicability of various types of heat exchangers, depending on the viscosity of the processed product. It is posed the problem of the analytical determination of the required area of heat exchange with the use of differential equations of heat transfer in a moving liquid media, written in cylindrical coordinates, for symmetrical temperature distribution, without taking in account the energy dissipation.

Ключевые слова: теплообмен, высоковязкие продукты, скребковые теплообменники.

Скребковые аппараты широко применяются в пищевой промышленности для тепловой обработки (нагрева, охлаждения) вязких продуктов. Они относятся к группе поверхностных теплообменников. Особенности конструкции поверхности теплообмена определяются свойствами продукта, гидродинамическими условиями в продуктовой зоне аппарата, свойствами конструкционных материалов и др. В зависимости от конструкции поверхности теплопередачи используются в основном роторные и пластинчатые аппараты.

Скребковые теплообменники на базе конструктивных элементов маслообразователей Я7-ОМ-3-ТМ и РЗ-ОУА-М) используются для термообработки многих вязких продуктов, таких, как сгущенное молоко, кетчупы, майонезы, соусы и пр. [1] (рис. 1). Они характеризуются полуразборными конструкциями, в которых к теплообменным поверхностям, соприкасающимся с продуктом, возможен доступ для их ручной чистки и мойки, а каналы, по которым двигаются хладо-, теплоносители, неразборные и герметичные.

© Рашкин К.А., Бредихин С.А., Чесноков В.М., 2012

В настоящее время в промышленности используются одно- и многосекционные скребковые теплообменники, в которых в одном аппарате последовательно и взаимосвязано проводится комплекс теплообменных процессов, например, нагрев и охлаждение в поточных линиях производства пастеризованных соусов.

Маслообразователь Я7-ОМ-3Т-М выполнен на базе цилиндрических скребковых теплообменников с вытеснительными барабанами. Основным достоинством цилиндрических скребковых аппаратов является возможность их работы с большими давлениями. Благодаря этому достоинству данные теплообменники широко применяются в качестве переохладителей жировой эмульсии в производстве маргарина. Из недостатков данной конструкции отмечают ее громоздкость и большую массу.

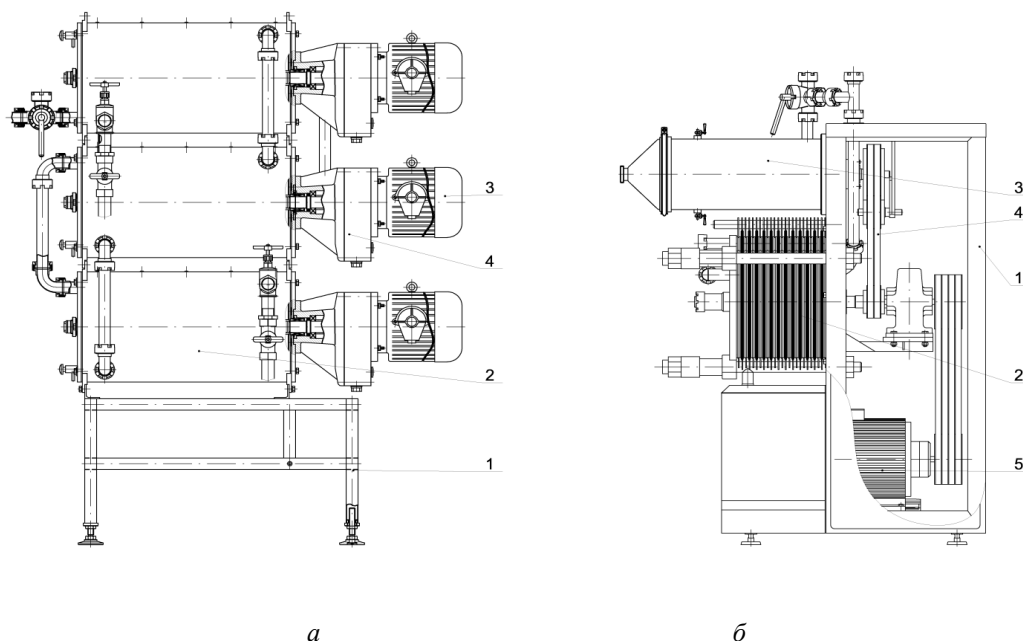


Рис. 1. Схема маслообразователей: а - Я7-ОМ-3Т-М: 1 – рама; 2 – теплообменник; 3 – электродвигатель; 4 - редуктор; б - РЗ-ОУА-М: 1 - рама; 2 – теплообменник; 3 – обработчик; 4 – привод; 5 - электродвигатель

Пластинчатые скребковые аппараты на базе маслообразователей РЗ-ОУА-2М работают при значительно меньших давлениях, чем барабанные. Благодаря своей компактности они нашли широкое применение в технологических процессах производства вязких продуктов. Основным элементом аппарата являются теплообменные пластины. Они свариваются из двух круглых штампованных дисков (полупластин), таким образом, что полости между ними образуют каналы, в которые подаются холодо- или теплоносители. На рис. 2 представлен вариант компоновки пластин и схема течения холодо-, теплоносителя в скребковом теплообменном аппарате.

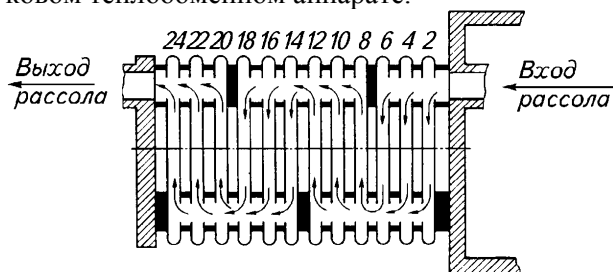


Рис. 2. Схема течения холодо-, теплоносителя в скребковом пластинчатом аппарате

Перпендикулярно оси расположен вал с мешалками различной формы. Мешалки могут быть расположены на крестообразных лопастях и круглых пластинах.

Конструкцию из двух соосных сварных теплообменных пластин (рис. 3) вместе с лопастным ножом-мешалкой называют *теплопередающим элементом*. Внутри теплопередающего элемента поток принудительно закручивается с помощью вращающихся лопастей ножа-мешалки, захватывающих практически все пространство между дисками.

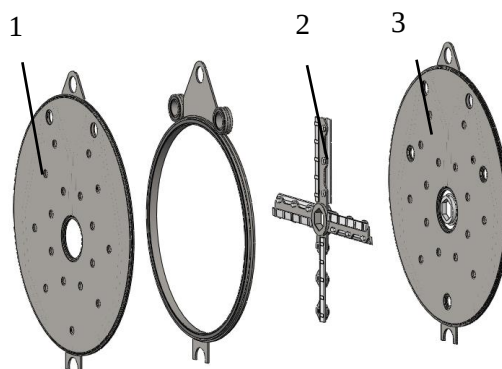


Рис. 3. Основные конструктивные элементы пластинчатого скребкового теплообменника: 1 – сварная теплообменная пластина; 2 – уплотнительное кольцо; 3 – нож-мешалка

Продукт поступает в пространство между пластинами как из центрального отверстия, так и из отверстий, расположенных на периферии дисков (рис. 4). При этом лопасти

могут вращаться, как по отношению к неподвижным дискам, так и совместно с одним из дисков по отношению к другому неподвижному диску.

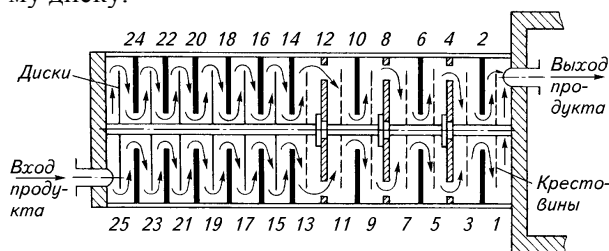


Рис. 4. Схема движения продукта в аппарате

Температура продукта является важным технологическим параметром, определяющим работу аппарата при обработке высоковязких продуктов, например, сливочного масла, соусов, майонезов и других продуктов. Более того, фазовые переходы при тепловой обработке приводят к изменению физико-химических свойств и структуры высоковязких пищевых продуктов. Эти изменения усложняют аналитические исследования переноса теплоты в продукте при его обработке в скребковых аппаратах.

Полидисперсность пищевого сырья и полуфабрикатов приводит к фазовым переходам компонентов внутри одной среды в различных температурных интервалах. Например,

при производстве сливочного масла сначала происходит кристаллизация тугоплавких триглицеридов, а затем легкоплавких жиров. При этом вода между жировыми шариками находится в жидком состоянии.

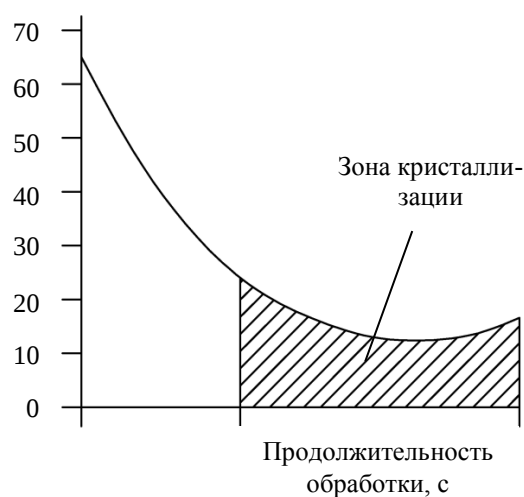
Поэтому предлагается рассматривать тепловую обработку высоковязких пищевых продуктов, осложненную фазовыми переходами, состоящую из трех зон.

Первая зона, где продукт имеет относительно низкую вязкость и ярко выраженные свойства ньютоновской жидкости, можно рассматривать с точки зрения классической теории теплообмена с поправкой на сложность движения сред.

Вторая зона – зона фазового перехода, которая не имеет ярко выраженных границ и зависит от многих параметров и в некоторых случаях сезонна.

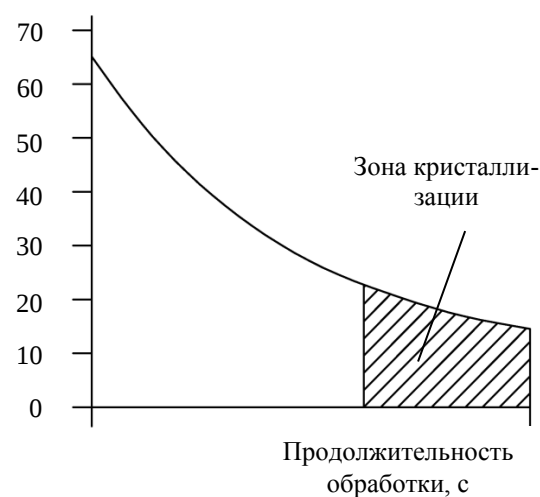
Третья зона, где продукт имеет высокую вязкость и сложные реологические свойства. Для высоковязких полидисперсных пищевых продуктов зоны 2 и 3 можно рассматривать как единую. Это видно из рис. 5 [данные ВНИИМС], показывающего изменение температуры сливочного масла в зависимости от продолжительности его обработки в разные сезоны года. В связи с этим аналитическое исследование второго и третьего участка вызывает особые трудности.

Температура, °C



а

Температура, °C



б

Рис. 5. Зависимость температуры сливок от продолжительности их обработки в маслообразователе: а - в зимний период; б - в летний период

Цель исследования – определение температуры продукта на выходе из теплообменного аппарата. В связи со сложностью анализа изменения температуры, необходимо определять температуру продукта на выходе из каждого теплообменного элемента аппарата.

Течение высоковязких продуктов внутри охлаждающего элемента при его постоянном охлаждении рассматривается как неизотермическое и стационарное. Динамическая вязкость в диапазоне температур $t = 40 \dots 70$ °С для высокожирных сливок (МДЖ 50-85 %) лежит в интервале $\mu = 0,005 \dots 0,5 \frac{\text{г} \cdot \text{с}}{\text{см}^2}$. В заданном интервале температур и вязкостей продукт рассматривается как среда с ньютоновскими свойствами, т.е. теплообменник работает в 1-й зоне.

Машинно-аппаратурное оформление технологических процессов напрямую зависит от свойств перерабатываемого сырья. Большой ассортимент выпускаемой продукции обуславливает применение широкого спектра технологического оборудования с различными технико-экономическими показателями. Они особенно важны в условиях рыночной экономики и являются одним из основных факторов конкурентной борьбы.

В настоящее время различными отраслями пищевого производства выпускается множество видов продукции с функциональными свойствами, в технологиях производства которых предусматривается использование широкой номенклатуры загустителей и стабилизаторов. Физико-механические свойства сырья и полуфабрикатов пищевой промышленности также варьируются в значительном диапазоне величин не только между отраслями, но и внутри отраслей в зависимости, например, от времени года.

Вопросы эффективности теплопередачи не теряют своей актуальности несмотря на широкий спектр предлагаемого на рынке теплообменного оборудования. С одной стороны, необходимо добиться минимально возможной площади поверхности теплообмена не превышая заданных потерь напора в теплообменнике. С другой стороны, площадь поверхности теплообмена является функцией многих величин таких как скорость, искусственная

турбулизация потока, вязкость и структура среды, которые важно учитывать при моделировании процесса, что является противоречивой задачей.

Одним из важнейших параметров, характеризующих режим течения жидкости, является критерий Рейнольдса (Re). Для повышения эффективности теплообмена необходимо увеличивать Re, тем самым изменяя режим течения продукта с ламинарного на турбулентный. Одним из параметров, влияющих на степень турбулентности, является скорость потока, а также вязкость продукта, которая имеет значительную зависимость от температуры. Так, с увеличением скоростей движения сред увеличивается степень турбулизации потока и, как следствие, увеличивается перемешивание и уменьшается необходимая площадь поверхности теплообмена, при этом увеличиваются потери напора сред в теплообменнике.

Влияние же вязкости и её зависимость от температуры можно проследить на вновь проектируемом и эксплуатируемом оборудовании. Так, при прочих равных условиях теплообменные аппараты с одинаковой тепловой мощностью, но работающие в разных температурных диапазонах, могут различаться до 2 и более раз по площади теплообмена. Причина такой разницы заключается в вязкости продукта в этих диапазонах. Например, кинематическая вязкость молока, применяемая для расчётов оборудования, составляет $1,77 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при 20 °С и $0,71 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при 60 °С [2], что вносит значительные коррективы в расчёт всех теплообменных аппаратов. Также в зависимости от скорости и вязкости среды в трубопроводе будут разными и потери напора в этих теплообменниках.

На рис. 6 приведены зависимости коэффициента кинематической вязкости от температуры для различных пищевых продуктов. Цифрами отмечены зоны наиболее эффективного использования теплообменных аппаратов: 1 – скребковых (пластинчатого и барабанного типов), 2 – пластинчатых, 3 – трубчатых. Как видно из рис. 6, вязкость пищевых продуктов обычно выглядит в виде экспоненциальной функции, значения которой возрастают в области низких температур.

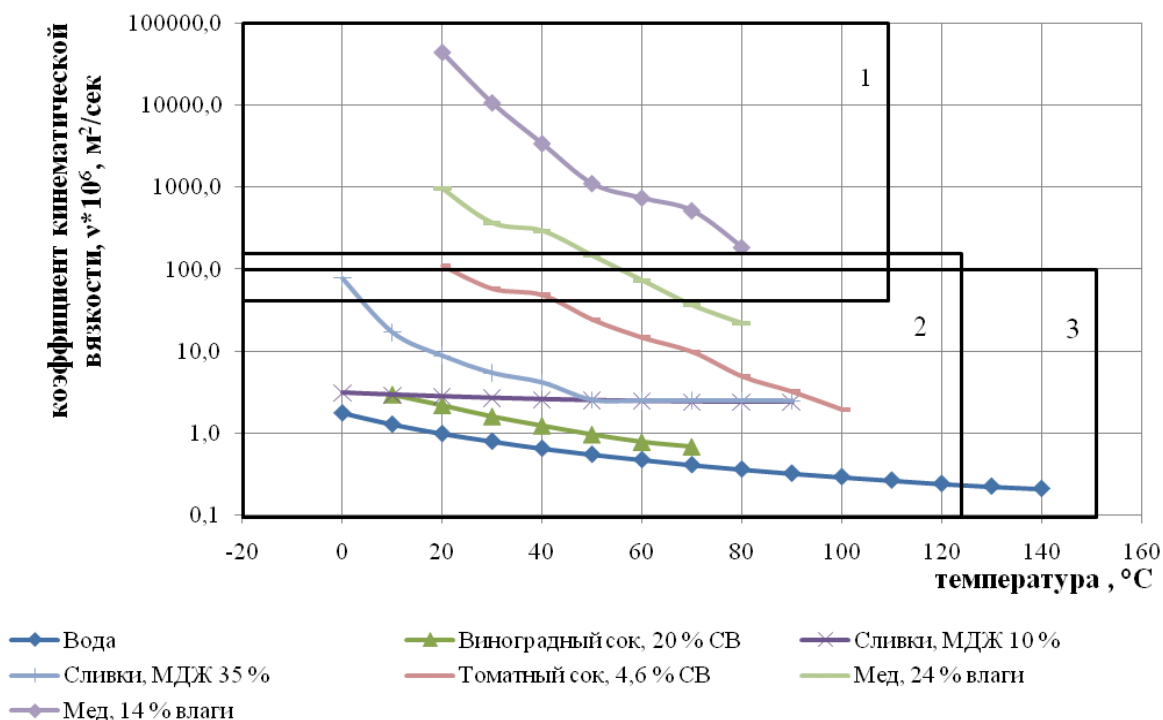


Рис. 6. Зависимость коэффициента кинематической вязкости продуктов от температуры (МДЖ - массовая доля жира, СВ - сухие вещества)

Поэтому на практике часто применяется комбинирование нескольких типов теплообменных аппаратов, например, скребкового и трубчатого или скребкового и пластинчатого. В таких случаях скребковый теплообменник работает в зоне температур, где у продукта более высокая вязкость и отвод или подвод тепла с применением других видов теплообменников затруднен. В зоне высоких температур, где вязкость продукта падает, для термообработки достаточно использовать пластинчатые или трубчатые теплообменники.

Температура является основным параметром термообработки пищевых продуктов, и ее изменение определяет механизм и закономерности технологического процесса.

Течение обрабатываемого продукта внутри теплообменного элемента имеет сложную траекторию (см. рис. 4). Поэтому будем изучать распределение температуры продукта в охлаждающем элементе с помощью дифференциальных уравнений теплопереноса в движущихся жидких средах, записанных в цилиндрической системе координат при осесимметричном распределении температуры, без учета диссипации энергии

$$v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где T – температура в точках продукта; °C, r и z – цилиндрические координаты точки продукта; v_r и v_z – проекции скорости точек продукта на оси r и z ; a – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Полагаем, что осевая скорость продукта v_z значительно меньше радиальной v_r и окружной v_ϕ скоростей, поэтому в уравнении

(1) положим $v_z \frac{\partial T}{\partial z} \approx 0$. Для определения радиальной скорости воспользуемся дифференциальным уравнением стационарного осесимметричного течения несжимаемой вязкой жидкости, полагая в нем коэффициент вязкости μ и плотность продукта ρ не зависящими от температуры для данной пары дисков (охлаждающего элемента)

$$-\frac{v_\phi^2}{r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = v \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{v_r}{r^2} \right), \quad (2)$$

где p – давление в точках продукта, Па; v – коэффициент кинематической вязкости продукта, м²/с, равный

$$v = \frac{\mu}{\rho}. \quad (3)$$

Учитывая принудительное вращение продукта, примем, что его угловая скорость

равна угловой скорости ω вращения лопастей, т. е.

$$v_{\varphi} \approx \omega r.$$

В силу этого два слагаемых в левой части уравнения (2) можно представить в следующем виде:

$$-\frac{v_{\varphi}^2}{r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r}, \quad (4)$$

где P - модифицированное давление, Па.

Модифицированное давление представляет разность между истинным давлением продукта и давлением, которое было бы в нем только при его вращении с угловой скоростью [3]. Оно равно

$$P = p - \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2.$$

При условии постоянства расхода продукта через любое цилиндрическое сечение пространства между пластинами теплопередающего элемента будем искать решение уравнения (2) в виде

$$v_r = \frac{1}{r} f(z). \quad (5)$$

Подстановка выражений (4) и (5) в (2) с учетом (3) дает

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{1}{r} f''(z), \quad (6)$$

где двумя штрихами обозначена вторая производная по координате z .

Чтобы дифференциальное уравнение (6) имело решение нужно

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{1}{r} \psi(z). \quad (7)$$

Интегрируя левую и правую части равенства (7) по координате r , получим для модифицированного давления выражение

$$P = (\mu \ln r) \psi(z) + \xi(z).$$

Для определения произвольных функций $\psi(z)$ и $\xi(z)$ воспользуемся граничными условиями

$$r = R_1, \quad P = P_1;$$

$$r = R_2, \quad P = P_2,$$

где P_1 - модифицированное давление на входе продукта в междудисковое пространство; P_2 - модифицированное давление на выходе продукта. Эти давления равны

$$P_1 = p_1 - \frac{1}{2} \rho \omega^2 R_1^2,$$

$$P_2 = p_2 - \frac{1}{2} \rho \omega^2 R_2^2,$$

где p_1 и p_2 - истинные давления продукта во входном и выходном сечениях.

Решение поставленной задачи позволит определить распределение температуры продукта в продуктовой зоне теплообменного аппарата, что даст возможность оценить эффективность теплообмена в соответствующем оборудовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Переработка молока [Текст] // Отраслевые ведомости. - 2011. - № 8. - С. 24-28.
2. Чубик, И.А. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов. [Текст] / И.А. Чубик, А.М. Маслов. - М.: Пищевая промышленность, 1970. - 184 с.
3. Бэтчелор, Д. Введение в динамику жидкости [Текст] / Д. Бэтчелор. - М.: Мир, 1973. - 560 с.