

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОЖУХОТРУБНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ПЕРВИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МОЛОКА

Ю.В. Воробьев, А.Д. Ковергин, П.А. Галкин, А.С. Толстов

*ГОУ ВПО Тамбовский государственный технический университет*

*Рецензент В.П. Таров*

**Ключевые слова и фразы:** кожухотрубные аппараты; методы расчета; первичное охлаждение молока; проектирование.

**Аннотация:** Рассмотрены особенности проектирования кожухотрубных аппаратов для первичного охлаждения молока на базе существующих методов расчета теплообменников.

Молоко теряет свои ценные питательные свойства в течение первых двух-трех часов после доения. Наиболее полное сохранение этих свойств обеспечивается охлаждением [1 – 3]. Процесс охлаждения должен быть не только своевременным, но и достаточно интенсивным, чтобы понизить температуру молока после доения в среднем до двух градусов по шкале Цельсия. На животноводческих фермах в молочных линиях для охлаждения применяются пластинчатые аппараты, которые позволяют распределить тепло- и хладоносители тонким слоем по поверхностям теплообмена.

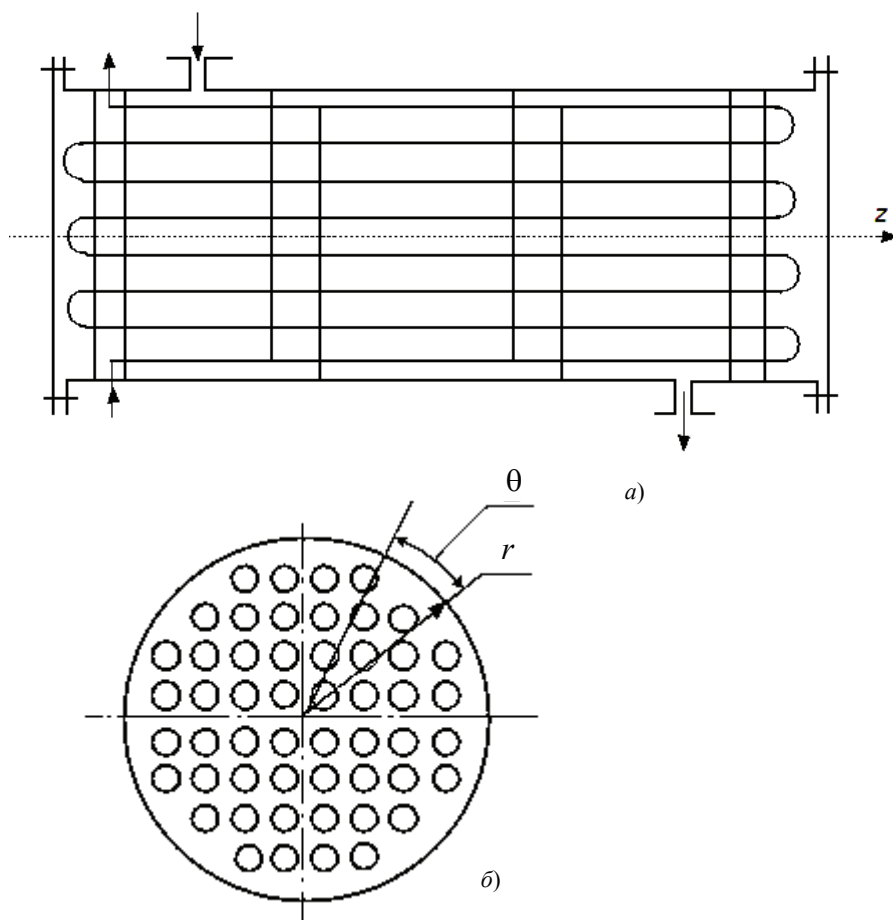
Однако пластинчатые аппараты [4] имеют целый ряд недостатков, которые связаны с наличием в конструкции большого количества прокладок. Эти прокладки располагаются по периметру соседних пластин и имеют значительные размеры по длине и ширине аппарата. После сжатия пакета пластин и прокладок они образуют герметичные каналы в виде щелей для молока и хладоносителя. Отмечаются частые отказы в работе из-за нарушения герметичности. Щели забиваются посторонними частицами, например опилками, шерстью и т.п. Отсюда значительные затраты на разборку и сборку аппарата. Кроме того, конструкция пластинчатого аппарата имеет существенные ограничения для дальнейшей интенсификации теплообменных процессов.

В рассматриваемых кожухотрубных аппаратах герметичность надежно обеспечивается развальцовкой или сваркой, а на участках поворота молокопровода – двумя малогабаритными прокладками, которые устанавливаются между деталями со значительной жесткостью. Эксплуатационные затраты на мойку и чистку кожухотрубного аппарата значительно уменьшаются. Схема типовой конструкции кожухотрубного аппарата для первичного охлаждения молока показана на рис. 1.

Молокопровод выполнен в виде параллельных слоев из труб, ориентированных в поперечном сечении кожуха по сторонам вписанного квадрата. Данное расположение пучка труб обеспечивает постоянное поперечное направление для потока молока в вертикальной плоскости.

В горизонтальной плоскости движение потока молока периодически изменяется как в продольном, так и в поперечном направлении.

Каналы хладоносителя ориентированы для перекрестного движения относительно пучка труб. Входной и выходной патрубки для хладоносителя расположены



**Рис. 1** Схема типовой конструкции кожухотрубного аппарата  
*a* – продольное сечение; *б* – поперечное сечение

в вертикальной плоскости. Ориентация потока хладоносителя в межтрубном пространстве осуществляется перегородками с соответствующими окнами в верхней и нижней части кожуха. Расстояния между перегородками и размеры окон можно подобрать таким образом, чтобы увеличить время пребывания хладоносителя в зоне перекрестного противотока и, соответственно, уменьшить в зоне прямотока. При этом следует иметь в виду, что конструкция аппарата позволяет без существенных затрат значительно увеличить скорости и давления в потоках теплоносителей/

Алгоритм проектирования кожухотрубного аппарата для первичного охлаждения молока представлен на рис. 2.

В соответствии с алгоритмом составлена программа расчета для ЭВМ, которая начинает работать с четвертого этапа и заканчивает – на шестом.

Расчетные теплогидравлические показатели аппарата должны обеспечивать его надежную работу в течение 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 расчетов, находится в пределах разброса экспериментальных данных. Также имеет место разброс размеров теплообменника в пределах допуска при изготовлении. На процессы теплообмена существенное влияние ока-



**Рис. 2** Алгоритм проектирования кожухотрубного аппарата для первичного охлаждения молока

зывают пограничные слои отложений на стенках молокопровода. Поэтому требования к рабочим характеристикам выполняются недостаточно полно и не всегда. Разработчик не имеет в достаточном количестве статистических данных о работе аппарата и сведений о влиянии эффективности его работы на другие процессы производства молочной продукции.

Дополнительно предъявляются требования к возможности периодического ремонта теплообменника, который включает в себя мойку и очистку поверхностей теплообмена, замену трубок и уплотнений. Эти требования являются причиной появления ограничений на размещение аппарата в молочных отделениях животноводческих ферм.

Важным требованием является возможность параллельного подключения нескольких аппаратов. Это позволяет ремонтировать каждый аппарат без ущерба для работы всего доильного агрегата. Многосекционное подключение или резервирование особенно важно для климатических зон с холодной зимой и жарким летом.

На некоторых этапах проектирования необходимо иметь количественные соотношения между параметрами охладителя молока по всему объему аппарата. Такие соотношения можно получить используя методы математической теории теплообменников [5, 6], которые позволяют составить систему дифференциальных уравнений для теплогидравлического процесса в рабочем объеме. В этой связи воспользуемся цилиндрической системой координат  $(\theta, r, z)$ , показанной на рис. 1, и предположим, что рабочая среда изотропна и непрерывна по направлениям координат. Тогда можно составить уравнения энергии для определения температурных полей в теплоносителях и металле трубного пучка.

Например, для молока эти уравнения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_1 \rho_1 c_1 T_1) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta}(\varepsilon_1 \rho_1 v_1 r c_1 T_1) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\varepsilon_1 \rho_1 u_1 r c_1 T_1) = \\ & = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \varepsilon_1 \Lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \varepsilon_1 \Lambda_1 r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon_1 \Lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \right) + q_{m \rightarrow 1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $c_1$  – удельная теплоемкость молока при постоянном движении;  $\Lambda_1$  – эффективная теплопроводность молока, учитывая турбулентный перенос теплоты;  $q_{m \rightarrow 1}$  – интенсивность передачи теплоты (на единицу объема пространства теплообменника) от металла к молоку;  $v_1$ ,  $u_1$  – скорости молока в направлении  $\theta$  и  $r$ , соответственно;  $\rho_1$ ,  $T_1$ ,  $\varepsilon_1$  – плотность, температура и доля объемного пространства молока, соответственно;  $t$  – время.

При составлении уравнения (1) были опущены из-за малой значимости следующие члены:  $\varepsilon_1$ ,  $\partial \rho / \partial t$ , характеризующий влияние изменений давления  $p$  на температуру; учитывающие кинетическую энергию движения и влияния вязкой диссипации энергии; учитывающие химические превращения в молоке; учитывающие фазовые переходы.

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

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

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

Уравнение энергии для металла в пучке труб упрощается, так как трубы неподвижны, и имеет следующий вид при использовании индекса  $m$

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

здесь  $\Lambda_m$  – эффективная теплопроводность металла.

Уравнение (3) описывает перенос теплоты от металла к потоку молока и к хладоносителю.

Обычно пренебрегают величинами теплопроводности в металле и теплоносителях. Тогда зависимости (1) – (3) сводятся к следующим уравнениям.

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_1 \rho_1 c_1 T_1) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta}(\varepsilon_1 \rho_1 v_1 r c_1 T_1) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\varepsilon_1 \rho_1 u_1 r c_1 T_1) + \frac{\partial}{\partial z}(\varepsilon_1 \rho_1 \omega_1 T_1) = q_{m \rightarrow 1}; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_2 \rho_2 c_2 T_2) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta}(\varepsilon_2 \rho_2 v_2 r c_2 T_2) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\varepsilon_2 \rho_2 u_2 r c_2 T_2) + \\ + \frac{\partial}{\partial z}(\varepsilon_2 \rho_2 \omega_2 T_2) = q_{m \rightarrow 2}. \end{aligned} \quad (6)$$

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  $\Lambda_2$  в членах с  $\partial/\partial\theta$  и  $\partial/\partial r$  и принимать  $\Lambda_2=0$  в члене с  $\partial/\partial z$ .

В уравнениях (1) – (6) участвуют члены  $q_{m \rightarrow 1}$  и  $q_{m \rightarrow 2}$ . Их можно представить в следующем виде:

$$q_{m \rightarrow 1} = U_1 (T_m - T_1), \quad (7)$$

$$q_{m \rightarrow 2} = U_2 (T_m - T_2), \quad (8)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  – индивидуальные объемные коэффициенты теплообмена, описывающие перенос теплоты в ядро потока с соответствующей стороны металлической стенки через половину ее толщины, прилегающий слой загрязнений и пристенный пограничный слой теплоносителя. Эти коэффициенты обычно являются функциями местной температуры жидкости, ее скорости и шероховатости поверхностей трубы.

Для стационарного режима выражения (7) и (8) можно свести к соотношению

$$q_{m \rightarrow 1} + q_{m \rightarrow 2} = 0. \quad (9)$$

Из (9) можно получить формулу для определения температуры стенки в любой точке

$$T_m = \frac{U_1 T_1 + U_2 T_2}{U_1 + U_2}. \quad (10)$$

Величина  $T_m$  является важным показателем при определении теплофизических характеристик в теплообменниках на этапах его проектирования.

Уравнения (1) – (6) содержат доли объемного пространства  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_m$ , которые подчиняются следующему условию

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_m = 1. \quad (11)$$

Их величины можно рассчитать по выражениям:

$$\varepsilon_1 = \pi d_1^2 / 4 S_1 S_2; \quad (12)$$

$$\varepsilon_2 = 1 - \pi d_2^2 / 4 S_1 S_2; \quad (13)$$

$$\varepsilon_m = \pi (d_2^2 - d_1^2) / 4 S_1 S_2, \quad (14)$$

где  $d_1$  и  $d_2$  – внутренний и наружный диаметры трубы соответственно;  $S_1$  и  $S_2$  – расстояния между центрами труб (шаги) в поперечном и продольном направлениях, соответственно [6].

Уравнения (1) – (6) применимы для расчета охладителя молока, который имеет перекрестное течение теплоносителей [6]. Для этого достаточно использовать двумерное описание, а именно, изменениями параметров по координате  $\theta$  пренебрежем и примем, что молоко течет 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  $T_2$  принимает вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\varepsilon_1 \rho_1 v_1 r c_1 T_1) = \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon_1 \Lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \right) + \frac{T_2 - T_1}{1/U_1 + 1/U_2}; \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon_2 \rho_2 \omega_2 c_2 T_2) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \varepsilon_2 \Lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \frac{T_1 - T_2}{1/U_1 + 1/U_2}. \quad (16)$$

Величины  $\varepsilon_1 \rho_1 v_1 c_1$ ,  $\varepsilon_2 \rho_2 \omega_2 c_2$  и  $1/U_1 + 1/U_2$  можно рассматривать как постоянные, а их изменениями по  $r$  пренебречь. Тогда уравнения (15) и (16) упрощаются, их решение осуществляется численными методами. Для скорости и давления можно получить дифференциальные уравнения, используя аналогию с вышеперечисленными соотношениями.

Точность решения этих уравнений зависит от граничных условий. Обычно задают величины скоростей и температур на входе. Все компоненты скоростей на границах со стеной 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.

Проверку достоверностей существующих расчетов на стадии проектирования можно осуществить, используя экспериментальные методы. На кафедре ТММ и ДМ ТГТУ разработана экспериментальная установка, которая позволяет контролировать теплогидравлические параметры в потоках молока и хладоносителей (вода, рассол) на входе и выходе из кожухотрубного аппарата. Учитывается влияние направлений течения теплоносителей (противоток и прямоток) на выходные параметры теплообменника: температуру, расход и давление. Экспериментальная модель аппарата позволяет изменять расстояния между перегородками и визуально оценивать режим течения жидкости в межтрубном пространстве. Предусмотрен учет влияния протечек жидкости за счет контроля размеров для байпасных зон и зазоров. Установку можно использовать для испытания теплоносителей с широким диапазоном теплофизических показателей. В том числе и с фазовыми переходами.

#### *Список литературы*

- 1 Кук, Г.А. Процессы и аппараты молочной промышленности / Г.А. Кук. – М.: Пищевая промышленность, 1973.
- 2 Волчков, И.И. Теплообменные аппараты для молока и молочных продуктов / И.И. Волчков. – М.: Пищевая промышленность, 1972.
- 3 Ковалев, Ю.Н. Аппараты молочных линий на фермах / Ю.Н. Ковалев. – М.: Агропромиздат, 1985.
- 4 Кириллов, П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков / Под общ. ред. П.Л. Кириллова. – М.: Энергоиздат, 1984.
- 5 Справочник по теплообменникам: В 2-х т. Пер с англ. под ред. Б.С. Петрухова, В.К. Шикова. – М.: Энергоиздат, 1987.

6 Воробьев, Ю.В. Трубчатый теплообменник для первичного охлаждения молока / Ю.В. Воробьев, А.Д. Ковергин, А.С. Толстов / Сборник научных статей по материалам международной научно – практической конференции «Прогрессивные технологии развития». Издательство Б.М.А., Тамбов, 2004. С. 178-179.

---

### **Design of Shell-and-Tube Apparatuses for Primary Milk Cooling**

**Yu.V. Vorobyov, A.D. Kovergin, P.A. Galkin, A.S. Tolstov**

*Tambov State Technical University*

**Key words and phrases:** shell-and-tube apparatuses; calculation methods; primary milk cooling; designing.

**Abstract:** Peculiarities of designing shell-and-tube apparatuses for primary milk cooling on the basis of existing methods of calculation of heat exchange are considered.

---

© Ю.В. Воробьев, А.Д. Ковергин, П.А. Галкин, А.С. Толстов, 2005