

УДК 663.28

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ ЗАО «ОДЕССКИЙ ЗАВОД ШАМПАНСКИХ ВИН» И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ

Титлов А.С., д-р техн. наук, доцент, Васылив О.Б., канд. техн. наук, доцент  
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса  
Ткаченко Д.П.  
ЗАО «Одесский завод шампанских вин» (ЗАО «ОЗШВ»), г. Одесса

*Проведено исследование рабочих режимов систем холодоснабжения Одесского завода шампанских вин и выполнен расчет теплоизоляционных покрытий акратофоров и транспортных магистралей. По результатам исследований разработаны практические рекомендации по снижению энергопотребления холодильной системы.*

*Research of operating conditions of the systems of cooling system of the Odessa factory of Wines is conducted and the calculation of heat-insulation coverages akratofor and transport highways is executed. On results researches practical recommendations are developed on the decline of energy consumption of the refrigeration system.*

Ключевые слова: акратофор, охлаждение, теплоизоляция.

Одним из значимых факторов обеспечения качества выпускаемой продукции винодельческих предприятий является обработка сырья холодом с последующей длительной термостабилизацией в охлажденном состоянии. На ЗАО «ОЗШВ», как и на аналогичных предприятиях отрасли, процессы обработки вина холодом проходят на первом этапе в жидкостных рассольных теплообменниках, а на втором в акратофорах. Акратофор представляет собой герметичную цилиндрическую емкость с рассольной охлаждающей рубашкой и предназначен для длительного (не менее 5 суток) низкотемпературного хранения виноматериалов на уровне (минус 4 ... минус 3) °С. В среднем частота опорожнения акратофоров на ЗАО «ОЗШВ» 17 раз в год. Подача рассола в систему предварительного охлаждения и к акратофорам осуществляется из компрессорного цеха по теплоизолированным подвесным магистралям. Теплоизоляция — стекловолокно ручной набивки.

Так как производство искусственного холода связано с затратами электроэнергии на приводы компрессоров и циркуляционных насосов, то рациональное его использование позволит ЗАО «ОЗШВ» снизить себестоимость выпускаемой продукции.

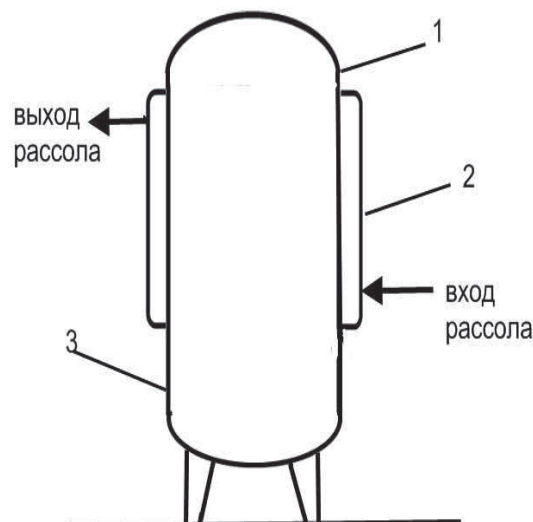
Как показал анализ, основными источниками потерь холода на ЗАО «ОЗШВ» являются поверхности акратофоров, заполненными виноматериалом и магистральные рассольные трубопроводы. Стандартным решением такой проблемы является установка теплоизоляционного покрытия, однако открытым остается вопрос о выборе толщины теплоизоляции — известно, что рост толщины теплоизоляции увеличивает ее стоимость, но и снижает потери холода и, соответственно, затраты на систему холодоснабжения.

На первом этапе задача ставилась таким образом — зная стоимостные характеристики теплоизоляции и производства искусственного холода, определить период окупаемости на установку теплоизоляционных покрытий на акратофоре и рассольных трубопроводах.

На втором этапе стояла задача провести анализ нестационарных тепловых режимов акратофоров с теплоизоляционным покрытием при различной толщине теплоизоляции и различных режимах термостабилизации акратофора, например, при отключенной циркуляции рассола в охлаждающей рубашке.

В рамках первого этапа проводится расчет теплоизоляционного покрытия акратофора, работающего в стационарном режиме обработки виноматериала при рекомендованной температуре минус хранения минус 4 °С. В таком режиме прокачка рассола через охлаждающую рубашку акратофора (рис. 1) компенсирует теплопритоки из окружающей среды и обеспечивает термостатирование виноматериала при заданной температуре.

Исходные данные для расчета теплоизоляции акратофора приведены в табл. 1.



1 — вертикальный акратофор; 2 — охлаждающая рубашка;  
3 — нижняя неохлаждаемая часть акратофора

**Рис. 1 – Общий вид вертикального акратофора с охлаждающей рубашкой**

Процесс поступления теплопритоков из окружающего воздуха к виноматериалу в акратофоре без охлаждающей рубашки можно разделить на три этапа:

а) конвективный теплообмен в режиме естественной конвекции на наружной стенке акратофора «воздух — стенка» (описывается уравнением Ньютона-Рихмана [3])

$$Q = \alpha \cdot F \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{ст.нар}}), \quad (1)$$

где  $Q$  — тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;

$\alpha$  — коэффициент теплообмена между воздухом в помещении и наружной стенкой акратофора, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$F$  — поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;

$t_{\text{в}}, t_{\text{ст.нар}}$  — соответственно, температуры воздуха и наружной стенки акратофора, м<sup>2</sup>;

б) теплопроводность в стенке корпуса акратофора (описывается уравнением Фурье для цилиндрической стенки [3])

$$Q = \frac{\pi \cdot H \cdot (t_{\text{ст.нар}} - t_{\text{ст.вн}})}{\frac{1}{2\lambda_{\text{ст}}} \cdot \ln\left(\frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}}\right)}, \quad (2)$$

где  $H$  — высота цилиндрической стенки, м;

$t_{\text{ст.нар}}, t_{\text{ст.вн}}$  — соответственно, температуры наружной и внутренней стенки акратофора, °С;

$\lambda_{\text{ст}}$  — коэффициент теплопроводности материала стенки акратофора, Вт/(м·К);

$d_{\text{нар}}, d_{\text{вн}}$  — соответственно, диаметр наружной и внутренней стенки акратофора, м;

в) конвективный теплообмен в режиме естественной конвекции на внутренней поверхности акратофора «стенка — вино» (описывается уравнением Ньютона-Рихмана).

В случае установки теплоизоляционного покрытия с наружным диаметром  $d_{\text{из}}$  уравнение теплопроводности (2) будет включать дополнительный член:

$$Q = \frac{\pi \cdot H \cdot (t_{\text{ст.нар}} - t_{\text{ст.вн}})}{\frac{1}{2\lambda_{\text{ст}}} \cdot \ln\left(\frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}}\right) + \frac{1}{2\lambda_{\text{из}}} \cdot \frac{d_{\text{из}}}{d_{\text{нар}}}}, \quad (3)$$

где  $\lambda_{\text{из}}$  — коэффициент теплопроводности материала теплоизоляции, Вт/(м·К).

В уравнении (3) температура  $t_{\text{ст.нар}}$  будет относиться к температуре наружной поверхности теплоизоляции.

Уравнения (1)–(3) описывают процесс теплопередачи от воздуха в помещении к виноматериалу для поверхности акратофора без охлаждающей рубашки.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета тепловых режимов и теплоизоляционных покрытий акратофоров

| Показатель   | Единицы измерения  | Значение              |
|--|--------------------|-----------------------|
| Высота акратофора  | м                  | 5,820                 |
| Диаметра акратофора с рубашкой охлаждения  | м                  | 2,616                 |
| Внутренний диаметр акратофора  | м                  | 2,400                 |
| Наружный диаметр акратофора  | м                  | 2,436                 |
| Объем акратофора   | м <sup>3</sup>     | 25,000                |
| Толщина стенки корпуса акратофора  | м                  | 0,018                 |
| Толщина стенки охлаждающей рубашки   | м                  | 0,008                 |
| Высота охлаждающей рубашки   | м                  | 2,995                 |
| Высота неохлаждаемой части акратофора  | м                  | 2,710                 |
| Коэффициент теплопроводности материала корпуса акратофора и рубашки охлаждения (нержавеющая сталь 12Х189Т) | Вт/(м·К)           | 15                    |
| Теплоемкость материала корпуса и рубашки охлаждения  | Дж/(кг·К)          | 450                   |
| Плотность материала корпуса и рубашки охлаждения   | кг/м <sup>3</sup>  | 7900                  |
| Количество установленных акратофоров, 25 м <sup>3</sup>  | шт.                | 43                    |
| Количество установленных акратофоров, 50 м <sup>3</sup>  | шт.                | 2                     |
| Типичный цикл работы акратофора (выдержка/опорожнение/мойка)   | сут.               | 5/1/1                 |
| Начальная температура виноматериала  | °С                 | 16                    |
| Температура выдержки виноматериала   | °С                 | минус 4               |
| Теплоемкость виноматериала при температуре минус 4 °С  | Дж/кг·К            | 3881                  |
| Плотность виноматериала при температуре минус 4 °С   | кг/м <sup>3</sup>  | 996                   |
| Коэффициент теплопроводности виноматериала при температуре минус 4 °С                                      | Вт/(м·К)           | 0,409                 |
| Коэффициент объемного термического расширения виноматериала при температуре минус 4 °С                     | 1/К                | 0,7·10 <sup>-4</sup>  |
| Коэффициент кинематической вязкости виноматериала при температуре минус 4 °С                               | м <sup>2</sup> ·с  | 3,65·10 <sup>-6</sup> |
| Температура окружающего воздуха (в помещении)  | °С                 | 16                    |
| Рассол   |                    | NaCl                  |
| Начальная температура рассола (летний режим)   | °С                 | минус 7               |
| Конечная температура рассола (летний режим)  | °С                 | минус 3               |
| Плотность рассола при температуре минус 4 °С   | кг/м <sup>3</sup>  | 1120                  |
| Теплоемкость рассола при температуре минус 4 °С  | Дж/(кг·К)          | 3500                  |
| Коэффициент объемного термического расширения рассола при температуре минус 4 °С                           | 1/К                | 5·10 <sup>-4</sup>    |
| Коэффициент теплопроводности рассола при температуре минус 4 °С  | Вт/(м·К)           | 0,535                 |
| Производительность рассольных насосов  | м <sup>3</sup> /ч  | 90                    |
| Материал теплоизоляции   |                    | пенополиуретан        |
| Коэффициент теплопроводности теплоизоляции   | Вт/(м·К)           | 0,03                  |
| Плотность теплоизоляции  | кг/м <sup>3</sup>  | 40                    |
| Теплоемкость теплоизоляции   | Дж/(кг·К)          | 1470                  |
| Стоимость 1 м <sup>3</sup> теплоизоляции (при толщине 80 мм), включая монтаж 14000 грн/60 м <sup>2</sup>   | грн/м <sup>2</sup> | 233                   |
| Стоимость электроэнергии   | грн/(кВт·ч)        | 0,6                   |
| Холодопроизводительность компрессора АУ-200  |                    |                       |
| — летом  | Гкал               | 4,8                   |
| — зимой  | Гкал               | 2,4                   |
| Примечание   |                    |                       |
| 1. Теплофизические свойства материалов определены при помощи справочной литературы [1, 2].                 |                    |                       |

При наличии охлаждающей рубашки в систему уравнений (1)–(3) необходимо включить уравнение, описывающее процесс теплопроводности в корпусе охлаждающей рубашки [тип (2)] и конвективного теплообмена в полости циркуляции рассола.

Последний процесс – конвекция в цилиндрической прослойке при неизотермических вертикальных стенках, из-за сложности математического описания не может быть описан каким-либо достоверным соотношением. Для этого случая принято вводить обоснованные допущения.

В нашем случае циркулирующий в охлаждающей рубашке рассол будет выполнять роль компенсирующего источника холода, т.е. при равенстве температур рассола и виноматериала теплопритоки из окружающей среды к виноматериалу отсутствуют. Рассол как бы «перехватывает» теплопритоки и переносит их в испаритель холодильной машины. Очевидно, что температура рассола должна быть близка к температуре выдержки виноматериала, т.е.  $t_{\text{вм}} = t_p$ .

В качестве второго допущения, существенно упрощающего математическое описание процесса теплопередачи, принимаем равенство температур внутренней стенки акратофора и рубашки охлаждения, соответственно, температурам виноматериала и рассола. Это допущение верно при высокой интенсивности теплообмена при циркуляции жидкостной среды и при высокой теплоемкости системы (объем виноматериала 25 м<sup>3</sup>).

Таким образом, для описания процесса компенсации теплопритоков можно использовать два уравнения (1) и (2) либо (1) и (3). Уравнение (3) используется при наличии теплоизоляции. Системы уравнений (1)–(2) либо (1)–(3) должны быть дополнены зависимостью коэффициента теплообмена на наружной поверхности корпуса от разности температур  $t_{\text{в}} - t_{\text{ст.нар}}$ .

В общем случае эта зависимость должна учитывать и лучистый теплообмен и возможность выпадения влаги при температуре стенки ниже температуры точки росы.

Коэффициент такого сложного теплообмена можно рассчитать по формуле

$$\alpha_{\Sigma} = k_{\text{влаги}} \cdot (\alpha_{\text{луч}} + \alpha_{\text{конв}}), \quad (4)$$

где  $\alpha_{\Sigma}$ ,  $\alpha_{\text{луч}}$ ,  $\alpha_{\text{конв}}$  — соответственно, коэффициенты сложного, лучистого и конвективного теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$k_{\text{влаги}}$  — коэффициент влаговыведения [4].

С учетом рекомендаций [5] формула (4) имеет вид:

$$\alpha_{\Sigma} = k_{\text{влаги}} \cdot \left\{ \frac{(T_{\text{в}})^4 - (T_{\text{ст.нар}})^4}{t_{\text{в}} - t_{\text{ст.нар}}} \cdot C_o + \left[ 1,67 + 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{t_{\text{в}} + t_{\text{ст.нар}}}{2} \right) \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{ст.нар}})^{1/3} \right] \right\}, \quad (5)$$

где  $T_{\text{в}}$ ,  $T_{\text{ст.нар}}$ ,  $t_{\text{в}}$ ,  $t_{\text{ст.нар}}$  — соответственно, температуры воздуха и наружной стенки акратофора, К(°С);

$C_o = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{К}^4}$  — постоянная Стефана-Больцмана.

Расчет по формуле (1), (2), (3), (5) с использованием исходных данных, приведенных в табл. 1, позволяет определить теплопритоки из окружающей среды к рассолу и виноматериалу при наличии теплоизоляции  $Q_{\text{из}}^{\text{ТП}}$  и без нее  $Q^{\text{ТП}}$ .

Для оценки экономической эффективности установки теплоизоляции определяется разность теплопритоков

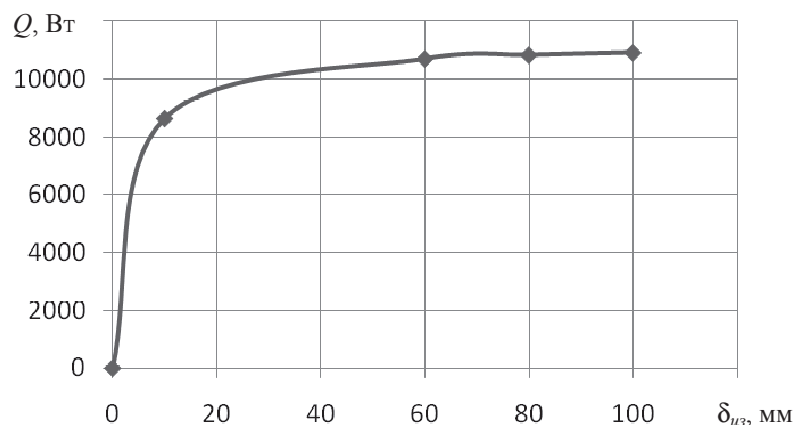
$$\Delta Q^{\text{ТП}} = Q^{\text{ТП}} - Q_{\text{из}}^{\text{ТП}}. \quad (6)$$

Зная затраты электрической мощности на привод компрессора холодильной машины при производстве единицы (1 кВт) искусственного холода  $E_{\text{КМ}}$  и стоимость электрической энергии  $C_{\text{Э}}$ , можно определить годовой экономический эффект установки теплоизоляционного покрытия.

$$C = \frac{\Delta Q^{\text{ТП}}}{E_{\text{КМ}}} \cdot \tau \cdot C_{\text{Э}}, \quad (7)$$

где  $\tau = \frac{5}{7} \cdot 365 \cdot 24$  – время работы холодильной машины для охлаждения акратофоров в течение года, с.

Результаты расчетов по приведенной выше методике представлены на рис. 2.



**Рис. 2 – Залежність теплового ефекту (зниження втрат холода в оточуюче середовище) від товщини теплоізоляції акратофора**

Вибір товщини теплоізоляції акратофора з урахуванням складившихся на момент виконання роботи стоимісних параметрів дозволяє провести рис. 2.

Аналіз результатів розрахунку показав, що починаючи з товщини теплоізоляції 60 мм і до 100 мм, втрати холода змінюються незначительно. Зниження їх на 1 мм зростання товщини теплоізоляції становить 0,05 %.

Зростання вартості теплоізоляції в цих же умовах становить 0,35 %, т.е. в 7 раз вище.

Техніко-економічні показники, отримані за результатами розрахунку в стаціонарному режимі роботи акратофора, наведені в табл. 2.

**Таблиця 2 – Техніко-економічні показники режиму роботи акратофора при різних товщинах теплоізоляції**

| Показатель   | Товщина ізоляції, мм |       |       |
|--|----------------------|-------|-------|
|  | 60                   | 80    | 100   |
| Стоїмість теплоізоляції, грн                         | 13022                | 13920 | 14969 |
| Зниження втрат холода, Вт                            | 10704                | 10836 | 10920 |
| Річний економічний ефект від установки ізоляції, грн | 11394                | 11535 | 11622 |
| Термін окупності, років                              | 1,14                 | 1,2   | 1,29  |

На другому етапі була проведена оцінка впливу товщини теплоізоляції акратофорів на їх теплові режими виноматеріалу в нестационарних умовах (без циркуляції рассола).

Аналіз різних спеціалізованих науково-технічних літературних джерел [3-10] показав, що в даний час відсутня методика розрахунку як стаціонарних, так і нестационарних теплових режимів рідких серед, що знаходяться в циліндричних ємкостях. Відомі лише підходи до розрахунку стаціонарних теплових режимів циліндрів з різнонагрітими вертикальними стенками [7] і обогрєваних циліндричних порожнин з відкритими торцями [6].

Розглянемо докладніше нестационарний процес надходження тепла з оточуючого середовища до виноматеріалу в акратофорі.

В верхній частині акратофора в охолоджуючій рубашці при відключенні циркуляційного насоса буде знаходитися нерухомий шар рассола. В початковий момент відключення насоса його температура буде близька до температури рассола, а потім буде зростати. Рассол буде знаходитися в циліндричній прошлойці товщиною 82 мм і висотою близько 3000 мм.

Для процесу теплообміну в такій циліндричній прошлойці існують рекомендації [5], які повністю застосовні для нашого випадку.

При описанні процесу теплообміну рекомендують розглядати процес теплопровідності, а в якості коефіцієнта теплопровідності використовувати поняття про еквівалентну теплопровідність  $\lambda_{екв}$  середовища між поверхностями теплообміну.

Опис процесу проводять за допомогою критеріального рівняння

$$\varepsilon_k = \frac{\lambda_{екв}}{\lambda_{жс}}, \quad (8)$$

де  $\varepsilon_k$  — коефіцієнт конвекції;

$\lambda_{\text{экв}}$  и  $\lambda_{\text{жс}}$  — соответственно, коэффициенты теплопроводности эффективной среды и жидкости, заполняющей прослойку.

Значения  $\lambda_{\text{экв}}$  и  $\lambda_{\text{жс}}$  в уравнении (8) определяются при среднеарифметической температуре стенок  $t_m$ .

Значения коэффициента конвекции  $\epsilon_k$  определяют из следующих приближенных зависимостей [6]:

$$\left. \begin{aligned} (\text{Gr} \cdot \text{Pr}) < 1000, \quad \text{то } \epsilon_k &= 1 \\ (\text{Gr} \cdot \text{Pr}) > 1000, \quad \text{то } \epsilon_k &= 0,18 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,25} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Найденное значение

$$\lambda_{\text{экв}} = \lambda_{\text{жс}} \cdot \epsilon_k \quad (10)$$

используем для расчета процесса теплопроводности через эквивалентную среду с помощью уравнения (1).

При поступлении тепла из окружающей среды к виноматериалу в начальный момент прогревается небольшой пограничный слой. Прогрев виноматериала происходит по образующей цилиндра и по высоте.

Нагретый пограничный слой имеет меньшую, по сравнению с основной холодной частью виноматериала, плотность. Согласно закону Архимеда, при наличии разности плотностей в жидкости происходит подъем нагретой части жидкости в верхнюю часть акратофора. Место нагретой жидкости в пограничном слое занимают холодные слои из центральной части акратофора. При дальнейшем поступлении теплоток все больше нагретой жидкости будет скапливаться в верхней части акратофора.

Такое распределение жидкости – «сверху нагретая – ниже холодная» препятствует циркуляции жидкости в объеме и внутреннему теплообмену между разнонагретыми слоями. Разнонагретое по высоте состояние жидкости называют «стратификацией» [6]. Оно может быть вызвано различными факторами и сохраняется длительное время даже после прекращения возмущающего воздействия.

На интенсивность стратификации влияют теплофизические свойства жидкости, граничные условия подвода тепла и геометрические параметры конструкции. Имеют место случаи, когда стратификация или вялая, или не развивается вовсе даже при наличии возмущающего воздействия.

Адекватное математическое описание стратифицированной среды в замкнутом объеме акратофора из-за сложности и взаимосвязанности процессов теплообмена и гидродинамики в настоящее время еще не разработано. Распределение температур и потоков в стратифицированном виноматериале можно только при помощи экспериментального метода.

Выходом из сложившейся ситуации могут быть допущения, заложенные в математическую модель нестационарных тепловых режимов акратофоров.

Первое допущение – об идеальном перемешивании виноматериала в радиальном направлении и отсутствии заметной стратификации. Второе допущение частично вытекает из первого – теплообмен в аксиальном (по высоте) направлении отсутствует. Эти допущения могут быть успешно реализованы на практике в случае перемешивания виноматериала в акратофоре при помощи, например, мешалок

Для решения задачи были использованы численные методы нестационарной теплопроводности [3]. Элементы конструкции акратофора были разбиты на ряд ячеек. В центре каждой ячейки был помещен виртуальный (воображаемый) узел. На два узла ячейки разбиты в случае контакта твердого тела с жидкостью и наличия конвективного теплообмена.

Для решения системы уравнений теплового баланса каждого узла был использован неявный метод, который устойчив при любых значениях  $Fo$  и  $Bi$ .

Результаты расчетов тепловых режимов нестационарных акратофоров приведены ниже в виде графических зависимостей.

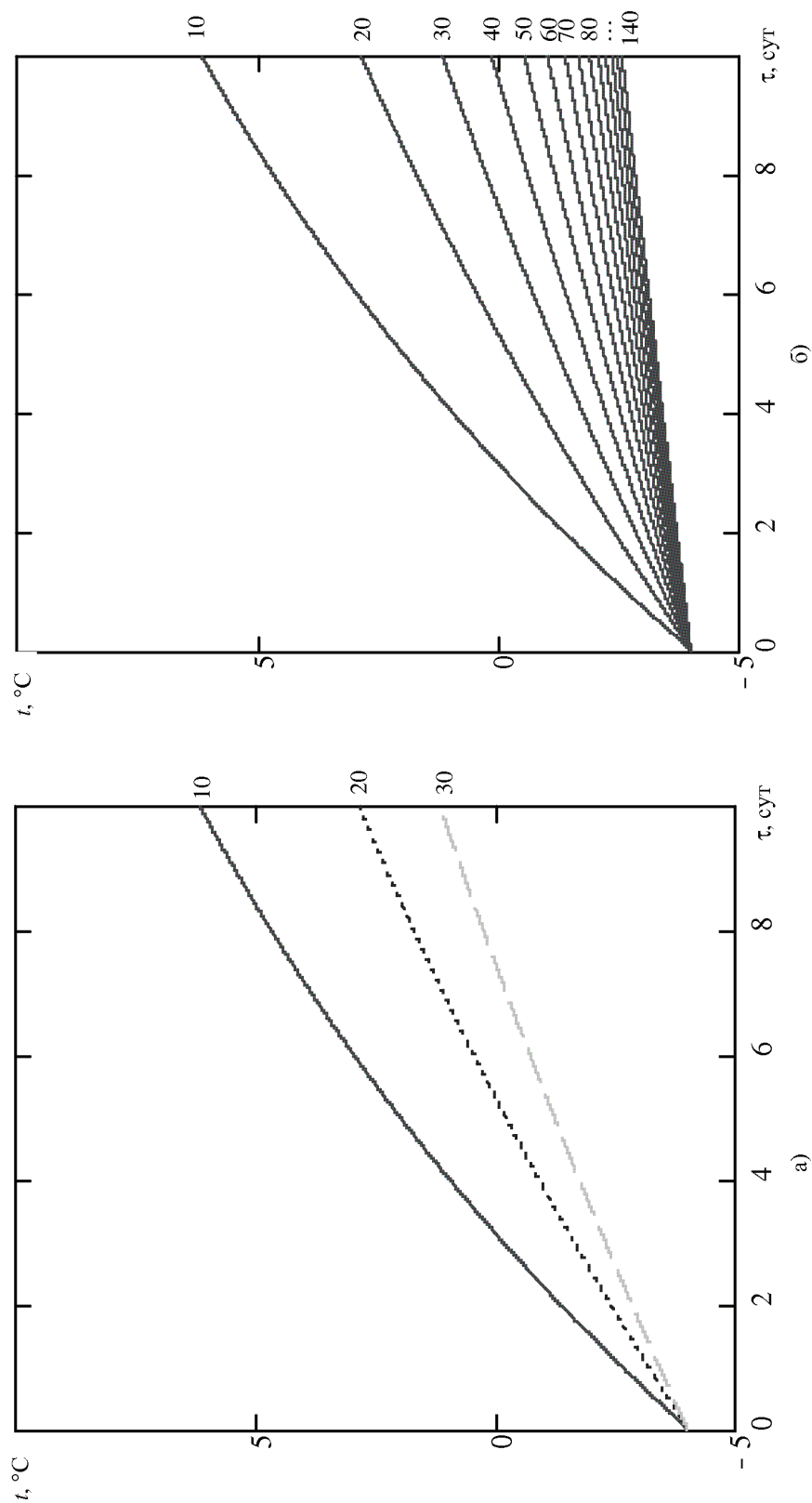
На рис. 3 представлена зависимость изменения температуры виноматериала в зоне охлаждающей рубашки при различных значениях толщины теплоизоляции во времени.

Показано, что обеспечить подъем температуры виноматериала в течении 5 суток до  $1^\circ\text{C}$  может теплоизоляционное покрытие с толщиной от 80 мм и выше. Представленные на рис. 3 результаты могут помочь оценить температуру виноматериала до 10 суток хранения.

Особый интерес вызывают результаты моделирования нестационарных тепловых режимов акратофоров при заполнении объема охлаждающей рубашки акратофора воздухом. Воздух, как известно [11], является прекрасным натуральным теплоизолятором и в этом качестве он может помочь решить задачу термостабилизации виноматериала в акратофоре.

Оценка режима теплопереноса по формулам (8) и (9) показала режим чистой теплопроводности.

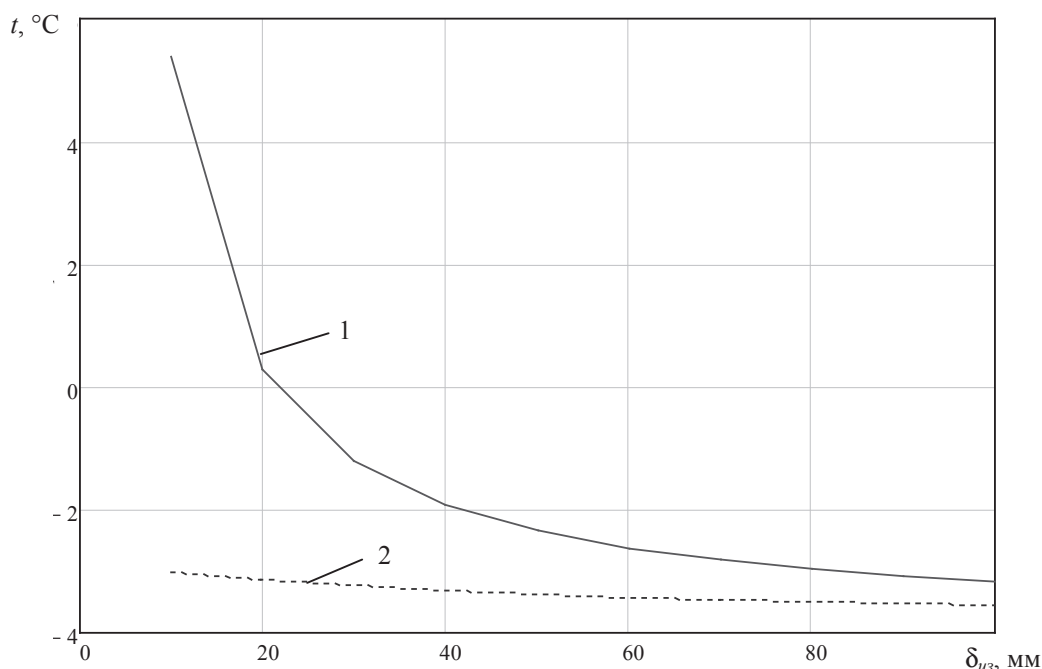




Толщина теплоизоляции: а – 10, 20, 30 мм; б – 10...140 мм.  
Начальная температура вина минус 4 °С. Температура воздуха в помещении плюс 16 °С.

**Рис. 3 – Зависимость изменения температуры виномагериала в зоне установки охлаждающей рубашки при различных значениях толщины теплоизоляции во времени (режим отключения циркуляции рассола)**

Результаты сравнительных расчетов тепловых режимов акратофора при заполнении охлаждающей рубашки рассолом и воздухом приведены на рис. 4.



В охлаждающей рубашке находится: 1 – рассол; 2 – воздух  
Начальная температура вина минус 4 °С. Температура воздуха в помещении плюс 16 °С.

**Рис. 4 – Зависимость температуры конца хранения виноматериала в течении 6 суток от значения толщины теплоизоляции**

Значительное превосходство воздуха над рассолом в качестве теплоизолятора иллюстрирует рис. 4. Так, например, при наличии воздуха в охлаждающей рубашке и теплоизоляции толщиной 10 мм за 6 суток температура виноматериала поднимется лишь на 1 °С.

Расчет теплоизоляционных покрытий транспортных магистралей системы холодоснабжения ЗАО «ОЗШВ» проведен для трубы Ø108×5 мм.

С учетом условий эксплуатации транспортных магистралей температура наружного воздуха была принята равной  $t_{\theta} = 35$  °С, а коэффициент теплообмена  $\alpha_{\theta} = 50$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Эти параметры соответствуют жестким условиям эксплуатации (в летний период в Одесском регионе).

В основе расчета тепловых режимов транспортных магистралей лежит уравнение теплопередачи через цилиндрическую поверхность [3]. С его помощью можно записать уравнение теплового баланса между конвективной и кондуктивными составляющими процесса теплопередачи

$$\alpha_{\theta} \cdot F_{нар} \cdot (t_{\theta} - t_{с.нар}) = \frac{2 \pi \cdot H \cdot (t_{с.нар} - t_{с.вн})}{\frac{1}{\lambda_{из}} \cdot \ln \frac{d_{нар.из}}{d_{вн.из}} + \frac{1}{\lambda_{тр}} \cdot \ln \frac{d_{вн.из}}{d_{вн.труб}}}, \quad (11)$$

где  $F_{нар}$  — площадь наружной поверхности теплоизоляции, м<sup>2</sup>;

$t_{с.нар}$ ,  $t_{с.вн}$  — температура, соответственно, наружной и внутренней поверхности трубы, °С;

$\lambda_{из}$ ,  $\lambda_{тр}$  — коэффициент теплопроводности материала, соответственно, теплоизоляции и трубы;

$d_{нар.из}$ ,  $d_{вн.из}$  — диаметры теплоизоляции, соответственно, наружный и внутренний, м;

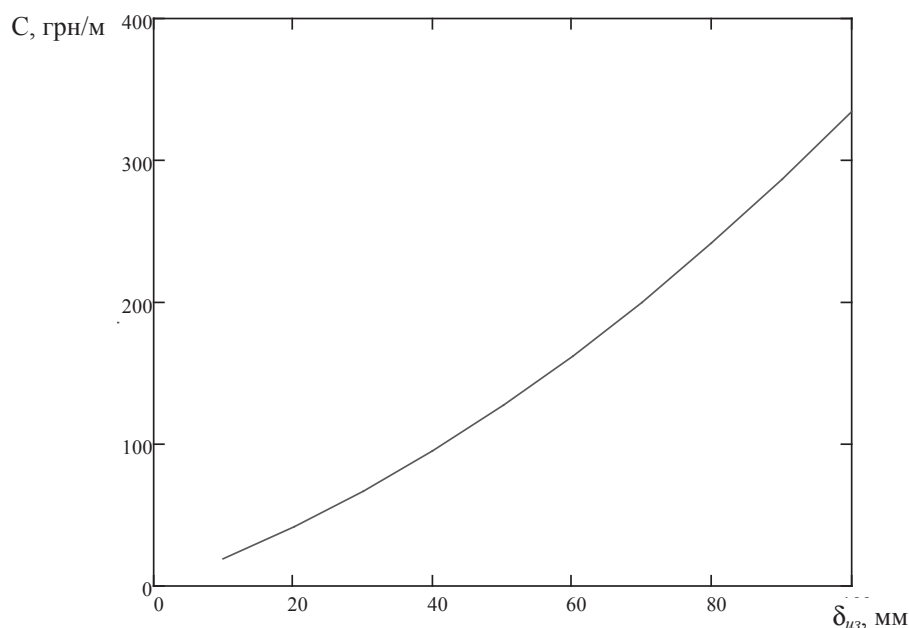
$d_{вн.труб}$  — внутренний диаметр трубы, м.

Анализ расчетной зависимости (11) показывает, что начиная с (50...60) мм и выше существенно эффекта теплоизоляционное покрытие не дает.

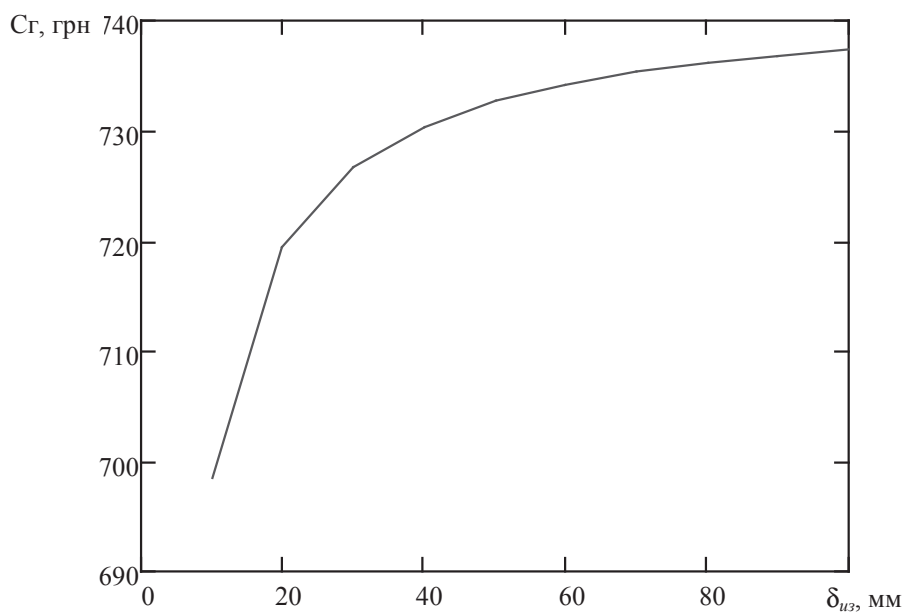
Стоимость теплоизоляции растет с увеличением толщины покрытия магистрального трубопровода (рис. 5).

Годовой экономический эффект от установки теплоизоляции в зависимости от толщины теплоизоляции приведен на рис. 6.





**Рис. 5 – Влияние толщины теплоизоляционного покрытия трубы Ø108×5 мм на стоимость 1 м теплоизоляции**



**Рис. 6 – Влияние толщины теплоизоляционного покрытия трубы Ø108×5 мм на годовой экономический эффект от установки теплоизоляции (длина магистрали 100 м)**

Анализ зависимости на рис. 6 показал, что начиная с толщины 60 мм, теплоизоляция дает достаточно постоянный эффект от снижения теплопритоков.

Срок окупаемости магистрального трубопровода Ø108×5 мм приведен в табл. 2.

**Таблица 2 – Срок окупаемости теплоизоляционного покрытия труб Ø108×5 мм при длине магистрали 100 м**

| Толщина теплоизоляции, мм | 10  | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 70    | 80    |
|---------------------------|-----|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Срок окупаемости, лет     | 2,2 | 2,57 | 3,04 | 4,53 | 5,77 | 7,67 | 10,92 | 17,48 |

### Выводы

1. По результатам анализа режимов работы акратофоров в стационарных условиях можно рекомендовать 60 мм нижним пределом толщины теплоизоляции на акратофорах. Срок окупаемости, при сложившейся на первый квартал 2010 года структуры цен на материалы и теплоносители, составляет: 1,14 года – для теплоизоляции 60 мм; 1,20 года – для 80 мм; 1,29 года – для 100 мм.
2. Анализ теплофизических процессов в нестационарных условиях работы акратофора (при отключении циркуляции рассола) показал наличие стратификации – расслоения разнонагретых слоев по высоте в виноматериале. Для ее устранения необходим внешний побудитель циркуляции, например, мешалка.
3. Особое внимание следует обратить на результаты моделирования нестационарных тепловых режимов акратофоров при заполнении объема охлаждающей рубашки акратофора воздухом.
4. Нижняя часть акратофора, незакрытая охлаждающей рубашкой, является "слабым звеном" с позиции теплопритоков. Предлагается компенсировать меньшее термическое сопротивление нижней части акратофора за счет установки большего, по сравнению с верхней частью акратофора, теплоизоляционного покрытия.

### Литература

1. Богданов С.Н. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справочник [Текст] / С.Н. Богданов, С.И. Бурцев, О.П. Иванов, А.В. Куприянова. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб.: СПбГАХПТ, 1999. – 320 с.
2. Чубик И.А. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов [Текст] / И.А. Чубик, А.М. Маслов. – Изд-во 2-е, доп. – М.: Пищевая промышленность, 1970. – 184 с.
3. Крейт Ф. Основы теплопередачи [Текст] / Ф. Крейт, У. Блэк. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
4. Гоголин А.А. Осушение воздуха холодильными машинами. Научное сообщение [Текст]. – М.: Госторгиздат, 1962. – 103 с.
5. Дульчев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре [Текст]. – М.: Высш. шк., 1984. – 247 с.
6. Джалурия Й. Естественная конвекция. Тепло- и массообмен [Текст]. – М.: Мир, 1983. – 400 с.
7. Исаченко В.П. Теплопередача [Текст] / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – Изд. 4-е перераб. и доп. – М.: Энергия, 1981. – 416 с.
8. Справочник по теплообменникам [Текст]. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – Т. 1. – 560 с.
9. Теория теплообмена [Текст] / С.И. Исаев, Н.А. Кожин, В.И. Кофанов и др.; Под ред. А.И. Леонтьева. – М.: Высш. школа, 1979. – 495 с.
10. Теплотехнический справочник [Текст] / Под ред. С.Г. Герасимова. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. – Т.1. – 728 с.
11. Бобров Ю.Л. Теплоизоляционные материалы и конструкции [Текст] / Ю.Л. Бобров, Е.Т. Овчаренко, Б.М. Шойхет, Е.Ю. Петухова. – М.: ИНФРА-М, 2003. – 268 с.

УДК 629.125:621.575.932:621.565.92

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАЧКИ СУДНА НА ПРОЦЕССЫ ГРАВИТАЦИОННОГО ПЛЕНОЧНОГО ТЕЧЕНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА В ТЕПЛООБМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ АБСОРБЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ (АХА)

Очеретяный Ю.А, Кирилов В.Х., д-р техн. наук, профессор  
Одесский национальный морской университет, Одесса  
Титлов А.С., д-р техн. наук, доцент  
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

*Представлены результаты моделирования процессов гравитационного течения жидкой фазы рабочего тела абсорбционных холодильных агрегатов в условиях морской качки на малых судах. Приведены расчетные условия стабильной эксплуатации холодильных приборов*

*The results of design of processes of gravity flow of liquid phase of working body of absorption refrigeration aggregates are presented in the conditions of the marine tossing on small courts. Calculation stable external of refrigeration devices environments are resulted*

Ключевые слова: абсорбционный холодильный агрегат, малые суда, гравитационное течение, качка