Основные характеристики трубчатого аккумулятора холода

Семенов Юрий Владимирович

Основными характеристиками аккумулятора холода (льдоаккумулятора) являются:
— аккумулирующая способность,
— требуемая холодопроизводительность,
— холодоотдача.

Аккумулирующая способность (кВт·час) — это количество энергии, которое может быть накоплено в виде водного льда в аккумуляторе холода и использовано для получения ледяной воды.
Требуемая холодопроизводительность (кВт) — это холодильная мощность подключаемой к аккумулятору холодильной установки, основное назначение которой — намораживание льда на поверхности труб льдоаккумулятора, погруженных в воду.
Холодоотдача (кВт) — это холодильная мощность, передаваемая воде при таянии льда в аккумуляторе холода. Именно она определяет способность аккумулятора холода компенсировать пиковые тепловые нагрузки.

1. Аккумулирующая способность

Аккумулирующая способность определяется:
— массой намороженного льда,
— удельной теплотой плавления льда.
Аккумулирующая способность обычно выражается не в кДж, а в кВт·час, и определяется по формуле:

$$A = \frac{m \cdot h}{3600}, \qquad (1)$$

где A — аккумулирующая способность, кВт·час;
m — масса намороженного льда, кг;
h — удельная теплота плавления льда, кДж/кг.

Получим формулы, связывающие аккумулирующую способность трубчатого льдоаккумулятора с его геометрическими характеристиками.
Для дальнейших расчетов принимаем плотность льда ρ = 917 кг/м^3, удельную теплоту плавления льда h = 333 кДж/кг = 3,33·10^5 Дж/кг, коэффициент теплопроводности льда $\lambda_Л$ = 2,3 Вт/(м·К).

© Семенов Ю.В., 2024

Рассматриваем трубу из нержавеющей стали (λ_T= 16 Вт/(м·К)) с наружным диаметром 20 мм и толщиной стенки 1 мм.

Подставляя в (1) значение удельной теплоты плавления льда, получим:

$$A = 0{,}0925 \cdot m\,,$$

где m — масса льда, кг.

Если масса льда выражается в тоннах, то

$$A = 92{,}5 \cdot M\,, \qquad (2)$$

где M — масса льда, т.

Масса льда равна произведению плотности льда на объем:

$$m = \rho \cdot V,$$

где m — масса льда, кг;

ρ — плотность льда, кг/м^3;

V — объем льда, м^3.

Объем льда V может быть рассчитан по формуле:

$$V = \pi(r_H^2 - r_0^2) \cdot l\,,$$

где $r_н$ — номинальный радиус льда (при расчетной толщине $\delta_н$), м;

r_0 — наружный радиус трубы (рис. 1), м;

l — суммарная длина труб в льдоаккумуляторе, м.

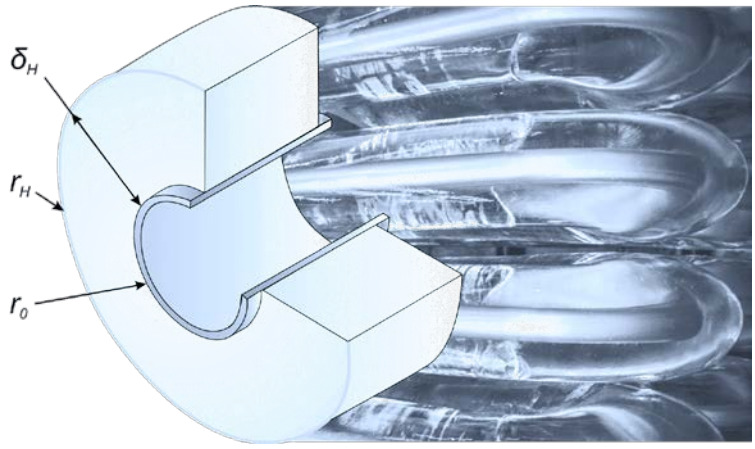


Рис. 1. *Геометрические характеристики льдоаккумулятора*

Подставляя в (1) значения, получим:

$$A = \frac{\pi \cdot \rho \cdot h \cdot (r_H^2 - r_0^2) \cdot l}{3600}.$$

При расчетных значениях плотности льда и удельной теплоты плавления льда получим взаимосвязь аккумулирующей способности и геометрических характеристик:

$$A = 267(r_H^2 - r_0^2) \cdot l\,.$$

© Семенов Ю.В., 2024

Преобразуем разность квадратов радиусов:

$$(r_H^2 - r_0^2) = (r_\text{Н} - r_0) \cdot (r_\text{Н} + r_0) = \delta_\text{Н} \cdot (\delta_\text{Н} + 2 \cdot r_0),$$

где $\delta_\text{Н} = r_\text{Н} - r_0$ — расчетная толщина льда, м.

Окончательно получим (в кВт·час):

$$A = 267 \cdot \delta_\text{Н} \cdot (\delta_\text{Н} + d_0) \cdot l\,, \quad (3)$$

где $d_0 = 2r_0$ — наружный диаметр трубы.

Все геометрические характеристики в формуле (3) измеряются в метрах.

Отсюда может быть определена длина труб в льдоаккумуляторе с заданной аккумулирующей способностью при известном диаметре трубы d_0 и расчетной толщине льда $\delta_\text{Н}$:

$$l = \frac{A}{267 \cdot \delta_\text{Н} \cdot (\delta_\text{Н} + d_0)}\,. \quad (4)$$

2. Требуемая холодопроизводительность

Для определения требуемой холодопроизводительности Q_0 установки, обеспечивающей намораживание льда, необходимо задаться временем «зарядки» льдоаккумулятора.

Для холодильных установок с прямым расширением Q_0 обычно определяют при расчетной температуре кипения хладагента t_0= –10°С.

Существует несколько рекомендаций для расчета Q_0.

Так в [3] рекомендуется определять Q_0 из расчета 10 кВт на 1 т льда, то есть:

$$Q_0 = 10M,$$

где M — масса льда, т;

Q_0— холодопроизводительность, кВт.

Так как масса льда и аккумулирующая способность связаны выражением (2), получим, что

$$A = 92{,}5 \cdot M = 9{,}25 \cdot Q_0$$

и

$$Q_0 = A/9{,}25 \approx 0{,}11 \cdot A.$$

При этом время «зарядки» составит:

$$\tau = \frac{A}{Q_0} = \frac{A}{0{,}11 \cdot A} \approx 9 \text{ час.}$$

По расчетам автора [1] для трубы с наружным диаметром 20 мм время полной «зарядки» составляет не менее 5 часов при температуре воды равной 0°С.

© Семенов Ю.В., 2024

Данные по отечественным производителям льдоаккумуляторов показывают, что расчетная холодопроизводительность чаще всего определяется, исходя из среднего времени «зарядки» 8 часов. При этом допускается выбор холодильной установки, обеспечивающей время «зарядки» от 4 до 12 часов.

Требуемая холодопроизводительность Q_0 (кВт) в общем случае рассчитывается как:

$$Q_0 = \frac{A}{\tau},$$

где A — аккумулирующая способность, кВт·час;

τ — заданное время зарядки аккумулятора, час.

Полученное значение требуемой холодопроизводительности не должно быть меньше среднесуточной тепловой нагрузки на аккумулятор (с учетом коэффициента запаса) и проверяться на выполнение ряда специфических требований.

Пример 1

Льдоаккумулятор с аккумулирующей способностью 370 кВт·час выполнен из трубы с наружным диаметром 20 мм. Номинальная толщина льда составляет 35 мм. Определить длину трубы, массу льда и требуемую холодопроизводительность при различном времени зарядки.

Длину трубы рассчитаем по формуле (4):

$$l = \frac{A}{267 \cdot \delta_{\text{Н}} \cdot (\delta_{\text{Н}} + d_0)} = \frac{370}{267 \cdot 0{,}035 \cdot (0{,}035 + 0{,}02)} = 720 \text{ м}.$$

Масса льда определим из формулы (2):

$$M = \frac{A}{92{,}5} = 4 \text{ т} = 4000 \text{ кг}.$$

Требуемая холодопроизводительность установки зависит, прежде всего, от заданного времени зарядки льдоаккумулятора (см. таблицу 1).

***Таблица 1**. Q_0 при различном времени зарядки*

Время зарядки, час	Q_0, кВт
4	93
5	74
6	62
8	46
9	41
12	31

© Семенов Ю.В., 2024

3. Холодоотдача

Важнейшей характеристикой льдоаккумулятора является холодоотдача, которая должна обеспечивать компенсацию пиковых тепловых нагрузок, значительно превышающих среднесуточные.

Холодоотдача может быть рассчитана отдельно для каждой секции.

Холодоотдача $Q_{\text{Х}}$ (Вт) аккумулятора холода (секции) рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{Х}} = q_{\text{Х}} \cdot l, \qquad (5)$$

где $q_{\text{Х}}$ — удельная холодоотдача, Вт/м;

l —длина труб в льдоаккумуляторе (секции), м.

Удельная холодоотдача $q_{\text{Х}}$ определяется разностью тепловых потоков q_2 и q_1:

$$q_{\text{Х}} = q_2 - q_1, \qquad (6)$$

где q_1 — удельный тепловой поток, отводимый от поверхности внутрь слоя льда, Вт/м;

q_2 — удельный тепловой поток, подводимый к поверхности льда от воды, Вт/м.

Тепловой поток q_1 присутствует в случае, если при таянии льда работает холодильная установка, создающая градиент температуры по толщине льда. В результате чего часть тепла, подводимого от воды к поверхности льда, отводится внутрь слоя льда и не идет на его плавление.

Тепловой поток q_2 возникает за счет разности температур воды и поверхности тающего льда, на которой всегда поддерживается температура фазового перехода (0 °С).

3.1. Максимальная холодоотдача

Рассмотрим предельныйслучай, когда температура льда постоянна и равна 0°С.

Этот случай соответствует ситуации, когда льдоаккумулятор с полным запасом льда стоит некоторое время без нагрузки, и температуры льда и воды в баке выравниваются до 0 °С. Затем в бак поступает вода, и начинается процесс таяния льда.

Если температура льда по всей толщине равно 0 °С, то и$q_1 = 0$, и мы пренебрегаем теплоотводом внутрь слоя льда.

Если q_1= 0, то максимальная отдача холода от поверхности льда воде $q_{\text{Х}}^*$ равна тепловому потокуq_2, передаваемому от воды льду и идущему только на плавление льда (см. формулу (6)).

Тепловой поток q_2 может быть определен по известной формуле [4]:

$$q_2 = \alpha_{\text{В}} \cdot 2\pi \cdot r \cdot \Delta t_2 , \qquad (7)$$

© Семенов Ю.В., 2024

где Δt_2 — разность температуры воды $t_В$ и температуры поверхности льда, К;

$\alpha_В$ — коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности льда, Вт/(м^2·К);

r — текущий внешний радиус слоя льда, м.

В современных льдоаккумуляторах за счет барботажа коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности льда составляет от 350 до 850 Вт/(м^2·К) в зависимости от расхода воздуха [5]. В качестве расчетного может быть принято значение $\alpha_В$ = 500 Вт/(м^2·К) [6]. Так как $q_Х^* = q_2$, максимальная отдача холода $q_Х^*$ может быть рассчитана по той же формуле:

$$q_Х^* = \alpha_В \cdot 2\pi \cdot r \cdot \Delta t_2. \qquad (8)$$

На рис. 2 представлена зависимость $q_Х^*$ от толщины льда для различных значений$\alpha_В$ при $\Delta t_2 = 2$ К, а на рис. 3 — зависимость $q_Х^*$ от толщины льда для различных значений Δt_2 при $\alpha_В$ = 500 Вт/(м^2·К).

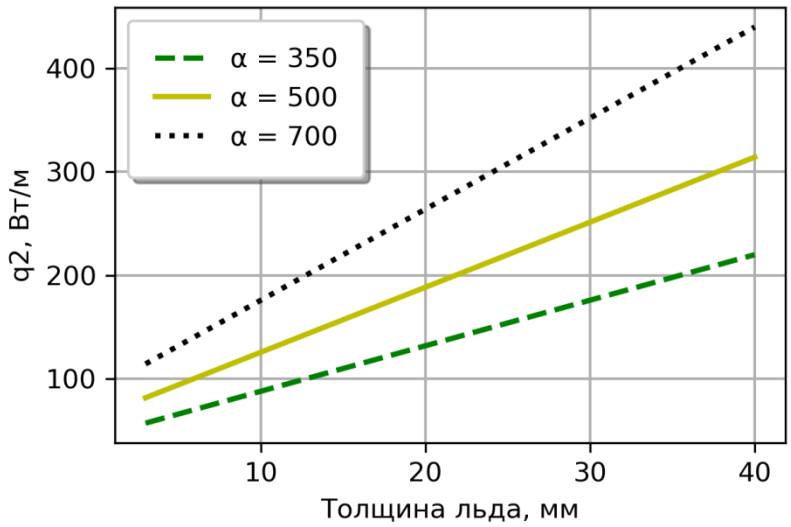


Рис. 2. *Зависимость $q_Х^*$ от толщины льда*

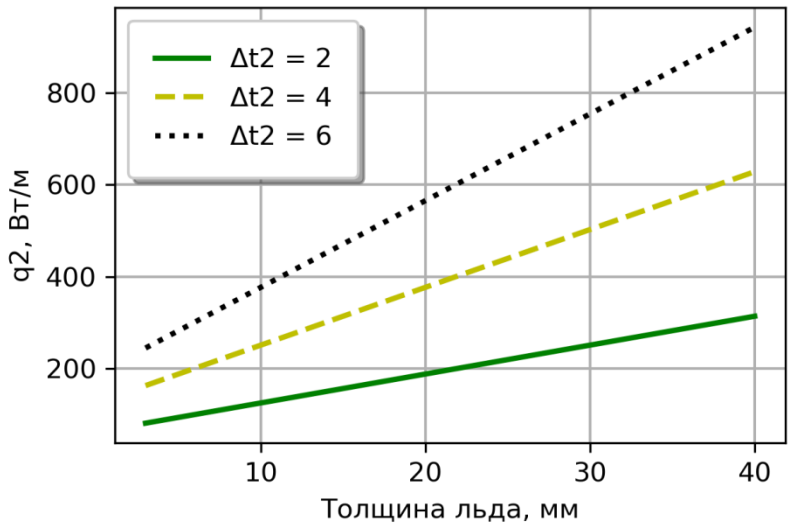


Рис. 3. *Зависимость $q_Х^*$ от толщины льда*

© Семенов Ю.В., 2024

Из рис. 2 и 3 видно, что $q_{\text{Х}}^{*}$ прямо пропорциональна толщине льда, так как с ростом толщины линейно возрастает длина окружности поверхностного слоя льда.

Так как барботаж обеспечивает практически одинаковые коэффициенты теплоотдачи для различных секций льдоаккумулятора, основным фактором, обеспечивающим высокую холодоотдачу является средняя температура воды, которая выше в первой секции (≈ +6 °С), чем в последней (≈ +2 °С).

Из-за этого лед на первой секции может полностью растаять при соответствующей нагрузке, в то время как на последней секции имеется еще запас льда.

Это подтверждается практикой эксплуатации льдоаккумуляторов [3].

3.2. Холодоотдача при работающей холодильной установке

При работающей во время разрядки льдоаккумулятора холодильной установке часть тепла будет отводиться внутрь льда.

Тогда (6) запишется в виде:

$$q_{\text{Х}} = q_{\text{Х}}^{*} - q_1. \qquad (9)$$

То есть отдача холода с поверхности льда $q_{\text{Х}}$ уменьшается на q_1 по сравнению с максимальной отдачей холода $q_{\text{Х}}^{*}$.

Рассмотрим два режима работы холодильной установки:

— при постоянной температуре кипения,

— при постоянном тепловом потоке.

В качестве постоянной температуры кипения хладагента внутри трубы обычно принимается температура кипения t_0 = –10 °С.

Поддержание постоянной температуры кипения в современных холодильных установках может быть обеспечено регулировкой производительности компрессора.

Поддержание постоянного теплового потока в холодильных установках, снабженных программируемыми контроллерами, можно обеспечить, в частности, программным изменением температуры кипения t_0 в льдоаккумуляторе (секции) [2].

3.2.1. Работа при постоянной температуре кипения

При работе холодильной установки тепловой поток q_1, отводимый от поверхности внутрь слоя льда, может быть определен по известной формуле для двухслойной цилиндрической стенки [1, 4]:

$$q_1 = \frac{2\pi \cdot \Delta t_1}{\frac{1}{\alpha_{\text{Х}} \cdot r_1} + \frac{1}{\lambda_{\text{Т}}}\ln(r_0/r_1) + \frac{1}{\lambda_{\text{Л}}}\ln(r/r_0)}, \qquad (10)$$

© Семенов Ю.В., 2024

где q_1 — тепловой поток, приведенный к единице длины трубы, Вт/м;

Δt_1— разность температур поверхности льда (0 °С) и температуры кипения внутри трубыt_0, К;

$\alpha_{\text{Х}}$ — коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности трубы, Вт/(м^2·К);

$\lambda_{\text{Л}}$ — коэффициент теплопроводности льда, Вт/(м·К);

$\lambda_{\text{Т}}$ — коэффициент теплопроводности материала трубы, Вт/(м·К);

r — текущий внешний радиус льда, м;

r_0— внешний радиус трубы, м;

r_1— внутренний радиус трубы, м.

Полагая, что характеристики трубы и условия теплоотдачи на внутренней поверхности трубы не изменяются, обозначим:

$$A = \frac{1}{\alpha_{\text{Х}} \cdot r_1} + \frac{1}{\lambda_{\text{Т}}} \ln(r_0/r_1) = const. \quad (11)$$

Получим

$$q_1 = \frac{2\pi \cdot \Delta t_1}{A + \frac{1}{\lambda_{\text{Л}}} \ln(r/r_0)}. \quad (12)$$

На рис. 4 приведена зависимость q_1 от толщины льда при различных коэффициентах теплоотдачи на внутренней поверхности трубы при температуре кипения –10 °С.

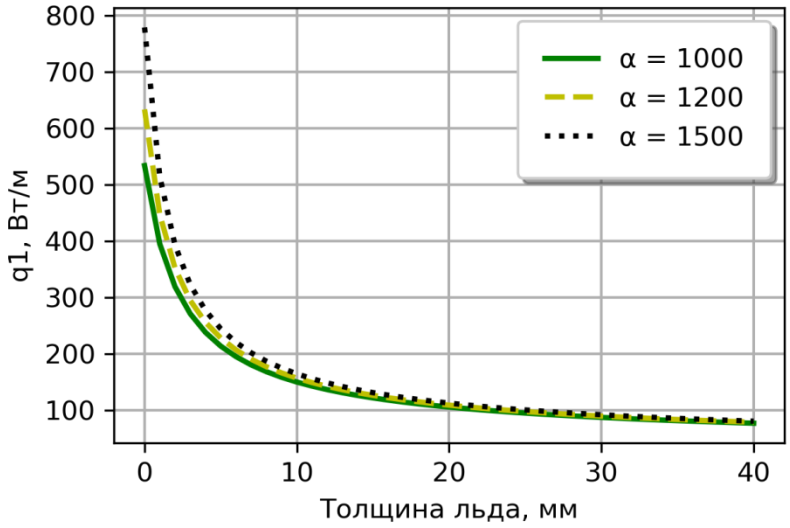


Рис. 4. *Зависимость q_1 от толщины льда*

Из графика следует, что зависимость q_1 от толщины обратно пропорциональна и практически не зависит от значения $\alpha_{\text{Х}}$ при толщине льда больше 10 мм.

После подстановки(12) в (9) получим:

$$q_{\text{Х}} = \alpha_{\text{В}} \cdot 2\pi \cdot r \cdot \Delta t_2 - \frac{2\pi \cdot \Delta t_1}{A + \frac{1}{\lambda_{\text{Л}}} \ln(r/r_0)}. \quad (13)$$

© Семенов Ю.В., 2024

Мы можем получить графическую интерпретацию совместной работы аккумулятора хололда и холодильной установки, совместив на одном графике зависимости q_1 и q_X^* от толщины льда.

На рис. 5 представлены зависимости от толщины льда q_1 (при α_X = 1000 Вт/(м^2·К) и t_0 = –10 °С) и q_X^* (при α_B = 500 Вт/(м^2·К) и при различных значениях Δt_2).

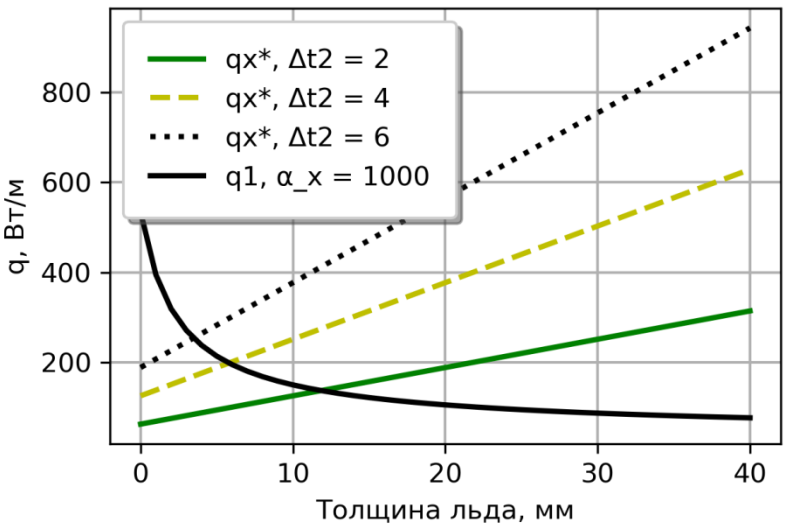


Рис. 5. *Зависимость q_1 и q_x* от толщины льда*

Из рисунка видно, что графики q_X^* пересекают график q_1 в различных точках, в зависимости от температуры воды (Δt_2).

Левее этих точек $q_1 > q_X^*$, и холодоотдача при этой толщине льда равна нулю, так как теплоотвод внутрь слоя льда больше поступления тепла от воды.

Как видно из рисунка, чем больше толщина льда, тем выше холодоотдача, равная разности q_X^* и q_1. Следовательно, для снятия пиковой нагрузки необходимо обеспечивать достаточную толщину льда.

Каждой точке $q_X^* = q_1$соответствует своя «критическая» толщина льда, при достижении которой таяние льда прекращается при данных условиях.

Как видно из рисунка, с ростом температуры воды, т.е. Δt_2, точка равновесия $q_X^* = q_1$ смещается влево, то есть толщина льда, при которой еще происходит таяние льда при работающей холодильной установке, уменьшается.

На рис. 6 для тех же исходных данных представлена зависимость холодоотдачи q_X от толщины льда при различных значениях Δt_2.

Как видно из рисунка, при толщине льда 12 мм холодоотдача равна нулю при Δt_2 = 2 К, в то время как при Δt_2 = 6 К она составляет около 300 Вт/м.

© Семенов Ю.В., 2024

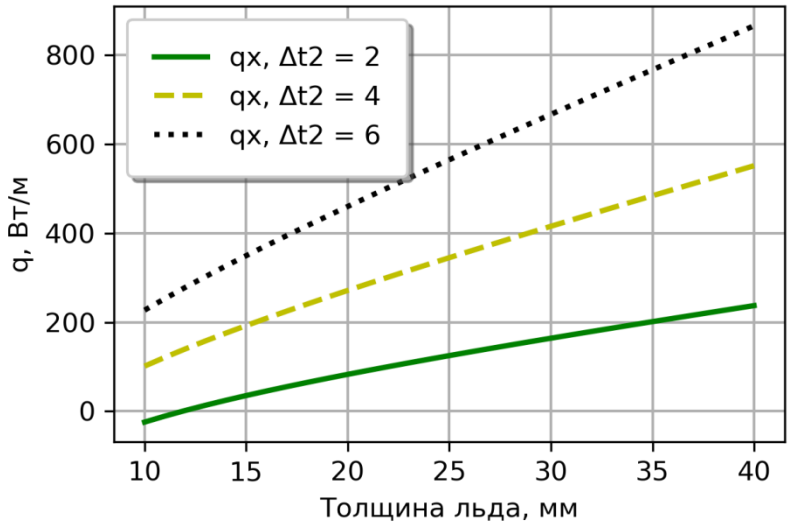


Рис. 6. *Зависимость q_X от толщины льда*

3.2.2. Работа при постоянном тепловом потоке

Как показано автором в [1] и [2] при расчете процессов намораживания и таяния льда для холодильных установок с прямым расширением хладагента мы можем использовать постоянное значение теплового потока q_1, то есть $q_1 = q_0 = const$, что соответствует наблюдаемому на практике снижению температуры кипения с ростом толщины льда. В предположении, что теплоотвод внутрь слоя льда является постоянным $q_1 = q_0 = const$, получим:

$$q_X = q_X^* - q_0.$$

Или:

$$q_X = \alpha_B \cdot 2\pi \cdot r \cdot \Delta t_2 - q_0. \qquad (14)$$

На рис. 7 и 8 зависимости q_X от толщины льда представлены в графическом виде для α_B = 500 Вт/(м^2·К) и различных значениях q_0 (см. таблицу 2).

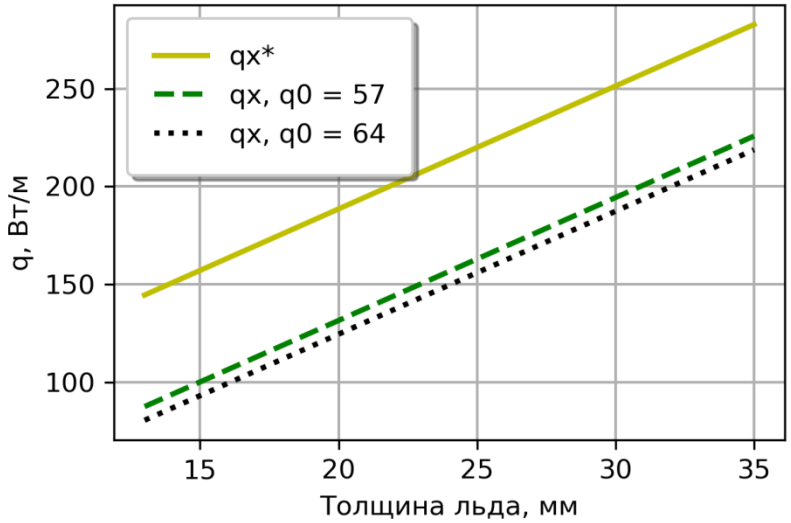


Рис. 7. *Зависимость q_X и q_X* от толщины льда при Δt_2 = 2 K*

© Семенов Ю.В., 2024

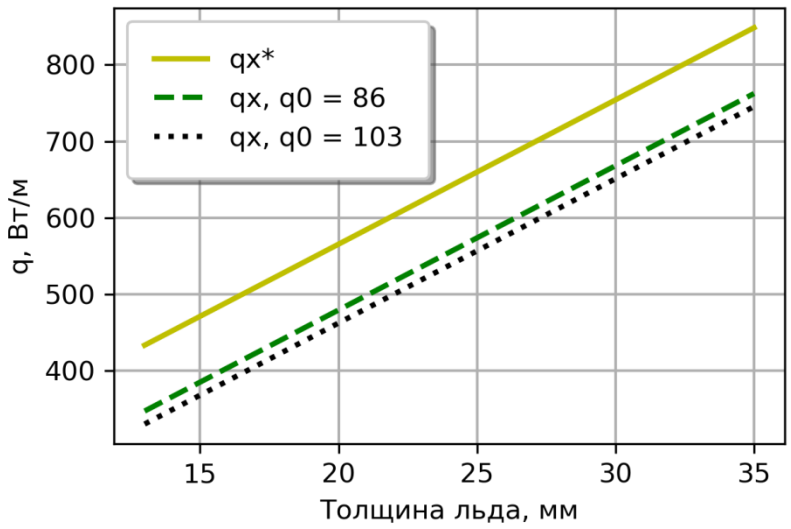


Рис. 8. *Зависимость q_X и q_X* от толщины льда при Δt_2 = 6 К*

Для сравнения на графики нанесена зависимость q_X^* от толщины льда.

Сравнение рис.7 и 8 показывает, что при Δt_2 = 6 К (входная секция аккумулятора) q_X превышает 500 Вт/м при толщине льда свыше 22 мм, в то время как при Δt_2=2 (выходная секция) даже максимальная холодоотдача q_X^* не превышает 300 Вт/м даже при расчетной толщине льда 35 мм.

Поэтому основная тепловая нагрузка ложится на первую и следующие за ней секции, которые могут обеспечивать хорошую холодоотдачу даже при работающей холодильной установке, замедляющей процесс таяния льда.

А последняя секция может вообще отключаться от холодильной установки в период таяния льда, чтобы обеспечить приемлемую холодоотдачу.

В любом случае для обеспечения гарантированного снятия пиковых нагрузок на аккумулятор холода необходимо в период действия таких нагрузок поддерживать на нем максимально возможную толщину льда.

Считаем, что холодильная установка создает постоянный тепловой поток через единицу длины внутренней поверхности трубы, и, соответственно, через весь слой льда.

Этот тепловой поток q_0 может быть определен как:

$$q_0 = \frac{Q_0}{l}, \qquad (15)$$

где q_0 — тепловой поток, приведенный к единице длины трубы, Вт/м;

Q_0— номинальная холодопроизводительность установки, обслуживающей льдоаккумулятор, Вт;

l— суммарная длина труб льдоаккумулятора, м;

Номинальную Q_0 обычно определяют при температуре кипения хладагента –10 °С.

© Семенов Ю.В., 2024

Чтобы при работе холодильной установки происходило одновременное таяние льда, тепловой поток q_0, создаваемый холодильной установкой не должен превышать значения q_X^*, рассчитанного по формуле (8), то есть:

$$q_0 < \alpha_{\text{В}} \cdot 2\pi \cdot r \cdot \Delta t_2.$$

Пример 2

Для льдоаккумулятора из предыдущего примера определить тепловой поток q_0, создаваемый холодильной установкой при времени зарядки 9 часов.
Длина труб у такого аккумулятора равна 720 м (см. пример 1), а расчетная холодопроизводительность установки составляет 41 кВт (см. таблицу 1).
Тепловой поток q_0 может быть определен по формуле (15):

$$q_0 = \frac{Q_0}{l} = \frac{41000}{720} = 57 \text{ Вт/м}.$$

При другом времени зарядки тепловой поток q_0 может быть определен из таблицы 2.

***Таблица 2**. Данные по q_0 при различном времени зарядки*

Время зарядки, час	q_0, Вт/м
4	128
5	103
6	86
8	64
9	57
12	43

Из таблицы 2 следует, что при времени зарядки от 12 до 4 часов q_0 находится в диапазоне 43…128 Вт/м.
Даже при Δt_2 = 2 К и q_0 = 64 Вт/м, соответствующим времени зарядки 8 часов, происходит таяние льда, и при толщине льда больше 20 мм удельная холодоотдача составляет около 125 Вт/м (см. рис. 7).

© Семенов Ю.В., 2024