

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕРМОСТАТИРОВАННЫХ ЕМКОСТЕЙ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ МОЛОКА

**Миклуш В.П. к.т.н., профессор, Колончук М.В., Колончук В.М. инж.**  
(Белорусский государственный аграрный технический университет)

*Рассматриваются вопросы энергетики хранения молока в емкостях с вакуумным контуром и особенности технического обеспечения защиты от теплопритоков*

Молоко – продукт скоропортящийся. В нем происходит бурный рост микроорганизмов. Чем холоднее молоко, тем меньше скорость их размножения. Следовательно, для сохранения качества молока его необходимо скорее охлаждать. Наиболее простой способ охлаждения – охлаждение артезианской или родниковой водой. Температура такой воды – 2...8 0С. Основной недостаток такого способа – большой расход воды. Кратность составляет 3...4. На каждую тонну молока тратится 3...4 тонны воды. С помощью проточной воды молоко можно охладить всего лишь до 13...15 0С.

На фермах республики эксплуатируются около 14 тысяч технических комплектов для охлаждения молока. Почти все они устарели. Половина установок требуют замены. Существующий парк холодильных машин разнообразен (свыше 20 наименований машин). Они слабо стыкуются по своим техническим характеристикам с требованиями производства. Это приводит к неэффективной эксплуатации, особенно в плане потребления электроэнергии. Все эти установки характеризуются большим расходом электроэнергии (табл. 1). Причина – большие теплопритоки. Температура молока повышается на 1°С за один час. В процентном отношении это составляет 5 % (при повышении температуры с 5 до 25°С). Продолжительность бактерицидной фазы составляет при температуре

25°С всего 6 часов. Снизить теплопритоки можно применением танков для хранения с вакуумным контуром.

Цель работы – оценка эффективности и реальности организации хранения молока в емкостях с вакуумным контуром на молочных предприятиях.

Таблица 1. Молокоохладительное оборудование

| Марка              | Парк машин, шт. | Емкость ванны, л | Мощность установки, кВт | Продолжительность цикла охлаждения, ч | Затраты электроэнергии на охлаждение молока за цикл, кВтч | Удельный расход электроэнергии за цикл охлаждения молока, Втч/л |
|--------------------|-----------------|------------------|-------------------------|---------------------------------------|---|---|
| СМ-1250            | 8500            | 1250             | 2,6                     | 22,0                                  | 58,0  | 46,3  |
| ТОМ-2А             | 2200            | 1800             | 8,8                     | 6,5                                   | 57,0  | 31,8  |
| МКА-2000           | 1800            | 2000             | 5,8                     | 3,0                                   | 17,5  | 17,5  |
| РПО-1,6+УВ-10      | 610             | 1600             | 7,8                     | 3,0                                   | 23,3  | 29,0  |
| РПО-1,6+ОТ-10-20   | 70              | 1600             | 11,6                    | 3,0                                   | 34,7  | 43,4  |
| РПО-2,5+ТХУ-14     | 120             | 2500             | 8,5                     | 3,0                                   | 25,4  | 20,3  |
| РПО-2,5+ АВ-30     | 200             | 2500             | 16,0                    | 3,8                                   | 61,0  | 48,9  |
| РПО-2,5+МКТ-20-1-0 | 80              | 2500             | 11,5                    | 4,0                                   | 46,0  | 36,7  |

Конструкция резервуаров для хранения молока должна обеспечивать малый общий приток тепла из окружающего воздуха. Вакуумная теплоизоляция обеспечивает наиболее эффективную защиту от теплопритоков [1]. Время повышения температуры молока на один градус при хранении молока в термостатированных емкостях достигает 100 часов (табл. 2).

Таблица 2. Энергетика термостатированного хранения молока при различных вариантах

| Вариант  | Тепловой поток, Вт/тонну | Время повышения температуры молока на один градус, часов | Излишние затраты энергии на поддержание требуемой температуры за период хранения (10 часов), кВтч/тонну |
|--|--------------------------|--|---|
| Резервуар с хладоновой установкой                        | 1000                     | 1  | 10  |
| Резервуар-термостат с изоляцией при атмосферном давлении | 100                      | 10   | 1   |
| Резервуар с инертным газом                               | 50                       | 20   | 0,5   |
| Резервуар с высоковакуумной оболочкой                    | 10                       | 100  | 0,01  |
| Резервуар с вакуумно-порошковой изоля-                   | 10                       | 100  | 0,01  |

Для обеспечения низкой теплопроводности вакуумируемой оболочки необходимо, чтобы длина свободного пробега молекул воздуха превышала зазор между стенками оболочки (100 мм). Тогда длина свободного пробега молекул составит порядка 6,2 метра. Высоковакуумная изоляция требует преодоления ряда трудностей. Одна из них – необходимость применения параллельно соединенных насосов (рис. 1). Желателен также прогрев вакуумируемой оболочки. Эти требования обуславливаются сорбционными явлениями, происходящими на внутренней поверхности оболочки.

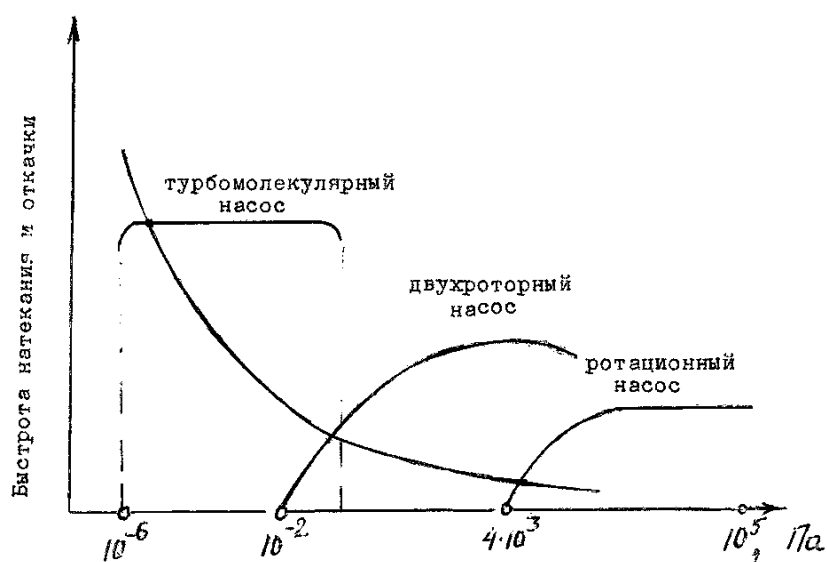


Рис. 1. Условия работоспособности вакуумного агрегата: кривые быстрот откачки пересекаются; рабочие точки последующих насосов находятся внутри рабочих диапазонов предыдущих насосов

Прогрессивным методом является применение вакуумно-порошковой изоляции (рис. 2). Порошки тонкого помола – вспученный перлит, аэрогель, силикат кальция, газовая сажа, циатомовая земля – являются очень хорошими изоляторами. При понижении давления в пространстве, заполненном изоляционным материалом, резко снижается его эффективный коэффициент теплопроводности. Для перлита, например, он снижается с  $324 \times 10^{-6}$  Вт/см<sup>2</sup>С при атмосферном давлении в 10 раз при давлении 15 Па. Улучшение изоляционных

свойств объясняется тем, что основная часть тепла передается излучением, а порошок является многократным экраном для этого излучения. Перечисленные выше порошки при соответствующей толщине слоя образуют эффективную преграду тепловому внешнему излучению. Распространяясь в порошках, лучистая энергия рассеивается и частично поглощается. Пространство между двумя оболочками заполняют тонким порошком изоляционного материала, после чего происходит откачка воздуха из этого пространства. При этом уже не требуется такой высокий вакуум, который понадобился бы при отсутствии изоляционного порошка. Необходимое давление в вакуумно-порошковом пространстве составляет 1...15 Па, в то время как при отсутствии порошка необходимо давление 0,01...0,001 Па. В случае необходимости можно повторно откачивать межстенное пространство емкости. Поскольку тонкие порошки до некоторой степени проницаемы для теплового излучения, величину теплового притока можно уменьшить добавлением в порошок медной или алюминиевой пудры или чешуек. В этом случае эффективный коэффициент теплопроводности понизится в 10 раз. Применение порошковой изоляции связано с трудностями из-за гигроскопичности порошка. В случае попадания в изоляционное пространство материала с высокой влажностью при давлении ниже 600 Па вода превращается в лед и начинается сублимация льда. Процесс сублимации льда может быть продолжительным, поэтому при первом вакуумировании порошки должны подвергаться предварительной сушке или нагреву электричеством или паром. Можно также продувать сухой горячий воздух через влажный порошок. Другой трудностью является сам процесс откачки воздуха из порошка. При больших объемах откачиваемой системы сопротивление проходу газа очень велико. Откачку необходимо производить в нескольких точках или устраивать специальные каналы. В местах откачки на вакуумных линиях следует установить фильтры, чтобы порошок при откачке не попадал в вакуумный насос.

В качестве изолирующего материала целесообразно применять перлит (табл. 3). Выбор перлита объясняется тем, что этот материал удобен технологически при заполнении межстенного пространства. Величина теплопроводности

перлита при рабочем давлении 15 Па составляет примерное значение таких лучших материалов, какими являются аэрогель, кремнегель и мипора. Кремнегель дешевле аэрогеля и менее гидрофобен. Однако он имеет больший насыпной вес. Мипора обладает малым насыпным весом, но менее удобна в некоторых случаях, например, из-за своей горючести.

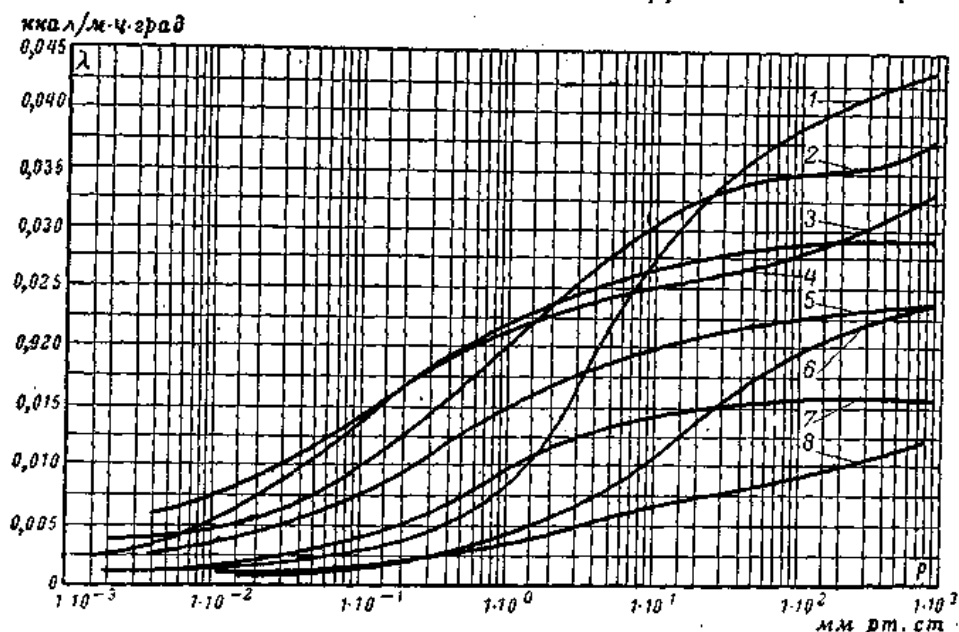


Рисунок 2. Теплопроводность вакуумно-порошковых материалов: 1 – магнезия; 2 – минеральная вата; 3 – перлит; 4 – крупноволокнистая стеклянная вата; 5 – тонковолокнистая стеклянная вата; 6 – кремнегель; 7 – мипора; 8 – силикоаэрогель

Таблица 3. Тепловой поток между параллельными плоскостями через изоляцию различных типов (слой 15 см)

| Вид изоляции  | Тепловой поток, ккал/м <sup>2</sup> ч |
|---|---------------------------------------|
| Аэрогель  | 18                                    |
| Вата минеральная  | 45                                    |
| Мипора, крошка  | 24                                    |
| Пенополистерол  | 42                                    |
| Высокий вакуум (остаточное давление 10 <sup>-4</sup> Па)  | 7,8                                   |
| Перлит под вакуумом                                       | 1,4                                   |
| Мипора при вакууме 6 Па                                   | 3,7                                   |
| Силикоаэрогель при вакууме 6 Па                           | 1,8                                   |
| Силикоаэрогель с медным порошком при вакууме 13 Па        | 0,6                                   |
| Многослойная прокладка из стеклотумаги при вакууме 0,1 Па | 0,05                                  |

Вес заправляемого перлита (для емкости 2000 литров) определим по формуле

$$P = \rho \cdot V = 97 \cdot 475 \cdot 10^{-3} = 47,5 \text{ кг}$$

где  $P$  — вес наполнителя, кг;  $\rho$  — удельный вес, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  — объем межстенного пространства, м<sup>3</sup>.

Подставив исходные данные, получим, что для емкости 4000 литров молока требуемое количество перлита (95 кг — в два раза больше).

Резервуар воспринимает внешнюю распределенную нагрузку от атмосферного давления не превышающую 100000 Па. Поэтому стенки камеры могут быть сравнительно тонкими. Основными элементами резервуара являются днище и обечайка со штуцером для откачки межстенного пространства. Цилиндрические обечайки получили наиболее широкое распространение. Они отличаются простотой изготовления и рациональным расходом материала. При конструировании цилиндрических обечаек независимо от технологии изготовления внутренние базовые диаметры выбирают из рядов: 400, 500, 600, 700, 900, 1200, 1400, 1600, 1800 и 2000 мм. Стенки резервуара будут воспринимать различную нагрузку. Внутренняя стенка будет воспринимать атмосферное давление изнутри емкости и давление жидкости. Стенки ее будут подвергаться только растяжению. Поэтому за счет ее производим только на прочность. Наружная стенка воспринимает нагрузку от атмосферного давления снаружи. Поэтому расчет ее производим как на прочность, так и на устойчивость. Определим требуемую толщину стенки цилиндрического резервуара диаметром 2 метра. Применив гипотезу наибольших касательных напряжений, получим следующее условие прочности и требуемую толщину стенки

$$\sigma_{iii} = \frac{pD}{2\delta} \Leftrightarrow \delta = \frac{pD}{2[\sigma_p]} = \frac{1,1 \cdot 10^{-1} \cdot 2 \cdot 10^3}{2 \cdot 100} = 1 \text{ мм}$$

При расчете по гипотезе удельной потенциальной энергии изменение формы из условия прочности

$$\sigma_{iy} = 0,433 \frac{pD}{\delta} \Leftrightarrow \delta = \frac{0,433 pD}{[\sigma_p]} = \frac{0,433 \cdot 1,1 \cdot 10^{-1} \cdot 2 \cdot 10^3}{100} = 0,866 \text{ мм}$$

Полученную толщину стенки увеличиваем на 1,1 мм с учетом ее возможного ослабления в результате коррозии. Принимая толщину стенки 3,2 мм. Исходя из условия прочности внутренние и наружные стенки резервуаров диаметром 1...2 метра можно выполнять 2 мм. Наружную оболочку емкости рассчитываем на устойчивость. Потери устойчивости (внезапный рост прогибов и деформаций) может возникнуть в оболочках, если в них имеются значительные зоны, в которых действуют общие сжимающие напряжения. При внешнем давлении в цилиндрической оболочке возникают сжимающие окружные напряжения  $\sigma_\varphi = -q \frac{r}{h}$ . И, следовательно, при  $q \geq q_{кр}$  в оболочке может возникнуть потеря устойчивости. Величина внешнего давления, соответствующего потере устойчивости оболочки, определяется по формуле

$$q_{кр} = 0,92 \frac{Eh^2}{lr} \sqrt{\frac{h}{r}}$$

где  $E$  — модуль упругости;  $r$  — радиус оболочки;  $h$  — толщина оболочки;  $l$  — длина оболочки;

Приближенная модель устойчивости цилиндрической оболочки при внешнем давлении имеет вид

$$q \leq \left[ \frac{1}{n_y} \right] \cdot 0,92 \frac{Eh^2}{lr} \sqrt{\frac{h}{r}}$$

где  $\left[ \frac{1}{n_y} \right] = 1,5 \dots 2,5$  — допускаемое значение запаса устойчивости оболочки.

Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Таблица 4. Оценка устойчивости внешней оболочки термостатированных резервуаров

| Объем резервуара                            | 750 л             | 1000 л            | 1500 л            | 2000 л            | 4000 л            |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Диаметр обечайки, м                         | 1,0               | 1,0               | 1,4               | 1,4               | 2,0               |
| Радиус обечайки, м                          | 0,5               | 0,5               | 0,7               | 0,7               | 1,0               |
| Толщина обечайки, мм                        | 3                 | 3                 | 3                 | 5                 | 5                 |
| Длина обечайки, м                           | 1,0               | 1,25              | 1,0               | 1,3               | 1,2               |
| Расстояние между закрепленными контурами, м | 0,5               | 0,62              | 0,5               | 0,65              | 0,6               |
| Модуль упругости, Н/мм <sup>2</sup>         | $2 \cdot 10^{11}$ | $2 \cdot 10^{11}$ | $2 \cdot 10^{11}$ | $2 \cdot 10^{11}$ | $2 \cdot 10^{11}$ |

|  |     |     |     |     |     |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|
| Внешнее давление, соответствующее потере устойчивости, бар | 5   | 4   | 5   | 4   | 4   |
| Допустимое значение запаса устойчивости оболочки           | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   |
| Допустимое внешнее давление, бар                           | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| Внешнее давление, кПа                                      | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

**Заключение.** Повышение эффективности систем охлаждения и хранения молока должно базироваться на следующих двух принципах энергосберегающей подготовки молока в условиях фермы: А) снижение температуры охлаждаемого молока до требуемого уровня в минимально короткий период времени; Б) поддержание требуемой температуры среды в которой хранится молоко в течении длительного времени без дополнительных затрат энергии.

Преимущества систем охлаждения и хранения молока: А) послойного непосредственного охлаждения молока до критической температуры в установке для мгновенного охлаждения молока: снижение времени охлаждения молока в 2...4 раза за счет исключения объемного охлаждения; исключение смешивания теплого молока с холодным, ускоряющим размножение микроорганизмов, бактерий, ухудшающих качество молока; снижение времени воздействия теплопритоков, вынуждающих периодически включать холодильный агрегат. Б) вакуумно-порошковой блокировки теплопритоков при хранении молока в термостатированных емкостях: практическое отсутствие теплопритоков; увеличение противобактерицидной стойкости молока до 32 часов; расширение температурного диапазона безопасного хранения молока, позволяющего внедрить дифференцированные нормативы охлаждения молока.

## Список литературы

1. Казаровец, Н.В. Технологии, оборудование и технический сервис в молочном животноводстве : монография / Н. В. Казаровец, В.П. Миклуш, М.В. Колончук. – Минск : БГАТУ, 2007. – 556 с. : ил.



2. Малков М.П. и др. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963, – 416 с.: ил.

3. Шумский К.П. Вакуумные аппараты и приборы химического машиностроения. – М.: Машиностроение, 1974, 576 с., ил.

## **Аннотация**

### **Обеспечение надежности термостатированных емкостей для хранения молока**

В.П. Миклуш, М.В. Колончук, В.М. Колончук

*Рассматриваются вопросы энергетики хранения молока в емкостях с вакуумным контуром и особенности технического обеспечения защиты от теплоток.*

## **Abstract**

### **Reliability guaranteeing of thermostabilising volumes for milk keeping**

V.Miklush, M.Kolonchuk, V.Kolonchuk

*The technical and economical advantages of milk cooling in the coolers with vacuum contour*