

УДК 637.523:664.315

Анализ теплообмена скребковых охладителей для пищевых производств

Д-р техн. наук, проф. Б.А. РОГОВ

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий

Analysis of the exchange process for scraped-surface coolers is described. A methodological approach to the solution of engineering problems on the determination of heat transfer coefficients for cooling of the fat-containing emulsions in scraped surface coolers is given.

Во многих отраслях пищевой промышленности широкое распространение получили цилиндрические скребковые теплообменники непрерывного действия. Они используются для переработки и производства таких продуктов, как масло сливочное и кулинарное, жиры животного и растительного происхождения и их смеси, концентраты сливок, мясные соки и соусы, смеси мороженого, маргарины и другие виды пищевых продуктов. Эти виды оборудования успешно применяются в процессах термообработки при производстве рубленой говядины и свинины, куриного и птичьего мяса, а также томатной пасты, шоколада, фармацевтических кремов, воска и пр.

Варианты применения теплообменников с очищаемой поверхностью связаны, как правило, с совмещением процессов интенсивного нагрева или охлаждения (переохлаждения), перемешивания, гомогенизации, кристаллизации перерабатываемого сырья.

В пищевых технологиях используется скребковое оборудование цилиндрического, пластинчатого и шнекового типа. Наиболее широко применяются цилиндрические теплообменники. Они представляют собой устройства типа «труба в трубе» со скребковой (ножевой) мешалкой и различаются по конструктивным параметрам цилиндров (длина и диаметр), количеству цилиндров, мешалок и скребков у мешалок.

Устанавливают теплообменники преимущественно с горизонтальным расположением цилиндров в горизонтальной или вертикальной плоскостях.

В промышленных типах отечественных технологических линий при переработке высокожирных сливок в сливочное масло используются, как правило, маслообразователи цилиндрического и пластинчатого вида со скребковыми мешалками. Это цилиндрический маслообразователь марки ТОМ и его модификации (ТОМ-Л, ТОМ-2М, Т1-ОМ-2Т).

На линиях вытапливания жира из мягкого жирового сырья его охлаждают в трехцилиндровом охладителе марки ФОЖ (ФОЖ-Нева, Д5-ФОП). Охладители животных жиров по принципу действия подоб-

ны цилиндрическим маслообразователям ТОМ.

Современные типы скребковых теплообменников имеют общее международное обозначение – SSHE (Scraped-surface heat exchanger).

У зарубежных фирм подобный скребковый теплообменник носит принятые фирмами названия: «Votator», «Chemetator» (Англия), «Perfektor», «Kombinator» (Германия), «Rota-Pro» (США), «Thermutator» (США), «Consistator» (Дания), «Contherm» (Швеция), «Rototherm» (Италия) и др. Процесс теплоотдачи в этих агрегатах протекает в условиях интенсивного охлаждения и перемешивания продукта мешалками скребкового типа.

При исследовании процесса теплообмена в скребковых теплообменниках-охладителях изучали закономерности изменения основных параметров и режимов работы оборудования с учетом влияния теплофизических свойств перерабатываемого продукта.

Скребок мешалки при перемешивании жировых и жиродержащих, высоковязких жидкостей обеспечивают высокую интенсивность теплообмена в условиях частичной кристаллизации и прилипания, создают условия для интенсификации процессов гомогенизации дисперсной системы. Этому способствует отсутствие зазора между стенкой цилиндра и скребком (или скребками) мешалки. При вращении скребка происходит удаление охлаждаемых или нагреваемых слоев пограничного слоя с поверхности теплообмена цилиндра и поступление новой массы жидкости к стенке цилиндра. Такой теплоперенос описывается уравнением нестационарной теплопроводности [2]:

$$\frac{\delta t}{\delta \tau} = a \frac{\delta^2 t}{\delta y^2} \quad (1)$$

с граничными условиями:

$$t = t_{\text{ст}} \text{ при } y = 0 \text{ и } \tau > 0,$$

$$t = t_0 \text{ при } y > 0 \text{ и } \tau = 0,$$

где y – расстояние от стенки;

t – температура процесса;

t_0 , $t_{\text{ст}}$ – температура жидкости в ядре потока и у стенки соответственно;

τ – время;

α – коэффициент температуропроводности.

Решение уравнения (1) с граничными условиями может быть представлено так:

$$\alpha = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\lambda \rho c_{уд}}{\tau_{cp}}}, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

τ_{cp} – среднее время контакта элемента продукта с поверхностью теплообмена, с;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$c_{уд}$ – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

ρ – плотность, кг/м³.

Величина τ_{cp} представляет собой промежуток времени между двумя последовательными прохождениями скребков через данную точку поверхности:

$$\tau_{cp} = 1/(z_n n), \quad (3)$$

где n – частота вращения скребков, с⁻¹;

z_n – количество скребков, шт.

Тогда

$$\alpha = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\rho c_{уд} \lambda n z}. \quad (4)$$

Тепловой поток Q , передаваемый через стенку аппарата со скребковой мешалкой,

$$Q = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\rho c_{уд} \lambda n z} F(t_0 - t_{cr}), \quad (5)$$

где F – поверхность теплообмена.

Таким образом, анализ процесса теплообмена в агрегатах со скребковыми мешалками показал, что коэффициент теплоотдачи зависит от следующих параметров:

$$\alpha = f(\lambda, c_{уд}, \rho, n, z). \quad (6)$$

В результате решения уравнения стационарной теплопроводности Фурье для описания конвективного переноса тепла в процессах нагрева (охлаждения) высоковязких жидкостей для скребковых теплообменников получены уравнение подобия для расчета теплоотдачи от очищаемой скребками поверхности:

$$Nu = 1,13 Re^{0,5} Pr^{0,5} \quad (7)$$

и расчет теплоотдачи от очищаемой скребками поверхности вида:

$$\alpha = A(\lambda, c_{уд}, \rho, n, z)^{0,5}, \quad (8)$$

где Nu , Re , Pr – соответственно критерии Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля;

A – коэффициент пропорциональности (равен 1,13).

Реальные значения коэффициента теплоотдачи в скребковых агрегатах отличаются от теоретических значений. В каждом конкретном случае требуется введение поправочных коэффициентов.

Основное отличие конкретного вида уравнения теплообмена (8) состоит в численном определении поправочного коэффициента f по отношению к коэффициенту пропорциональности A , который зависит от усло-

вий использования и типа оборудования (для нагрева или охлаждения, вида теплообменника, характеристик сырья), т.е.

$$\alpha = A(\lambda c_{уд} \rho n z)^{0,5} f, \quad (9)$$

где f – поправочный коэффициент.

Таким образом, введенная поправка, как показывают экспериментальные данные, отражает влияние производительности агрегата, частоты вращения скребковой мешалки, вязкости рабочей среды, числа скребков и размеров кольцевого канала. Значение поправочного коэффициента может быть определено по эмпирической формуле вида [3]:

$$f = \Delta T \cdot 10^{-2}, \quad (10)$$

где $\Delta T = t_n - t_k$;

t_n и t_k – температуры начала и окончания процесса термообработки.

При возрастании вязкостных свойств рабочего вещества и уменьшении производительности исследуемого агрегата отмечается тенденция снижения поправочного коэффициента.

Экспериментальное подтверждение для выбора поправочного коэффициента было также получено при переохлаждении эмульсий (40 – 82 % жирности) для установившегося состояния процесса теплоотдачи в теплообменниках различной производительности.

Анализ процесса теплообмена в цилиндрических скребковых теплообменниках показал [3], что для расчета коэффициента теплоотдачи при охлаждении молочно-жировых и жироводных эмульсий (60 – 82 % жирности) может быть использована зависимость (при значении $f = 0,3$) вида

$$\alpha = 0,34(\lambda c_{уд} \rho n z)^{0,5}. \quad (11)$$

Для промышленных агрегатов с частотой вращения скребков 8,5 – 12 с⁻¹ значение поправочного коэффициента может доходить до 0,35 – 0,40.

Предложен расчет процесса теплообмена при охлаждении высокожирных сливок в пластинчатом теплообменнике со скребками с учетом поправочного коэффициента [2]:

$$\alpha = 0,29 \sqrt{\lambda c_{уд} \rho n z}. \quad (12)$$

Обобщенный результат экспериментальных данных по процессам теплообмена оборудования со скребковыми мешалками показал [1], что приближенно коэффициенты теплоотдачи можно рассчитать по уравнению

$$\alpha = 0,4 \sqrt{\lambda c_{уд} \rho n z}. \quad (13)$$

Список литературы

1. Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барабаш В.М. Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета. – Л.: Химия, 1984.
2. Маслов А.М. Аппараты для термообработки высоковязких жидкостей. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1980.
3. Рогов Б.А. Теплообмен при перемешивании в скребковых переохладителях для жировых продуктов /Процессы, аппараты и машины пищевой технологии: Межвузовский сборник научных трудов.– СПб: СПбГУАХПТ, 1999.