

УДК 621.565.2.: 621.565.958

Тимощенко В.М., Горбенко Г.А.,
Иваненко Н.И.*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ЛЬДА В
АККУМУЛЯТОРЕ ХОЛОДА С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ

Розроблено математичну модель холодильної установки на базі акумулятора холоду з фазовим переходом і на її основі створено розрахункову програму. Проведено розрахункові експерименти, які встановлюють вплив циклічності роботи холодильної машини на ріст товщі льоду в акумуляторі холоду, який працює на проміжному теплоносії.

Разработана математическая модель холодильной установки на базе аккумулятора холода с фазовым переходом и на ее основе создана вычислительная программа. Проведены численные эксперименты, устанавливающие влияние цикличности работы холодильной машины на рост толщины льда в аккумуляторе холода, работающем на промежуточном теплоносителе.

A mathematical model of refrigeration installation with ice bank was developed and realized in software. Numerical studies carried out by means of mathematical model showed an dependence of refrigeration unit recurrence on intensity of ice formation in ice bank with intermediate working fluid.

d – диаметр;
 F – площадь поверхности;
 Gr – число Грасгофа;
 i – энтальпия;
 l – длина;
 M – масса;
 m – массовый расход;
 N – мощность;
 Nu – число Нуссельта;
 Pr – число Прандтля;
 Q – количество теплоты;
 r – теплота фазового перехода;
 T, t – температура;
 $\Delta T, \Delta t$ – температурный напор;
 α – коэффициент теплоотдачи;
 AX – аккумулятор холода;

АХфп – аккумулятор холода с фазовым переходом;
 ХМ – холодильная машина.

Индексы

эг – этиленгликоль;
 в – вода;
 л – лед;
 тр – труба;
 σ – сигма фаза;
 ж – жидкость;
 конв – конвективный теплообмен;
 теплопр – теплообмен теплопроводностью;
 конд – конденсация;
 к – конденсатор;
 и – испаритель;
 λ – коэффициент теплопроводности;
 τ – время.

Аккумулятор холода предназначен для погашения пиковых нагрузок потребления холода в системах хладоснабжения предприятий. Наиболее предпочтительным для применения в подобных системах является аккумулятор холода с фазовым переходом. В таких аккумуляторах аккумуляция холода происходит не только за счет теплоемкости рабочего тела, но и за счет теплоты фазового перехода, что позволяет существенно улучшить габаритно-массовые характе-

ристики АХ. Процесс образования льда – энергоемкий, длительный и сложный по своей физической сущности процесс, поэтому весьма важно научно обоснованное математическое описание этого процесса. В настоящее время существует достаточное количество методических рекомендаций, позволяющих описать процесс образования льда и рассчитать хладоемкость АХфп. Однако остается много вопросов, не рассмотренных в предлагаемых методиках 1,2. К ним относятся

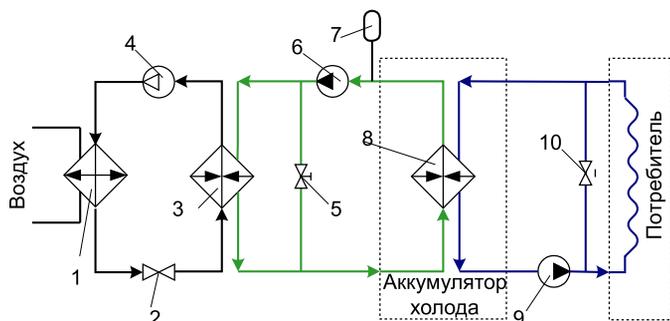


Рис. 1. Принципиальная схема холодильной установки на базе аккумулятора холода с фазовым переходом:

1 – конденсатор холодильной машины; 2 – терморегулирующий вентиль; 3 – испаритель холодильной машины; 4 – компрессор холодильной машины; 5 – вентиль байпасной магистрали; 6 – насос гликолевого контура; 7 – бак гликолевого контура; 8 – теплообменник аккумулятора холода; 9 – насос водяного контура; 10 – вентиль байпасной магистрали.

вопросы согласования работы холодильной машины с аккумулятором холода, обеспечение равномерности процесса образования льда, подбора системы регулирования и др.

Особо важным является согласование работы ХМ с АХ в системах с промежуточным теплоносителем. В этих системах ХМ работает не постоянно. Цикличность ее работы зависит от системы регулирования. Включение и выключение ХМ существенно влияет на процесс образования льда. Поэтому возникает задача исследования процесса образования льда с учетом цикличности работы ХМ и выбора оптимального алгоритма управления.

Холодильная установка на базе АХфп, работающая на промежуточном теплоносителе, представляет собой трехконтурную замкнутую систему. Принципиальная схема ХМ с АХфп изображена на рис 1.

Система работает следующим образом: на режиме зарядки за счет подачи в теплообменник АХ хладоносителя (этиленгликоля) с температурой ниже температуры кристаллизации воды образуется градиент температуры между наружной поверхностью труб и водой. В результате этого на поверхности теплообменника аккумулятора холода образуется лед.

Математическая модель образования льда в холодильных установках на базе АХфп должна адекватно описывать совместные процессы тепло- и массообмена между водой, льдом и хладоносителем с учетом работы ХМ. Известные математические модели описывают процессы тепло- и массообмена только в АХфп и учитывают изменение параметров водной среды в АХ в процессе образования льда только в виде упрощенных эмпирических зависимостей [1,2,3]. Однако в процессе работы холодильных установок также изменяется температура хладоносителя, т. к. она зависит от условий работы холодильной машины, условий взаимодействия с окружающей средой, интенсивности тепло- и массообменных процессов на поверхности образующегося льда. Поэтому для более адекватного описания процессов в системе математическая модель должна учитывать все перечисленные эффекты.

Моделирование АХфп целесообразно проводить с использованием методики системного моделирования, что позволяет решать возникающие задачи в приемлемые сроки с минимальными затратами времени и средств [4].

Любая математическая модель описывает вполне определенные свойства изучаемого объекта. В случае АХфп такими свойствами являются тепло- и массообменные процессы в воде, во льду, хладоносителе (этиленгликоле), хладагенте (R22) и элементах конструкции. Математическую модель для описания свойств АХфп строим с использованием методики идеализированных элементов. Описание идеализированных элементов и их физический смысл дано в работе [4]. Совокупность идеализированных элементов образует нодализационную схему, которая является геометрическим образом математической модели.

На рис. 2 представлена нодализационная схема холодильной установки на базе АХфп. В схеме контрольные объемы 1,2,7-11,18-j+1 совместно с ветвями m_1-m_{14} описывают процессы тепло- и массообмена в хладоносителе. Контрольные объемы 3-6 – в холодильной машине. Контрольные объемы 12-17 – в контуре потребителя. Передача теплоты во льду и между льдом и водой описывается тепловыми проводниками.

Система уравнений в общем виде для контрольного объема, моделирующего бак АХ, со-

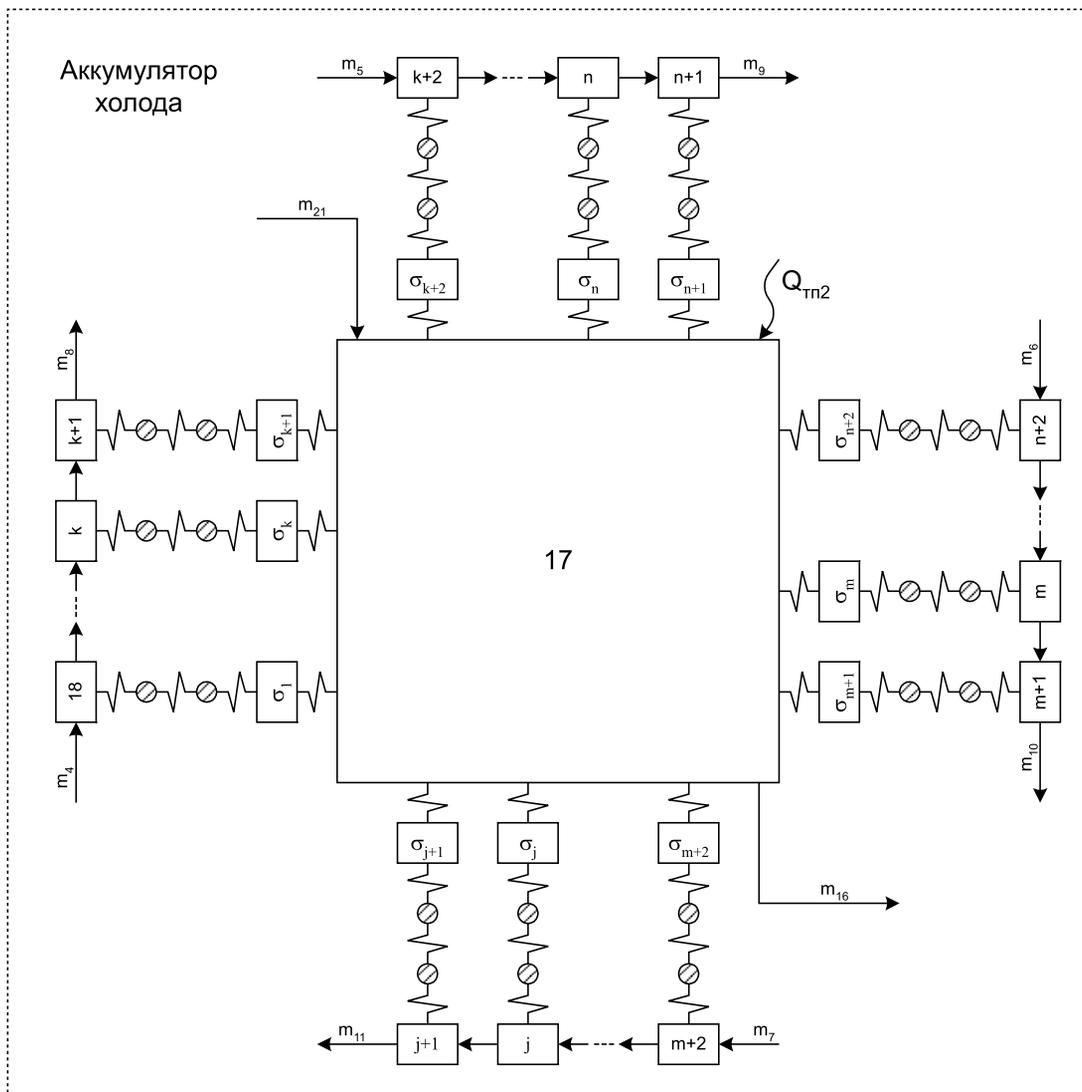
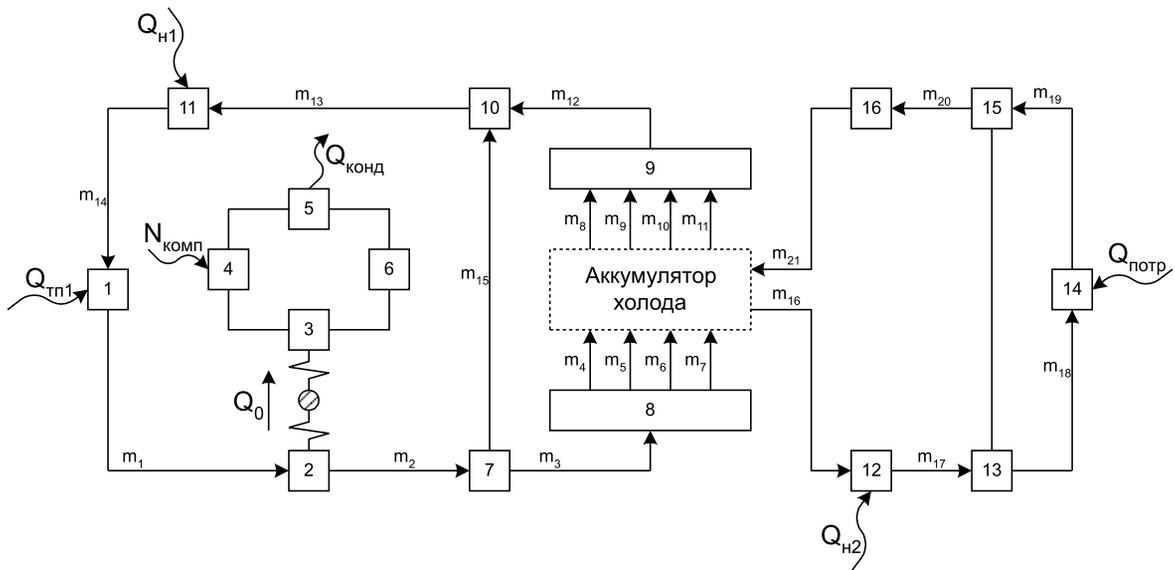


Рис. 2. Нодализационная схема холодильной установки.

стоит из уравнения закона сохранения массы и закона сохранения энергии.

$$\left. \begin{aligned} \frac{dM}{d\tau} &= \sum_{i=1}^n m_i \\ \frac{dU}{d\tau} &= \sum_{i=1}^n (m \cdot i)_i + \sum_{k=1}^{n_1} Q_k + N \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Правая часть уравнения сохранения массы $\sum_{i=1}^n m_i$ представляет собой сумму массовых расходов

жидкости через бак аккумулятора холода. Так как во время образования льда вода через бак аккумулятора холода не циркулирует, то эта величина представляет собой источник или сток массы. В нашем случае вода претерпевает фазовый переход из жидкого состояния в кристаллическое (образование льда на поверхности труб), поэтому поверхность теплообменника аккумулятора холода можно представить в виде источника или стока массы.

С учетом уравнения баланса энергии

$$Q_{\text{эГ}} - Q_{\text{В}} = m(i + r)$$

закон сохранения массы можно записать в виде

$$\frac{dM}{d\tau} = \frac{Q_{\text{эГ}} - Q_{\text{В}}}{i + r} \quad (2)$$

Так как нас интересует изменение толщины льда на цилиндрической поверхности, перепишем уравнение (2) в виде

$$\delta_{\text{Л}} \frac{d\delta_{\text{Л}}}{d\tau} = \frac{Q_{\text{эГ}} - Q_{\text{В}}}{2(i+r)\pi \cdot l_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{Л}}} \quad \text{или} \quad (3)$$

$$\frac{d\delta_{\text{Л}}}{d\tau} = \frac{Q_{\text{эГ}} - Q_{\text{В}}}{(i+r)\rho_{\text{Л}} \cdot F_{\text{Л}}}$$

Для описания процесса тепломассообмена на границе раздела “вода-лед” введем фиктивный контрольный объем, моделирующий так называемую σ -фазу [4].

В нашем случае с помощью σ -фазы моделируется тонкий слой льда, контактирующий с водой (рис. 3). Таким образом, в пределах σ -фазы происходят основные процессы взаимодействия воды и льда в процессе фазовых переходов. Из-за того, что σ -фаза моделирует одновременно две среды (собственно поверхность льда и тонкий

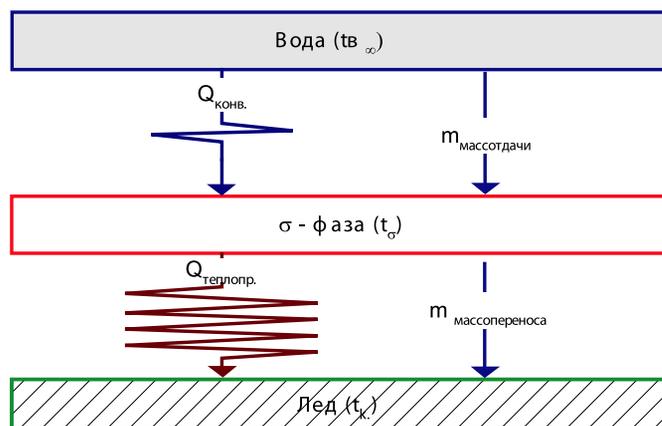


Рис. 3. Моделирование тонкого слоя льда, примыкающего к воде.

слой воды, находящийся у этой поверхности), в общем случае она характеризуется параметрами, относящимися как ко льду (температурой $t_{\text{Л}}$), так и к тонкому слою воды (температурой $t_{\text{В}}$).

Считается, что в пределах σ -фазы существует температурное равновесие между льдом и водой, поэтому σ -фаза может быть охарактеризована всего одним параметром: температурой $t_{\sigma} = t_{\text{Л}} = t_{\text{В}}$.

Так как массой, теплоемкостью, импульсом и кинетической энергией σ -фазы можно пренебречь, то в этом случае нестационарные дифференциальные уравнения законов сохранения массы и энергии, описывающие σ -фазу, вырождаются в алгебраические уравнения балансов массы и энергии. Таким образом, температуру поверхности t можно получить из уравнения баланса энергии для σ -фазы:

$$Q_{\text{конв}} - Q_{\text{теплопр}} + (\dot{m} \cdot i)_{\text{ж}} = 0 \quad (4)$$

Конвективный тепловой поток определяется из выражения

$$Q_{\text{конв}} = \alpha_{\text{конв}} \cdot \pi \cdot d_1 \cdot (t_{\text{В}} - t_{\sigma})$$

Тепловой поток, вызванный теплопроводностью, записывается в виде:

$$Q_{\text{теплопр}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{Л}}}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \cdot (t_{\sigma} - t_{\text{Л}})$$

где d_1 – внутренний диаметр льда;

d_2 – наружный диаметр льда;

$t_{\text{Л}}$ – температура слоя льда, примыкающего к σ -фазе.

Учитывая, что члены, входящие в (4), зависят от температуры, температура поверхности t определяется из трансцендентного уравнения

$$t_{\sigma} - \frac{\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{л}}}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \cdot t_{\text{л}} + \alpha_{\text{конв}} \cdot \pi \cdot d_1 \cdot t_{\text{в}} + (\dot{m} \cdot i)_{\text{ж}}}{\alpha_{\text{конв}} \cdot \pi \cdot d_1 + \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{л}}}{\ln \frac{d_2}{d_1}}} = f(t_{\sigma}) = 0.$$

Конвективный коэффициент теплоотдачи к стенке трубы (поверхности льда) определяется по критериальной зависимости, предложенной Михеевой [5]:

$$\text{Nu} = 0,5 \cdot (\text{Gr}_{\text{ж}} \cdot \text{Pr}_{\text{ж}})^{0,25} \left(\frac{\text{Pr}_{\text{ж}}}{\text{Pr}_{\text{ст}}} \right)^{0,25}.$$

Данная зависимость применима в условиях свободной конвекции около горизонтальной трубы в большем объеме при числах $(\text{Gr} \cdot \text{Pr}) \geq 5 \cdot 10^2$.

Ввиду того, что коэффициент объемного расширения при охлаждении (нагреве) воды стремится к нулю при температуре, стремящейся к $3,98 \text{ }^{\circ}\text{C}$, значение числа $(\text{Gr} \cdot \text{Pr})$ также будет стремиться к нулю.

При числах $(\text{Gr} \cdot \text{Pr}) \leq 500$ теплота от воды к поверхности льда передается только за счет физической теплопроводности воды. В этом случае коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле [5]

$$\alpha = 0,5 \left(\frac{\lambda_{\text{ф}}}{d_2} \right).$$

Это явление, обусловленное аномальностью свойств воды вблизи $3,98 \text{ }^{\circ}\text{C}$, приводит к замедлению роста толщины льда и при достаточно большем объеме жидкости может вызвать его таяние.

Количество теплоты, переносимое от воды к поверхности льда, определяется на основе уравнения Ньютона – Рихмана

$$Q_{\text{в}} = \alpha_{\text{в}} \cdot F_{\text{л}} (t_{\text{в}} - t_{\text{л}}).$$

Так как температура поверхности льда (во время его образования не изменяется) равна температуре σ -фазы, можно записать

$$Q_{\text{в}} = \alpha_{\text{в}} \cdot F_{\text{л}} (t_{\text{в}} - t_{\gamma}).$$

Количество теплоты, переданное от поверхности льда к этиленгликолю, рассчитывается как для многослойной цилиндрической стенки.

$$Q_{\text{эГ}} = \frac{\pi \cdot l \cdot (t_{\sigma} - t_{\text{эГ}})}{\frac{1}{2\lambda_{\text{л}}} \ln \frac{d_{\text{л}}}{d_{\text{н}}} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{вн}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{эГ}} d_{\text{вн}}}}.$$

При данном подходе необходимо учесть, что в начальный момент времени лед на поверхности трубы отсутствует и температура σ -фазы равна температуре наружной стенки трубы. Как только поверхность стенки охладится ниже $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, температура σ -фазы принимает это значение и в дальнейшем не изменяется.

Для упрощения модели считаем, что в холодильной машине и контуре хладоносителя реализуются квазистационарные теплогидравлические процессы. В этом случае параметры процесса находим из следующей системы алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} Q_0 = k_0 F_0 \Delta \bar{T}_0 \\ Q_0 = m_1 i_1 - m_2 i_2 \\ Q_0 = f(T_{\text{к}}, T_{\text{и}}) \\ Q_{\text{к}} = Q_0 + N_{\text{комп}} \end{cases} \quad (5)$$

Неизвестными в данной системе уравнений являются: Q_0 – холодопроизводительность холодильной машины (количество теплоты, которое необходимо отвести от хладоносителя для получения нужной температуры); $Q_{\text{к}}$ – количество теплоты, которое необходимо отвести от хладагента в конденсаторе; $T_{\text{и}}$ – температура кипения хладагента в испарителе; $T_{\text{к}}$ – температура конденсации хладагента в конденсаторе; $N_{\text{комп}}$ – мощность компрессора.

В приведенной системе уравнений k_0 – коэффициент теплопередачи между хладоносителем и хладагентом в испарителе; $\Delta \bar{T}_0$ – среднелогарифмический температурный напор в испарителе.

Записав все уравнения для нодализационной схемы, показанной на рис. 2, получим систему алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающую процессы тепло- и массообмена в воде, во льду, хладоносителе и холодильной машине. Систему уравнений дополним

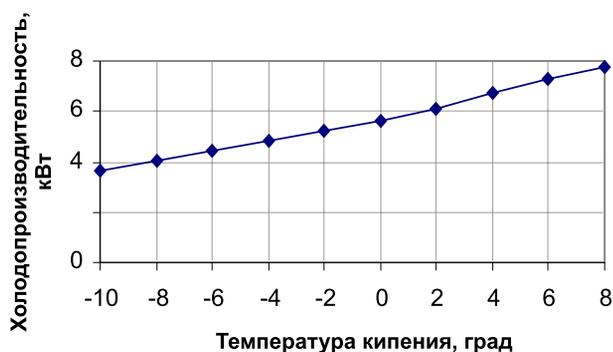


Рис. 4. Характеристика холодильной машины СВ-М-МТ-32 при температуре конденсации 30 °С.

начальными, граничными условиями, термическими и калорическими уравнениями состояния, а также выражениями для расчета коэффициентов теплоотдачи и теплофизических свойств. Систему уравнений решаем стандартным методом численного интегрирования — методом Гира.

Применим предложенную математическую модель для технологического процесса работы холодильной установки. Согласно технологическому циклу необходимо накопить 25 кВт холода в водо-ледяном трубчатом аккумуляторе холода, наружный диаметр труб 32,5 мм. В технологическом процессе используется холодильная машина СВ-М-МТ-32, рабочая характеристика которой представлена на рис.4. Поддержание рабочей температуры хладоносителя в контуре осуществ-

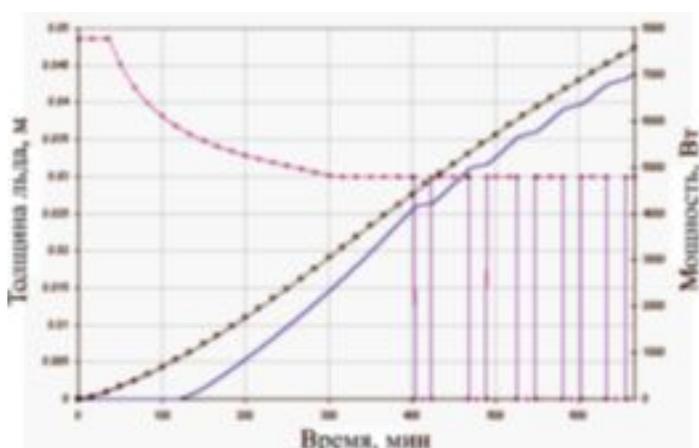


Рис. 5. Изменение толщины льда и мощность холодильной машины по времени: —□— стандартная методика [2]; — результаты расчета; —×— мощность холодильной машины.

ляется путем периодического включения и выключения холодильной машины (релейная система регулирования) б по показанию датчика температуры в баке гликолевого контура. Для нормальной работы компрессора холодильной машины вводятся ограничения по количеству пусков — остановов в час (не более 5). В начальный момент времени температура элементов АХ равна температуре окружающей среды, температура в контуре хладоносителя равна -8 ± 1 °С.

На рис. 5 показан результат расчета, полученного с помощью математической модели, описывающей процесс образования льда в поверхностном аккумуляторе холода с фазовым переходом и учитывающей влияние цикличности работы холодильной машины. На рис. 5 также приведен график роста толщины льда во времени, рассчитанный по стандартной методике. Из данного графика видно, что толщина льда в конце цикла намораживания, рассчитанная с помощью предложенной математической модели, меньше рассчитанной по стандартной методике на 7,5 %. В результате чего общая хладоемкость аккумулятора оказывается меньше расчетной на 12 %, что для аккумуляторов холода большой емкости составит недостачу холода в сотни киловатт часов.

Вывод

При проектировании систем хладоснабжения на базе аккумуляторов холода с фазовым переходом (работающих на промежуточном хладоносителе) необходимо учитывать цикличность работы холодильной машины.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Маринюк Б.Т.* Аппараты холодильных машин (теория и расчет). М.: Энергоатомиздат, 1995, 160 с.
2. *Чумак И.Г., Никульшина Д.Г.* Холодильные установки. Проектирование: Учеб. пособие для вузов. К.: Выща шк. Головное изд-во, 1988. 280 с.
3. *В.И. Колисненченко, А.И. Цаплин.* Тепло-массоперенос при кристаллизации под давлением.: Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.3. Свободная конвекция. Теплообмен при

химических превращениях. М.: Издательство МЭИ, 88 – 91 с.

4. *Г.А. Горбенко, П.Г. Гакал.* Математическое и физическое моделирование сложных тепло-энергетических систем // Удосконалення турбоустановок методами мат. і фіз. моделювання: Сб. наук. праць. Харків, ІПМаш НАН України, 2000. с. 69 – 75.

5. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. – Изд. 5-е перераб. и доп. – М.: Атомиздат. 1979, 416 с.

6. *В. А. Бесикерский, Е. П. Попов* Теория автоматического регулирования. М., Наука, 1972, 768 с.

Получено 27.08.2005 г.

УДК 532.516

БОНДАРЕНКО С.Г.², ЕЛИСЕЕВ В.И.², ЛУЦЕНКО В.И.¹

¹*Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины*

²*Днепропетровский национальный университет*

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АППАРАТОВ САХАРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Запропоновано та випробувано в промислових умовах спосіб підвищення ефективності процесів у вакуум-апараті для кристалізації цукру. На прикладі наближеної математичної моделі показано, що періодичні зміни зовнішнього тиску приводять до виникнення додаткового коливального руху шарів розчину, що повинно впливати на інтенсифікацію тепло-масообміну у кристалізаторі.

Предложен и опробован в промышленных условиях способ повышения эффективности процессов в вакуум-аппарате для кристаллизации сахара. На примере приближенной математической модели показано, что периодические изменения внешнего давления приводят к возникновению дополнительного колебательного движения слоев раствора, что должно оказывать интенсифицирующее воздействие на теплообмен в кристаллизаторе.

The way of increase of efficiency of processes in the vacuum - device for crystallization of sugar has been offered and tested in industrial conditions. By the example of the approached mathematical model it is shown, that periodic changes of external pressure result in occurrence of additional oscillatory movement of layers of a solution that should render intensifying influence on heat and mass transfer in a crystallizer.

A – амплитуда;

c_{μ} – коэффициент сопротивления;

D – диаметр канала;

H – теплота парообразования, высота слоя;

N – количество каналов;

p – давление;

p_a – атмосферное давление;

r – радиус;

S – площадь поперечного канала;

$S^I = \pi D^I{}^2 / 4$,

$S^{II} = \pi N D^{II}{}^2 / 4$

t – время;

u – скорость;

x – координата;

q – плотность теплового потока;

α – объемная доля компонента, коэффициент теплоотдачи;

ρ – плотность;

σ – коэффициент поверхностного натяжения;

τ – напряжение трения;

θ – угол смачивания ($3^\circ < \theta < 125^\circ$);

ω – круговая частота;

γ – показатель адиабаты.

Индексы

c – кристаллический сахар;

p – пар;

r – раствор;

pc – конечный радиус;

ωr – радиус отрыва;

S – насыщение;

0 – параметры при $x=0$;

H – параметры на поверхности слоя;

I – центральный (жидкостной) канал;

II – каналы с паровой фазой.