

Тепляков М. М., Ильина С. А.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В КОЖУХОТРУБНОМ АППАРАТЕ ДЛЯ ПЕРВИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МОЛОКА

*Работа выполнена под руководством к.т.н., доц. Ковергина А. Д.
и к.т.н., ст. преп. Галкина П. А.*

*ГГТУ, Кафедра «Технология машиностроения,
металлорежущие станки и инструменты»*

Молоко теряет свои ценные питательные свойства в течение первых двух-трёх часов после доения. Наиболее полное сохранение этих свойств обеспечивается охлаждением до двух градусов по шкале Цельсия [1]. На животноводческих фермах в молочных линиях для охлаждения применяются пластинчатые аппараты. Однако пластинчатые аппараты [2] имеют целый ряд недостатков, которые связаны с наличием в конструкции большого количества прокладок. Отмечаются частые отказы в работе из-за нарушения герметичности. Отсюда значительные затраты на разборку и сборку аппарата.

Кожухотрубные аппараты лишены указанных недостатков. Эксплуатационные затраты на чистку значительно уменьшаются. Расчётные теплогидравлические показатели аппарата должны обеспечивать его надёжную работу в течении 1...2 часов после доения молока. Однако процесс связан, в первую очередь, с точностью определения теплофизических свойств теплоносителей. Точность критериальных уравнений, которые лежат в основе всех теплогидравлических расчётов, находится в пределах разброса экспериментальных данных. На процессы теплообмена также существенное влияние оказывают пограничные слои отложений на стенках молокопровода.

На этапе проектирования необходимо иметь количественные соотношения между параметрами охладителя молока по всему объёму аппарата. Такие соотношения можно получить используя методы математической теории теплообменников [3]. Воспользуемся (рис. 1) цилиндрической системой координат (θ, r, z) и предположим, что рабочая среда изотропна и непрерывна по направлениям координат. Тогда можно составить уравнения энергии для определения температурных полей в теплоносителях и металле. Так, для молока получим

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 \cdot T_1) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta}(\varepsilon_1 \cdot \rho_1 \cdot v_1 \cdot r \cdot c_1 \cdot T_1) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(\varepsilon_1 \cdot \rho_1 \cdot u_1 \cdot r \cdot c_1 \cdot T_1) =$$

$$= \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\varepsilon_1 \cdot \Lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\varepsilon_1 \cdot \Lambda_1 \cdot r \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_1 \cdot \Lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial z} \right) + q_{m \rightarrow 1} \quad (1)$$

где c_1 - удельная теплоёмкость молока при постоянном движении; Λ_1 - эффективная теплопроводность молока, учитывая турбулентный перенос теплоты; $q_{m \rightarrow 1}$ - интенсивность передачи теплоты (на единицу объёма пространства теплообменника) от металла к молоку; v_1 , u_1 - скорости молока в направлении θ и r соответственно; ρ_1 , T_1 , ε_1 - плотность, температура и доля объёмного пространства молока соответственно; t - время.

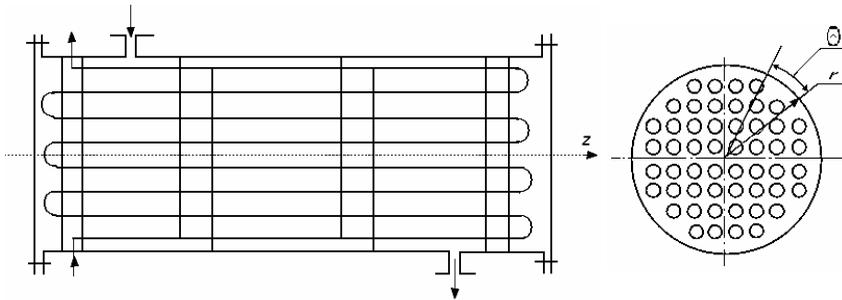


Рис. 1. Схема типовой конструкции кожухотрубного аппарата

При составлении уравнения (1) были опущены из-за малой значимости следующие члены: ε_1 , $\partial \rho / \partial t$, характеризующие влияние изменений давления на температуру; учитывающие кинетическую энергию движения и влияния вязкой диссипации энергии, химические превращения в молоке, фазовые переходы.

Уравнение энергии для хладоносителя, текущего в межтрубном пространстве, записываем по аналогии с (1), используя индекс 2.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2 \cdot T_2) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} (\varepsilon_2 \cdot \rho_2 \cdot v_2 \cdot r \cdot c_2 \cdot T_2) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (\varepsilon_2 \cdot \rho_2 \cdot u_2 \cdot r \cdot c_2 \cdot T_2) = \\ & = \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon_2 \cdot \rho_2 \cdot \omega_2 \cdot c_2 \cdot T_2) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\varepsilon_2 \cdot \Lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\varepsilon_2 \cdot \Lambda_2 \cdot r \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial t} \left(\varepsilon_2 \cdot \Lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial z} \right) + q_{m \rightarrow 2} \end{aligned} \quad (2)$$

где $q_{m \rightarrow 2}$ - интенсивность теплоотдачи на единицу объёма охладителя от металлической стенки к хладоносителю.

Уравнение энергии для металла в пучке труб упрощается, т.к. трубы

неподвижны, и имеет следующий вид при использовании индекса m .

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_m \cdot \rho_m \cdot c_m \cdot T_m) &= \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\varepsilon_m \cdot \Lambda_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\varepsilon_m \cdot \Lambda_m \cdot r \cdot \frac{\partial T_m}{\partial r} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_m \cdot \Lambda_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) - q_{m \rightarrow 1} - q_{m \rightarrow 2}, \end{aligned} \quad (3)$$

здесь Λ_m – эффективная теплопроводность металла.

Пренебрегая величинами теплопроводности в металле и теплоносителях получим из (1), (2) и (3) следующие уравнения

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_m \cdot \rho_m \cdot c_m \cdot T_m) = -q_{m \rightarrow 1} - q_{m \rightarrow 2} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 \cdot T_1) &+ \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} (\varepsilon_1 \cdot \rho_1 \cdot \nu_1 \cdot r \cdot c_1 \cdot T_1) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (\varepsilon_1 \cdot \rho_1 \cdot u_1 \cdot r \cdot c_1 \cdot T_1) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon_1 \cdot \rho_1 \cdot \omega_1 \cdot T_1) = q_{m \rightarrow 1} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2 \cdot T_2) &+ \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} (\varepsilon_2 \cdot \rho_2 \cdot \nu_2 \cdot r \cdot c_2 \cdot T_2) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (\varepsilon_2 \cdot \rho_2 \cdot u_2 \cdot r \cdot c_2 \cdot T_2) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon_2 \cdot \rho_2 \cdot \omega_2 \cdot T_2) = q_{m \rightarrow 2} \end{aligned} \quad (6)$$

В уравнениях (5) и (6) возможны поправки, связанные с перемешиванием молока и хладоносителя. Например, если известно, что хладоноситель полностью перемешан в направлении координаты z , то следует брать повышение значения Λ_2 в членах с $\partial/\partial\theta$ и $\partial/\partial r$ и принимать $\Lambda_2=0$ в члене с $\partial/\partial z$.

Уравнения (1)...(6) применимы для расчёта охладителя молока, который имеет перекрестное течение теплоносителей. Для этого достаточно использовать двумерное описание, а именно, изменениями параметров по координате θ пренебрежём и примем, что молоко течёт только по направлению координаты r , а хладоноситель – в направлении z . При этом перемешивание происходит в направлениях, перпендикулярных направлению течения. Тогда уравнения для температур теплоносителей T_1 и T_2 принимают вид

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (\varepsilon_1 \cdot \rho_1 \cdot v_1 \cdot r \cdot c_1 \cdot T_1) = \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon_1 \cdot \Lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial z}) + \frac{T_2 - T_1}{1/U_1 + 1/U_2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon_2 \cdot \rho_2 \cdot \omega_2 \cdot c_2 \cdot T_2) = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (\varepsilon_2 \cdot \Lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r}) + \frac{T_1 - T_2}{1/U_1 + 1/U_2} \quad (8)$$

Величины $\varepsilon_1 \cdot \rho_1 \cdot v_1 \cdot c_1$, $\varepsilon_2 \cdot \rho_2 \cdot \omega_2 \cdot c_2$ и $1/U_1 + 1/U_2$ можно рассматривать как постоянные. Тогда уравнения (7) и (8) упрощаются, их решение осуществляется численными методами.

Точность решения этих уравнений зависит от граничных условий. Обычно задают величины скоростей и температур на входе. Все компоненты скоростей на границах со стенкой принимаются равными нулю. Градиенты температуры по нормали к поверхности кожуха на самой поверхности считаются в виде произведения некоторой постоянной на разность температур между кожухом и окружающей средой.

Необходимо отметить, что уравнения получены для однофазных сред, одна из которых перемешивается при теплообмене [3]. Их решение осуществляется численными методами, которые частично используются при создании реальных конструкций аппаратов. При проектировании предлагаемого теплообменника эти решения должны учитывать следующие особенности:

1. Усреднение теплофизических показателей производится не только для продольного, но и для поперечно-перекрестного течения потока в трубах змеевика;

2. Определение граничных условий зависит от:

- расстояний между сегментными перегородками, отличающимися от нормативных;
- отложений молока на внутренних поверхностях трубопровода при изменившихся условиях их мойки и очистки;
- распределенных и добавившихся сосредоточенных сопротивлений для потока молока в трубопроводе;
- возросшего влияния потока перетечек в межтрубном пространстве аппарата.

Работа по включению вышеназванных факторов в расчетные зависимости, несомненно, должна выполняться на основе экспериментальных исследований. Ряд экспериментов проведен на кафедре ТММ и ДМ с использованием опытного образца теплообменника. Их результаты обрабатываются и готовятся к внедрению в практику расчетов теплообменных аппаратов для молока и молочных продуктов.

Список литературы

1. Кук Г.А. Процессы и аппараты молочной промышленности. М.: Пищевая промышленность, 1973.
2. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). Под общ. Ред. П.Л. Кириллова. М.: Энергоиздат, 1984.
3. Справочник по теплообменникам: В 2-х т. Пер с англ. под ред. Б.С. Петрухова, В.К. Шикова. М.: Энергоиздат, 1987.