

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ПОДБОРА
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЛЬДОАККУМУЛИРУЮЩИХ УСТАНОВОК
КОМПАНИИ «ОСТРОВ»**

Содержание

Введение

1. Назначение и области применения льдоаккумуляторов
2. Исходные данные для подбора льдоаккумуляторов
3. Определение расчетных параметров льдоаккумулирующей установки при простом графике тепловой нагрузки
4. Принцип определения потребной аккумулярующей способности, основанный на расчете накопления/расходования льда в баке-аккумуляторе
5. Поправочный коэффициент
6. Влияние на выбор оборудования графика тепловой нагрузки
7. Продолжительность разрядки льдоаккумулятора и её влияние на выбор оборудования
8. Выбор холодопроизводительности компрессорного агрегата
9. Критерии оптимизации льдоаккумулирующих установок
10. Последовательность подбора оборудования льдоаккумулирующей установки
11. Оптимальный рабочий режим и управление льдоаккумулирующими установками

Заключение

Введение

Установки с льдоаккумуляторами занимают особое место среди оборудования для производства ледяной воды. Это связано, главным образом, с тем, что такие установки во многих случаях позволяют существенно снизить затраты на приобретение холодильного оборудования, нуждаются в существенно меньшей установленной электрической мощности и, соответственно, меньших затрат на силовое электрооборудование, а также позволяют использовать льготный ночной тариф на электроэнергию.

Однако применение льдоаккумуляторов оправдано не во всех случаях, а для некоторых предприятий неприемлемо вообще. Специфика предприятий-потребителей ледяной воды такова, что для многих из них оптимальное решение не является очевидным и требует трудоемкого поиска.

Значительно различающиеся количества перерабатываемой продукции на однотипных предприятиях, разнообразие технологических процессов и используемого технологического оборудования (от самого современного до изготовленного несколько десятилетий назад), многообразие технических решений по производству ледяной воды, необходимость в анализе и расчете достаточно большого числа возможных вариантов и в тесном взаимодействии с Потребителем, требуют умения рассчитывать и подбирать оборудование непосредственно продавцом оборудования. Только в этом случае могут быть достигнуты быстрый выбор оптимальной схемы производства ледяной воды и максимальное удовлетворение потребностей Потребителя.

Назначение настоящей методики – дать основные сведения о подборе льдоаккумулирующего оборудования компании «Остров» для установок производства ледяной воды.

В тексте настоящей методики приняты следующие сокращения:

- ХА - холодильный агрегат;
- ХУ - холодильная установка.

1. Назначение и области применения льдоаккумуляторов

Аккумулятор холода представляет собой устройство для сохранения холода, заряжаемое во время снижения общего потребления холода и (или) в период действия льготных тарифов на потребляемую электроэнергию (например, ночью) и расходующее эту холодильную энергию в период пиковых нагрузок (например, днем).

Установки производства ледяной воды с льдоаккумуляторами нашли широкое применение в технологических процессах с выраженной суточной неравномерностью тепловых нагрузок. Основными областями, в которых часто встречаются такие тепловые нагрузки, являются: производство и переработка молока, кондиционирование, производства пива, кваса, птицепереработка и некоторые другие. Максимальные значения тепловых потоков, возникающие на таких производствах, могут иметь место в течение всего лишь нескольких часов в сутки. Использование холодильного оборудования, подобранного по максимальной тепловой нагрузке, приведет к неполной загрузке и продолжительным простоям мощного оборудования в течение суток, работе оборудования в течение длительного времени с неполной нагрузкой, а также к существенному увеличению капитальных затрат на покупку оборудования.

Использование льдоаккумулирующих установок, благодаря компенсации пиковых тепловых нагрузок за счет таяния аккумулялированного льда, позволяет уменьшить холодопроизводительность компрессора (компрессорного агрегата) до значения, составляющего порядка 30-60 % от максимального значения тепловой нагрузки. Значительное снижение холодильной мощности компрессорного оборудования приводит соответственно, к уменьшению потребляемой электрической мощности, уменьшению стоимости силового электрооборудования, снижению платы за потребляемую электрическую мощность.

Кроме того, как уже было сказано выше, льдоаккумулирующие холодильные установки позволяют накапливать лед в период действия льготного ночного тарифа на электроэнергию,

что позволяет существенно уменьшить эксплуатационные затраты.

ЗАО «Остров» производит льдоаккумуляторы на базе змеевиковых испарителей, погружаемых в баки с охлаждаемой водой. Эти льдоаккумуляторы имеют простую конструкцию, низкие эксплуатационные расходы, значительный рабочий ресурс. Надежность льдоаккумуляторов на базе змеевиковых испарителей подтверждена многолетним сроком эксплуатации большого количества установок.

2. Исходные данные для подбора льдоаккумуляторов

Подбор льдоаккумуляторов и холодильных агрегатов для установок производства ледяной воды производится на основании суточных графиков потребления холода (графиков тепловой нагрузки, см. опросный лист Приложения 1, 1а), в случае отсутствия графиков потребления холода – по данным, характеризующим тепловые технологические процессы, на основании которых могут быть рассчитаны суточные графики потребления холода (см. опросный лист Приложения 2, 2а), а также с учетом требований к оборудованию и его размещению, отражающих пожелания и предпочтения Потребителя (см. опросный лист Приложение 3).

Несмотря на разнообразие видов и форм исходных данных, выдаваемых Потребителем, для расчета и подбора льдоаккумуляторов все они должны быть пересчитаны в суточный график потребления холода, представленный в Приложении 1.

Некоторые сведения о порядке расчета графиков тепловых нагрузок по данным, характеризующим тепловые технологические процессы, приведены в Приложении 4.

Суточные графики потребления холода одного и того же предприятия, особенно в молочной отрасли, в разные периоды времени года сильно различаются. У большинства предприятий молочной отрасли максимальная нагрузка имеет место в летний период. Зимой нагрузка может упасть в 2 и более раз. Объясняется это, прежде всего, зависимостью производства молока от сезона, что приводит к значительной разнице между летней и зимней тепловыми нагрузками на многих молокоотоварных фермах и молокоперерабатывающих предприятиях. В то же время встречаются молзаводы с примерно одинаковыми графиками тепловой нагрузки в летние и в зимние периоды времени, что объясняется использованием в качестве сырья при недостатке натурального молока, восстановленного порошкового молока. Большинство молзаводов в один и тот же сезон имеют примерно одинаковую ежедневную приемку молока, тем не менее, есть заводы, количество принимаемого молока у которых отличается по дням недели.

Индивидуальный характер тепловых нагрузок практически на каждом предприятии делает невозможным стандартизацию таких предприятий по тепловым нагрузкам. Даже при одинаковых количествах принимаемого и перерабатываемого молока, предприятия молочной отрасли значительно отличаются по тепловым нагрузкам. Это является следствием различий в поставщиках (одни поставляют охлажденное молоко, другие неохлажденное), используемом технологическом оборудовании и технологий производства, в ассортиментах производимой продукции, и др.

В соответствии с этим подбор оборудования для установок производства ледяной воды во многих случаях требует индивидуального подхода.

Для правильного и оптимального подбора льдоаккумуляторного оборудования требуется несколько графиков тепловой нагрузки, а именно:

- 1) график максимальной нагрузки, действующих в сезон максимальной загрузки предприятия;
- 2) график номинальной нагрузки, представляющий наиболее часто используемый режим работы предприятия;
- 3) график минимальной нагрузки, действующих в сезон минимальной загрузки предприятия.

График максимальной нагрузки используется для выбора принципиальной схемы установ-

ки, типа, состава и холодильной мощности используемого холодильного оборудования, а также аккумулирующей способности (емкости) льдоаккумулятора.

Графики номинальной и минимальной нагрузок, совместно с графиком максимальной нагрузки необходимы для выбора системы управления льдоаккумулятором и правильной настройки датчиков толщины льда, устанавливаемых на испарителях льдоаккумуляторов.

На практике расчет и подбор льдоаккумулирующего оборудования и настройка датчиков толщины льда проводятся на основе одного графика: графика максимальной тепловой нагрузки. Отсюда вытекают все неблагоприятные последствия последующей эксплуатации: неправильная настройка датчиков толщины льда, образование глыб льда, повышенная температура ледяной воды и прочее.

Имеется еще один очень специфический вид исходных данных, которыми обычно пренебрегают. Это потери ледяной воды через негерметичности водопроводной распределительной сети предприятий, а также через устаревшие технологические аппараты, из которых отепленная вода иногда сливается в канализацию. На молокоприемных пунктах и небольших предприятиях, оснащенных современным оборудованием, потери ледяной воды в распределительных сетях равны нулю. На средних и крупных предприятиях, использующих устаревшее технологическое оборудование, потери ледяной воды могут быть весьма значительными и оказывать существенное влияние на тепловую нагрузку и подбор холодильного оборудования. Потери воды возмещаются подпиткой. Отепленная ледяная вода, возвращаемая из технологических аппаратов, в среднем имеет температуру 6-8⁰С, в то время как подпиточная артезианская 10-14⁰С, а подпиточная из городской сети питьевой воды летом может достигать до 20-25⁰С. Потери ледяной воды могут составить несколько тонн в сутки.

По этой причине, если есть сомнения в благополучности с потерями ледяной воды, необходимо проявлять инициативу и запрашивать соответствующие исходные данные.

У многих возникает вопрос, на какой расход воды должен быть рассчитан льдоаккумулятор с той или иной аккумулирующей способностью и какие исходные данные для определения расхода воды необходимы?

Расход ледяной воды, отбираемой из льдоаккумулятора определяется технологическим процессом, для которого предназначается ледяная вода, т.е. Потребителем (в паспортных данных на теплообменные аппараты указывается: на какое количество продукта они рассчитаны и какой расход воды для этого необходим). Что касается льдоаккумуляторов, то в них, чем интенсивнее идет циркуляция воды, тем лучше. В ранних конструкциях льдоаккумуляторов, в которых еще не использовалось барботирование воды сжатым воздухом, устанавливались активаторы или, по-другому, мешалки. Активаторы, представляли собой нагнетатели воды, создававшие специально организованное интенсивное движение воды в баке, дополнительно к циркуляции воды, обеспечиваемой подачей и возвратом в льдоаккумулятор воды из технологических цехов. Если потребление ледяной воды на технологию было бы неестественно большим, то в этом случае можно было бы обойтись без воздуходувок.

Если Потребитель не может определиться, каким расходом ему требуется отбирать ледяную воду из льдоаккумулятора, нужно попытаться собрать «по воде» как можно больше информации. По крайней мере, необходим такой параметр, как расчетная температура возвратной отепленной воды в период действия максимальной тепловой нагрузки (зависит от используемых технологий и оборудования технологических цехов). По этому параметру и значению максимальной тепловой нагрузки максимальный расход воды, на который должен быть рассчитан насосный агрегат, определяется по формуле:

$$M = N_{\max} \cdot 3600/4,2/\Delta T \text{ [кг/час]},$$

где, N_{\max} – максимальная тепловая нагрузка в Квт;

4,2 – теплоемкость воды в кДж/(кг*град);

ΔT – разность между расчетной температурой возвратной воды и температурой выдаваемой ледяной воды.

Если же от Потребителя не удастся получить значение расчетной температуры возвратной воды в период действия максимальной тепловой нагрузки, можно принять, что вода в технологическом оборудовании в среднем прогревается на $\Delta T = 5-6$ градусов. При принятом значении ΔT по приведенной выше формуле определяем расход воды, на который должен быть рассчитан насосный агрегат, обеспечивающий подачу ледяной воды потребителям (в кг/час) при принятых допущениях.

3. Определение расчетных параметров льдоаккумулирующей установки при простом графике тепловой нагрузки

Основная задача расчета параметров льдоаккумулирующей установки – определение количества холода, которое необходимо запасти в аккумуляторе при заданном графике тепловых нагрузок и выбираемой холодопроизводительности компрессорного агрегата.

Расчет аккумуляторов холода начинается с определения среднесуточной тепловой нагрузки (среднесуточного теплопритока) по графику тепловой нагрузки. Для упрощения и большей наглядности расчетных формул количественные значения тепла и холода будем выражать в кВт·ч (в соответствии с международной системой измерения СИ количества тепла и холода измеряются в Дж).

Суммарный суточный теплоприток вычисляется по формуле:

$$Q_{\text{сут тепло}} = \sum q_i \cdot \Delta \tau_i,$$

где q_i – постоянная нагрузка в течение i -го интервала времени, кВт;

$\Delta \tau_i$ – интервал времени с постоянной нагрузкой, ч.

Среднесуточная тепловая нагрузка:

$$q_{\text{ср сут}} = Q_{\text{сут тепло}}/24$$

Суммарная потребность холода в сутки и, соответственно, суточная выработка холода холодильным агрегатом ($Q_{\text{сут ХА}}$) равны суммарному суточному теплопритоку:

$$Q_{\text{сут ХА}} = Q_{\text{сут тепло}},$$

а минимальная холодопроизводительность холодильного агрегата для льдоаккумулирующей холодильной установки ($q_{\text{ХА мин}}$) будет равна среднесуточной тепловой нагрузке:

$$q_{\text{ХА мин}} = q_{\text{ср сут}}$$

Вышеприведенная минимальная холодопроизводительность холодильного агрегата определена из условия продолжительности его работы 24-часа в сутки. На практике продолжительность работы холодильного агрегата рекомендуется принимать в пределах 20-22 ч/сутки. В этой связи расчетная холодопроизводительность холодильного агрегата ($q_{\text{ХА расч}}$), например, для 20-ти часовой продолжительности работы в сутки будет равна:

$$q_{\text{ХА расч}} = Q_{\text{сут ХА}}/20$$

На рис. 1 приведен один из возможных графиков тепловой нагрузки (график изменения нагрузки на холодильный агрегат). В соответствии с этим графиком:

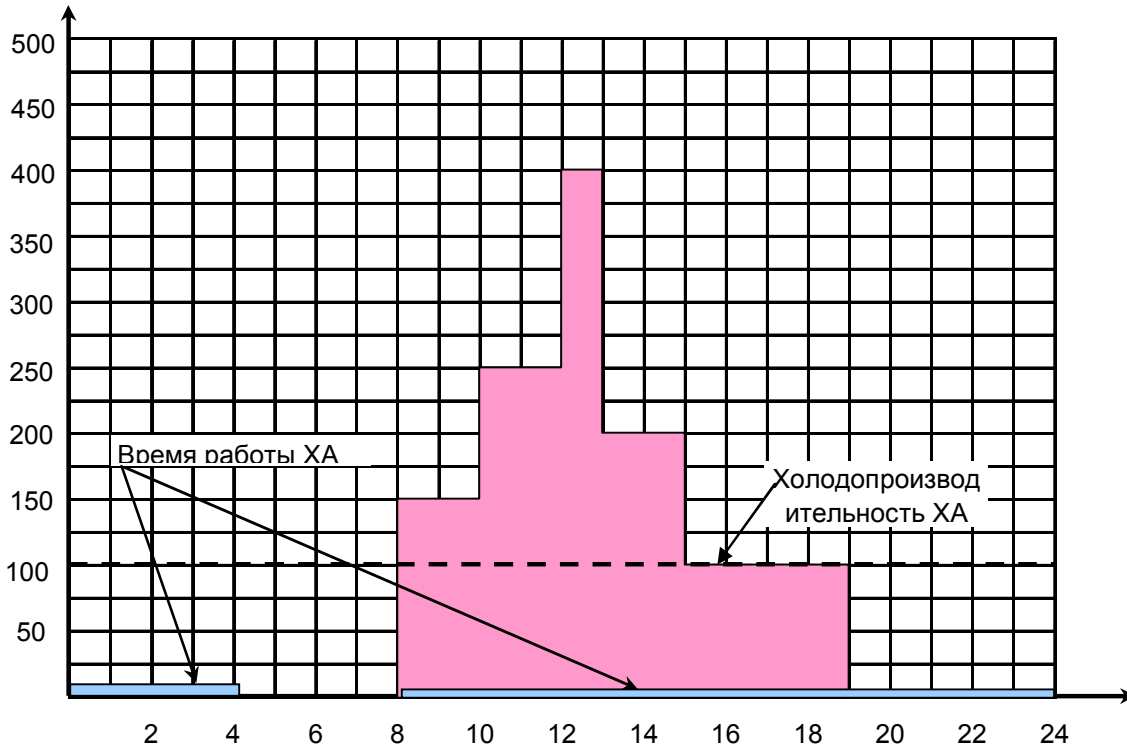


Рис. 1

$$Q_{\text{сут тепло}} = \sum q_i \cdot \Delta\tau_i = 150 \cdot 2 + 250 \cdot 2 + 400 \cdot 1 + 200 \cdot 2 + 100 \cdot 4 = 2000 \text{ [кВт}\cdot\text{ч]}$$

$$q_{\text{ср суг}} = Q_{\text{сут тепло}}/24 = 2000/24 = 83,3 \text{ [кВт]}$$

$$q_{\text{ХА мин}} = q_{\text{ср суг}} = 83,3 \text{ [кВт]}$$

$$Q_{\text{сут ХА}} = Q_{\text{сут тепло}}, = 2000 \text{ [кВт}\cdot\text{ч]}$$

$$q_{\text{ХА расч}} = Q_{\text{сут ХА}}/20 = 2000/20 = 100 \text{ [кВт]}$$

Количество холода, которое необходимо запасти в баке-аккумуляторе, определяется по формуле:

$$Q_{\text{ак}} = \sum (q_i - q_{\text{ХА расч}}) \cdot \Delta\tau_i,$$

где $(q_i - q_{\text{ХА расч}})$ – превышение нагрузки по сравнению со среднесуточной холодопроизводительностью холодильного агрегата. Для рассматриваемого нами примера

$$Q_{\text{ак}} = (150 - 100) \cdot 2 + (250 - 100) \cdot 2 + (400 - 100) \cdot 1 + (200 - 100) \cdot 2 = 900 \text{ [кВт}\cdot\text{ч]}$$

Из сопоставления приведенного подсчета $Q_{\text{ак}}$ с рис. 1 видно, что количество холода, подлежащее накоплению в баке-аккумуляторе (потребная аккумулирующая способность или емкость льдоаккумулятора) есть не что иное, как площадь фигуры, образуемой внутренней частью графика тепловой нагрузки, возвышающейся над линией холодопроизводительности холодильного агрегата. Указанная площадь выражается в кВт·ч (ось ординат – киловатты, ось абсцисс – часы).

Полученное значение в кВт·ч переводится в кг льда следующим образом: величина емкости умножается на 3600 (количество секунд в часе) и делится на 333 (кДж/кг, теплота плавления льда или, по-другому, теплота фазового перехода лед-вода). Для величины 900 кВт·ч полу-

чаем:

$$900 \text{ кВт} \cdot 3600 \text{ сек} / 333 \text{ кДж/кг} = 9730 \text{ кг льда.}$$

Приведенная методика является наиболее известной методикой расчета и определения требуемой аккумулирующей способности льдоаккумулятора. Она очень наглядна для понимания сути расчета аккумулирующей способности, дает представление о физическом смысле процедуры подбора льдоаккумуляторов и позволяет легко представить различные процессы в льдоаккумуляторе в зависимости от тех или иных изменений.

К сожалению, приведенная методика дает правильный результат только для простейших тепловых нагрузок – постоянно нарастающих до максимального значения, а затем постоянно снижающихся до минимума (без падений тепловой нагрузки ниже линии среднесуточной нагрузки на участке графика от начала таяния льда до его полного стаивания), т.е. для случаев, когда в течение цикла работы льдоаккумулятора имеется только один период намораживания и один последующий период стаивания намороженного льда.

Если же в течение суточного цикла имеется несколько периодов намораживания/стаивания, рассмотренная методика может дать существенную ошибку в сторону завышения льдоаккумулирующей способности аккумулятора.

Рассмотрим пример графика тепловой нагрузки представленный на рис 2, встречающийся при охлаждении молока на молокоприемных пунктах.

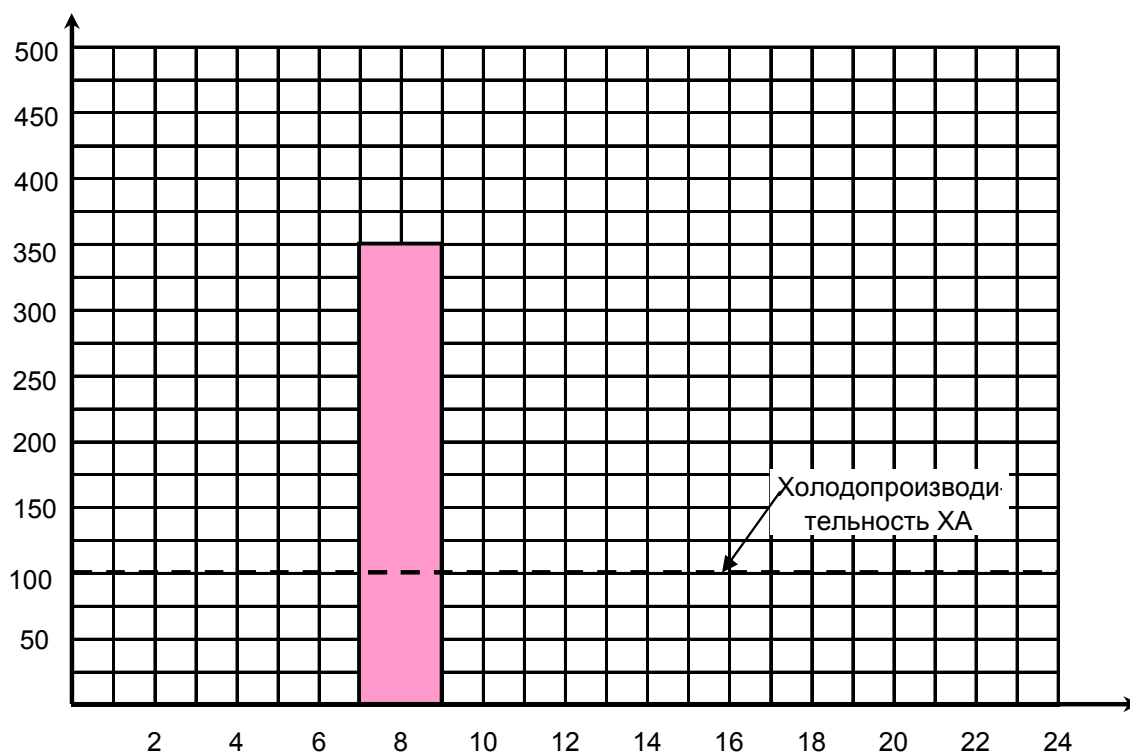


Рис.

2

В соответствии с расчетом по вышеизложенной методике требуется льдоаккумулятор с аккумулирующей способностью:

$$Q_{\text{ак}} = (350 - 100) \cdot 2 = 500 \text{ [кВт} \cdot \text{ч]} \text{ или } 5405 \text{ кг льда}$$

Рассмотрим также следующий пример графика тепловой нагрузки представленный на рис 3, представляющий собой график рис. 2 дополненный еще одним пиком тепловой нагрузки. Такая тепловая нагрузка характерна для охлаждения молока на молочно-товарных фермах и молокоприемных пунктах.

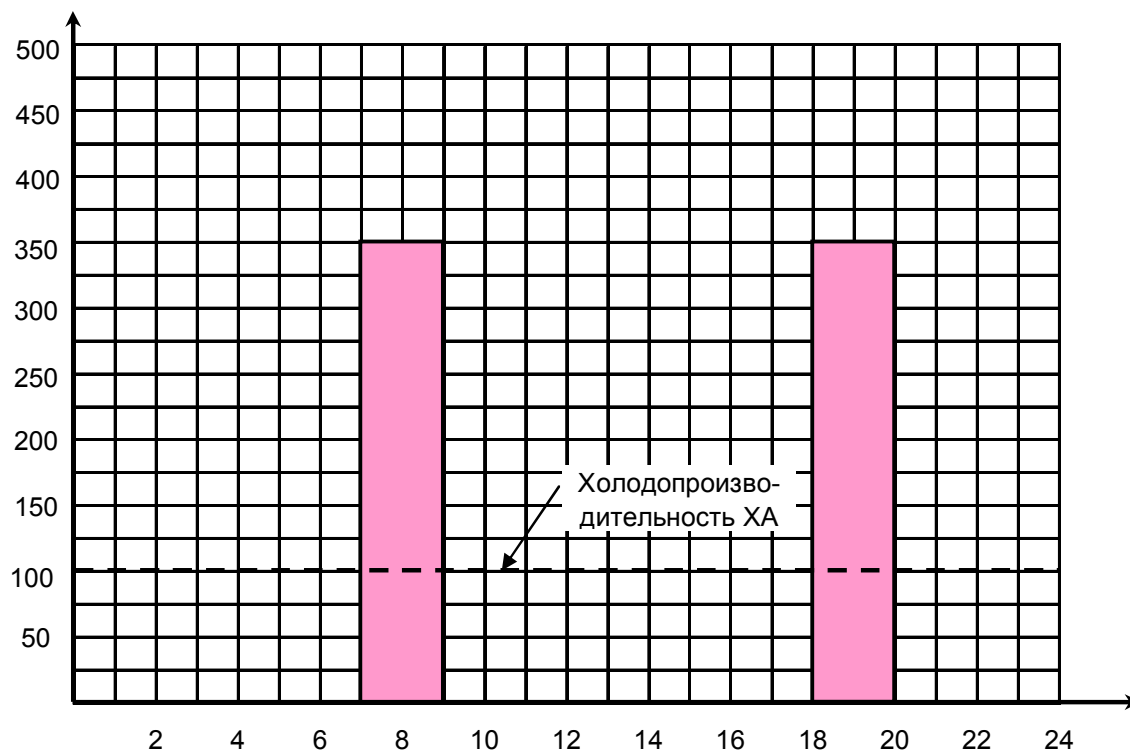


Рис. 3

В соответствии с расчетом по вышеизложенной методике требуется льдоаккумулятор с аккумуляющей способностью:

$$Q_{\text{ак}} = (350 - 100) \cdot 2 + (350 - 100) \cdot 2 = 1000 \text{ [кВт}\cdot\text{ч]} \text{ или } 10810 \text{ кг льда}$$

На самом деле для компенсации тепловой нагрузки, представленной на рис. 3, достаточно льдоаккумулятора с аккумуляющей способностью 500 кВт·ч или 5405 кг льда. Объясняется это тем, что время наморозки льда при выбранной холодопроизводительности холодильного агрегата составляет 5 часов (500 кВт·ч/100 кВт). Между первым и вторым пиками тепловой нагрузки промежуток времени составляет 9 часов. По этой причине реальная работа льдоаккумуляторной системы будет выглядеть следующим образом: замороженный лед (5405 кг) в период с 7 до 9 часов полностью растает, затем в течение последующих 5-ти часов (с 9 до 14 часов) достигается повторное заполнение льдоаккумулятора льдом, с 14 до 18 часов заполненный льдом аккумулятор будет стоять с выключенным холодильным агрегатом, в 18 часов начнется повторное стаивание льда, которое завершится в 20 часов; в 18 часов (с небольшой задержкой) включится холодильный агрегат, который будет работать в течение всего процесса стаивания льда и далее, к часу ночи он наморозит полный аккумулятор льда и выключится. Установка готова к повторному циклу работы.

4. Принцип определения потребной аккумуляющей способности, основанный на расчете накопления/расходования льда в баке-аккумуляторе

Графики тепловых нагрузок современных молокоперерабатывающих заводов, как правило, имеют значительно более сложный вид, чем рассмотренные в предыдущем разделе. Для исключения недостатков вышерассмотренной методики и получения достоверных результатов, обеспечивающих реальные потребности производств, используется методика расчета потребной аккумуляющей способности аккумулятора холода, основанная на расчете накопления-расходования льда в баке-льдоаккумуляторе в течение суточного рабочего цикла.

Суть методики заключается в следующем.

1) Рабочий цикл льдоаккумулятора (обычно 24 часа, но может быть и другим) в зависимости от графика тепловой нагрузки разбиваем на i участков с постоянной тепловой нагрузкой с временным шагом $\Delta\tau_i$ (если заданы почасовые нагрузки – на 24 участка, если тепловая нагрузка задана с более мелким шагом, то на большее количество участков, соответствующих более мелкому шагу). Величина $\Delta\tau_i$ выбирается таковой, чтобы тепловую нагрузку, действующую на этом промежутке времени, можно было бы принять за постоянную.

2) Расчет начинаем с 0 часов 00 мин. Так как количество льда, которое в реальном режиме работы будет содержаться в баке-аккумуляторе в этот момент времени, неизвестно принимаем массу льда в баке-аккумуляторе в 0 часов 00 минут равной 0.

3) Определяем ориентировочное значение холодильной мощности (основываясь на личном опыте предыдущих расчетов, или исходя из обобщенных данных, что мощность холодильного агрегата льдоаккумулирующей установки составляет 30-60% от пикового значения). Ориентируясь на полученное значение холодопроизводительности выбираем из каталога холодильных агрегатов наиболее близкий по значению мощности холодильный агрегат и уточняем значение его холодопроизводительности для расчетных условий ($T_{кип} = -10^{\circ}\text{C}$, $T_{перегр} = 10$ град, $T_{конд}$ в зависимости от региона и принятых условий эксплуатации).

4) Для каждого участка, начиная с первого, определяем разницу между тепловой нагрузкой (q_i) и холодопроизводительностью холодильного агрегата ($q_{ХА}$):

$$\Delta q_i = q_i - q_{ХА}$$

При положительном значении Δq_i будет не хватать холода для компенсации тепловой нагрузки и избыточное количество тепла должно компенсироваться тающим льдом.

Отрицательное значение Δq_i соответствует избытку холода, и на участке действия этой нагрузки будет иметь место аккумуляция льда.

5) Для положительного значения Δq_i производим расчет количества льда, таяние которого обеспечит компенсацию теплового потока Δq_i . Расчет проводится по формуле:

$$M_{\text{разрядки}} = (\Delta q_i * \Delta\tau_i) / 333.$$

Для отрицательного значения Δq_i производим расчет количества аккумулируемого льда:

$$M_{\text{зарядки}} = (q_{ХА} - q_i) * \Delta\tau_i / 333,$$

где:

Δq_i – разница между действующей тепловой нагрузкой и холодопроизводительностью холодильного агрегата, кВт;

$\Delta\tau_i$ – временной шаг (продолжительность действия тепловой мощности Δq_i), секунды.

$q_{ХА}$ – мощность холодильного агрегата, кВт;

333 – теплота плавления льда в кДж/кг.

Таблица 1

Тепловой баланс
Тконд = 45°С

Холодопроизводительность, кВт
Поправочный коэффициент

315,9 AM-3xHSK6461-H-ADE
1,1

Время	Тепловая нагрузка (задано)	Тепловая нагрузка (расчет)	Холодопроизводительность ХМ	Тепловая нагрузка, компенс. таян. льда	Таяние льда	Намораживание льда	Запас льда
ч	кВт	кВт	кВт	кВт	кг	кг	кг
							0
0-1	54,5	60,0	315,9	0,0	0	2792	2792
1-2	54,5	60,0	315,9	0,0	0	2792	5584
2-3	54,5	60,0	315,9	0,0	0	2792	8377
3-4	54,5	60,0	315,9	0,0	0	2792	11169
4-5	26,5	29,2	315,9	0,0	0	3128	14297
5-6	26,5	29,2	315,9	0,0	0	3128	17425
6-7	26,5	29,2	315,9	0,0	0	3128	20553
7-8	54,5	60,0	315,9	0,0	0	2792	23345
8-9	54,5	60,0	315,9	0,0	0	2792	26138
9-10	54,5	60,0	315,9	0,0	0	2792	28930
10-11	448,7	493,6	315,9	177,7	1938	0	26991
11-12	448,7	493,6	315,9	177,7	1938	0	25053
12-13	492,9	542,2	315,9	226,3	2469	0	22584
13-14	525,0	577,5	315,9	261,6	2854	0	19731
14-15	408,1	448,9	315,9	133,0	1451	0	18280
15-16	513,8	565,2	315,9	249,3	2719	0	15560
16-17	437,3	481,0	315,9	165,1	1801	0	13759
17-18	330,6	363,7	315,9	47,8	521	0	13238
18-19	330,6	363,7	315,9	47,8	521	0	12717
19-20	285,1	313,6	315,9	0,0	0	25	12742
20-21	50,4	55,4	315,9	0,0	0	2841	15583
21-22	67,9	74,7	315,9	0,0	0	2631	18214
22-23	26,5	29,2	315,9	0,0	0	3128	21343
23-24	54,5	60,0	315,9	0,0	0	2792	24135

б) для каждого расчетного участка определяем количество льда в льдоаккумуляторе. Последовательно, начиная с 1-го участка и заканчивая последним, к количеству льда (вернее к его математическому выражению) на предыдущем участке прибавляем $M_{\text{зарядки}}$ или вычитаем $M_{\text{разрядки}}$. В результате получаем график накопления/расходования льда в аккумуляторе холода.

Один из возможных вариантов расчетов с помощью таблиц Excel, по приведенной в настоящем разделе методике, приведен в таблице 1.

7) Основные условия работоспособности системы аккумуляции холода:

а) количество льда в баке-аккумуляторе в конце 24-часового цикла должно быть не меньше, чем в начале цикла;

б) недопустимость ситуации, при которой израсходован весь лед внутри цикла, а тепловая нагрузка превышает холодопроизводительность холодильного агрегата.

Проверяем результаты расчетов, полученных в таблице 1, на соответствие этим условиям.

Количество льда в баке-аккумуляторе, принятое на начало расчета соответствует «0», количество льда в баке в конце рабочего цикла «24135». Условия «ба» выполняется. Холодопроизводительность холодильного агрегата достаточна.

Если бы количество льда в баке-аккумуляторе в конце рабочего цикла было бы меньше «0» это означало бы, что производительность холодильного агрегата выбрана недостаточной и необходимо проводить повторный расчет по таблице 1 с холодильным агрегатом с большей производительностью.

8) Другое важнейшее условие работоспособности системы аккумуляции холода: в течение рабочего цикла льдоаккумулятор должен полностью разряжаться и вновь заряжаться (если после завершения рабочего цикла в баке-аккумуляторе будет оставаться некоторый остаток льда, то остатки льда после последующих циклов будут накладываться и в конце концов в баке-аккумуляторе образуется глыба льда).

Исходя из этого условия принимаем, что полная разрядка аккумулятора будет соответствовать точке с минимальным значением «запас льда» в баке-аккумуляторе, т.е. значению «запас льда» равным «12717». Для того чтобы в этой точке (конец периода 18-19 ч) установился «0», вместо «0», обозначающего начальное количество льда в баке-аккумуляторе, вводим значение «12717», поменяв знак перед ним на противоположный. В итоге получаем результат, представленный в таблице 2.

9) Из таблицы 2 следует, что максимальное расчетное количество льда в баке-аккумуляторе 16213 кг.

Таким образом, в настоящем разделе описан принцип определения потребной аккумулярующей способности льдоаккумулятора, основанный на расчете накопления/расходования льда в баке-аккумуляторе.

Если по данным столбца «Запас льда» построить график, то это будет график изменения количества льда в баке-аккумуляторе при отсутствии ограничивающих условий, имеющих место в реальном льдоаккумуляторе в результате управления накоплением льда. Для определения по графику изменения количества льда в льдоаккумуляторе потребной аккумулярующей способности необходимо провести анализ математической модели графика и учесть ограничивающие условия, определяемые принятыми методами регулирования количества льда в баке.

Регулирование количества льда в аккумуляторах компании «Остров» производится с помощью датчиков толщины льда. При достижении заданной толщины намораживаемого льда датчик формирует команду на автоматическое выключение холодильного агрегата, при стаивании некоторого количества льда до задаваемой толщины (обычно меньшей толщины замороженного льда на 1-2 мм) датчик выдает команду на включение холодильного агрегата. С учетом этого график накопления/расходования (изменения количества) льда в баке-аккумуляторе, представленный в таблице 2 может быть интерпретирован следующим образом: в конце периода 18-19 ч лед в баке-аккумуляторе полностью расходуется; к концу временного периода 23-24 ч, т.е. к 0 часам в баке-аккумуляторе накопится 11418 кг льда. Датчик толщины льда должен быть настроен на накопление в баке максимального потребного количества льда, в нашем случае – на 16213 кг. Поскольку к 0.00 часам в баке такого количества льда не будет накоплено и необходимо еще заморозить $16313 - 11418 = 4795$ кг льда компрессорный агрегат продолжит работу. Темп намораживания льда составит 2792 кг льда в час. При этом темпе примерно в 1.43 аккумулятора будет заполнен и по команде от датчика компрессорный агрегат будет выключен. На отрезке времени от 1.43 до 10.00 действуют относительно небольшие тепловые нагрузки. В результате этого в льдоаккумуляторе будет происходить постоянное стаивание льда. При уменьшении толщины льда на заранее определенную и выставленную величину льда (обычно 1-2 мм) произойдет автоматическое включение компрессорного агрегата и домораживание льда в баке до заполнения льдоаккумулятора. Циклов «подтаивание-домораживание» может быть несколько. Более подробно – в разделе «Оптимальный рабочий режим и управление льдоаккумуляторами».

В результате постоянного подтаивания льда к моменту появления серьезной тепловой на-

грузки в льдоаккумуляторе может оказаться меньше льда, чем рассчитанные 16213 кг. Учет этого фактора производится поправочным коэффициентом, более подробно характеризуемым далее.

Таблица 2

Тепловой баланс
Тконд = 45°С

Холодопроизводительность, кВт **315,9** AM-3xHNSK6461-H-ADE
Поправочный коэффициент **1,1**

Время	Тепловая нагрузка (задано)	Тепловая нагрузка (расчет)	Холодопроизводительность ХМ	Тепловая нагрузка, компенс. таян. льда	Таяние льда	Наморозивание льда	Запас льда
ч	кВт	кВт	кВт	кВт	кг	кг	кг
							-12717
0-1	54,5	60,0	315,9	0,0	0	2792	-9925
1-2	54,5	60,0	315,9	0,0	0	2792	-7133
2-3	54,5	60,0	315,9	0,0	0	2792	-4340
3-4	54,5	60,0	315,9	0,0	0	2792	-1548
4-5	26,5	29,2	315,9	0,0	0	3128	1580
5-6	26,5	29,2	315,9	0,0	0	3128	4708
6-7	26,5	29,2	315,9	0,0	0	3128	7836
7-8	54,5	60,0	315,9	0,0	0	2792	10628
8-9	54,5	60,0	315,9	0,0	0	2792	13421
9-10	54,5	60,0	315,9	0,0	0	2792	16213
10-11	448,7	493,6	315,9	177,7	1938	0	14274
11-12	448,7	493,6	315,9	177,7	1938	0	12336
12-13	492,9	542,2	315,9	226,3	2469	0	9867
13-14	525,0	577,5	315,9	261,6	2854	0	7014
14-15	408,1	448,9	315,9	133,0	1451	0	5563
15-16	513,8	565,2	315,9	249,3	2719	0	2843
16-17	437,3	481,0	315,9	165,1	1801	0	1042
17-18	330,6	363,7	315,9	47,8	521	0	521
18-19	330,6	363,7	315,9	47,8	521	0	0
19-20	285,1	313,6	315,9	0,0	0	25	25
20-21	50,4	55,4	315,9	0,0	0	2841	2866
21-22	67,9	74,7	315,9	0,0	0	2631	5497
22-23	26,5	29,2	315,9	0,0	0	3128	8626
23-24	54,5	60,0	315,9	0,0	0	2792	11418

5. Поправочный коэффициент

В рассмотренных математических моделях льдоаккумуляторов учитывается только действия тепловой нагрузки и холодильной мощности. Однако в реальных льдоаккумуляторах коли-

чество действующих факторов больше. Поэтому для упрощения расчетов на практике используется «поправочный коэффициент», который с достаточной для практики степенью точности позволяет учесть действие дополнительных факторов («поправочный коэффициент» не является коэффициентом запаса, который иногда просит предусмотреть Потребитель).

Прежде всего, поправочный коэффициент учитывает действие следующих факторов:

1. В рассмотренных математических моделях льдоаккумуляторов используется постоянная по времени холодопроизводительность ХА. На самом деле, чем больше толщина намороженного льда, тем ниже температура кипения и меньше холодопроизводительность. Кроме того, при некоторых соотношениях холодопроизводительности ХА и тепловой нагрузки (характеризуемых небольшой тепловой нагрузкой и большой используемой мощностью компрессорного агрегата) возможен переход ХА в рабочий режим с пониженной температурой кипения хладагента, т.е. в режим работы с пониженной холодопроизводительностью.

2. В рассмотренных математических моделях льдоаккумуляторов почасовая тепловая нагрузка рассматривается как постоянная. Это возможно только при использовании пластинчатых теплообменников, в которые подается продукт с постоянным расходом и неизменной температурой на входе. В случае широкого использования емкостного оборудования, имеющего широкое распространение на молочных заводах, тепловую нагрузку нельзя считать постоянной, особенно в пределах таких расчетных периодов, как 1 час (см. Приложение 4).

3. Теплопритоки от воздуха, нагнетаемого воздуходувкой.

4. Теплопритоки через стенки бака-аккумулятора, а также трубопроводы к потребителям.

5. Точность настройки датчиков толщины льда, зависящая от точности используемого измерительного инструмента и некоторых других причин;

6. Наличие дифференциала в настройке датчика толщины льда на включение и выключение холодильного агрегата. В рассмотренном примере таблицы 2, значение дифференциал может быть установлено таким, что на отрезке времени от 1.43 до 10.00 в результате действия небольших тепловых нагрузок и стаивания некоторого количества льда срабатывание электрода, формирующего команду на включение компрессорного агрегата может произойти незадолго перед 10.00 (или вообще не произойти). В результате этого слишком позднее включение компрессорного агрегата (или отсутствие включения) создаст ситуацию, когда к требуемому моменту времени в баке-аккумуляторе количество льда будет несколько меньшим 16213 кг.

Величина поправочного коэффициента фактически является степенью увеличения заданной тепловой нагрузки. Численное значение поправочного коэффициента принимается равным 1,07 – 1,1. Меньшее значение должно выбираться для льдоаккумулирующих установок предназначенных для простых технологий охлаждения продуктов (молокоприемные пункты, мини-заводы, оснащенные в основном пластинчатыми теплообменниками...). Для более крупных предприятий, особенно использующих большое количество емкостных охлаждающих аппаратов, целесообразно принимать максимальное значение поправочного коэффициента.

6. Влияние на выбор оборудования графика тепловой нагрузки

Основными областями применения льдоаккумуляторов являются молочная промышленность, кондиционирование, птицепереработка, пивные производства, охлаждение напитков. На сегодняшний день в России льдоаккумуляторы наиболее востребованы молочной промышлен-

ностью.

Наиболее желательным принципом подбора оборудования для менеджеров по продажам могла бы быть стандартизация молочных производств и разработка под эти типовые производства типовых льдоаккумулирующих установок (например, для молзавода, перерабатывающего в сутки 20 т молока предназначена холодильная льдоаккумулирующая установка «А», для 30 тонн в сутки – установка «Б» и т.д.). Однако разнообразие оборудования, технологий и производимой продукции на молзаводах настолько велико, что проведение их стандартизации с целью упрощения подбора льдоаккумуляторов нереально. Да и другие отрасли не отличаются единообразием технологий и тепловых нагрузок.

В этой связи целесообразно провести некоторую классификацию тепловых нагрузок и сделать необходимые пояснения по поводу, как вид графика тепловой нагрузки влияет на выбор оборудования.

Наиболее характерные и чаще всего встречающиеся тепловые нагрузки представлены на рис. 4 и 5.

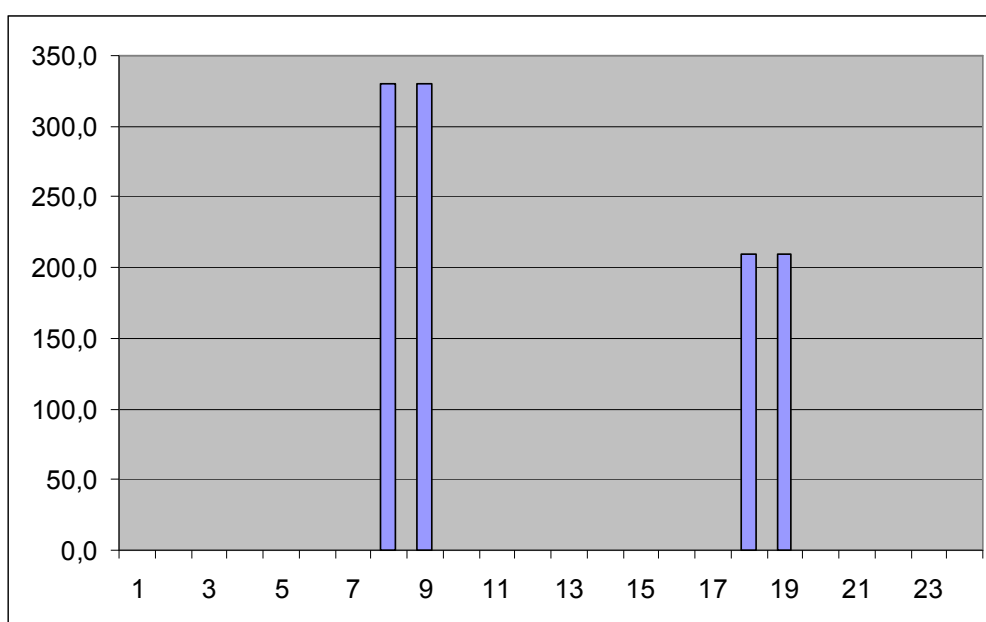


Рис. 4

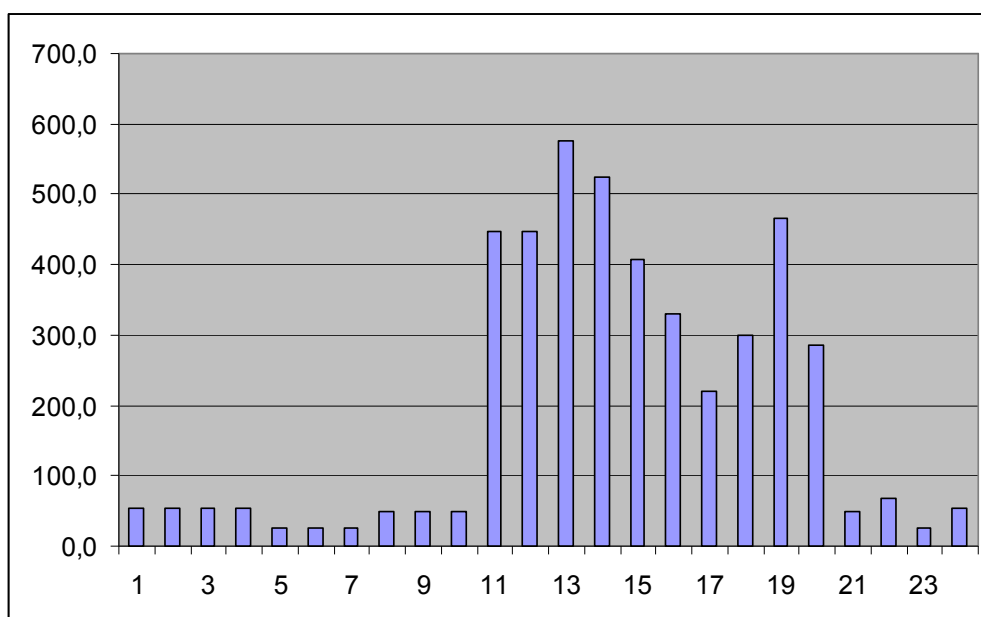


Рис. 5

Имеют место на молочнотоварных фермах, молокоприемных пунктах, молочных и пивных заводах, производствах кваса и др. предприятиях.

Характеризуются наличием ярко выраженных пиков тепловой нагрузки и интервалами времени с незначительной, по сравнению с пиковой, или нулевой нагрузкой. Для таких нагрузок можно использовать:

- *льдоаккумулирующие установки с трубчатыми змеевиковыми испарителями (температура ледяной воды $\sim 0,5-2^{\circ}\text{C}$).*
- *льдоаккумулирующие установки с панельными погружными испарителями (температура ледяной воды $\sim 0,5-1^{\circ}\text{C}$).*
- *установки с насыпным льдом, производимым с помощью льдогенератора (температура ледяной воды $\sim 0,5^{\circ}\text{C}$).*

Применение льдоаккумуляторов в данном случае обеспечивает минимальную стоимость оборудования (за исключением насыпных) и высокую эффективность эксплуатации.

На крупных молочных и пивных заводах, а также на птицеперерабатывающих предприятиях типичной является нагрузка представленная на рис. 6.

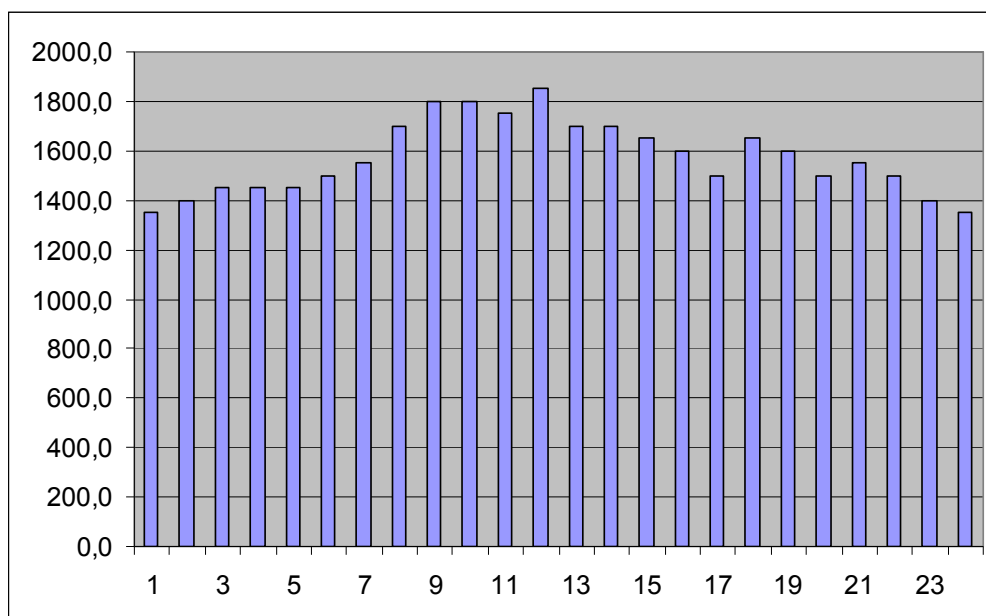


Рис. 6

Применение льдоаккумуляторов в данном случае нецелесообразно. В качестве альтернативы могут быть рекомендованы:

- *установки производства ледяной воды с пленочными панельными испарителями (температура ледяной воды $\sim 0,5^{\circ}\text{C}$ и выше).*
- *установки производства ледяной воды с пластинчатыми теплообменниками с промежуточным хладагентом (этиленгликоль, пропилен-гликоль; температура ледяной воды $\sim 1^{\circ}\text{C}$).*
- *установки с пластинчатыми теплообменниками с непосредственным кипением хладагента. Температура ледяной воды $\sim 1,5-4^{\circ}\text{C}$).*

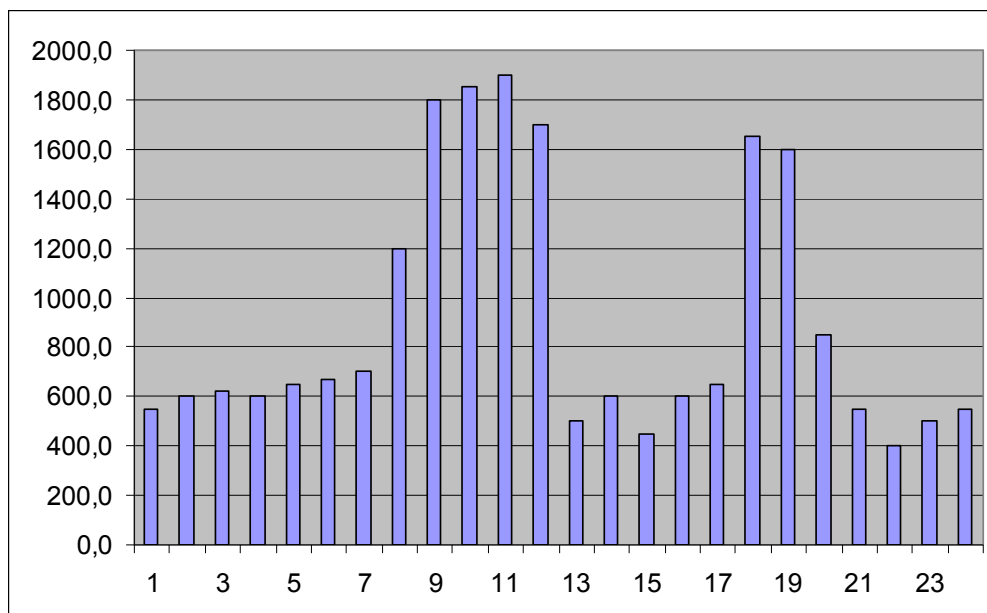


Рис. 7

На рис. 7 приведен график технологического процесса со статической и пиковыми составляющими тепловой нагрузки. Такие графики имеют место в основном на средних и крупных молочных заводах. В данном случае наличие статической составляющей в течении длительного времени (вплоть до суток) требует компенсации статической составляющей тепловой нагрузки с помощью какого-либо chillера, а пиков – с помощью льдоаккумулирующей установки. Т.е. в данном случае с точки зрения достижения оптимальных режимов работы наиболее целесообразно применение комбинированных схем. Опыт подбора оборудования показывает, что если установка не очень большая усложнение схемы может привести к ее удорожанию и большей целесообразности использования установок с другими принципами охлаждения. Выигрыш в цене комбинированных установок достигается при достаточно больших их размерах, однако окончательные выводы в любом случае могут делаться только по результатам расчетов.

7. Продолжительность разрядки льдоаккумулятора и её влияние на выбор оборудования

Еще одним важным свойством льдоаккумуляторов является способность отдавать аккумулируемый холод с требуемой скоростью (так называемая продолжительность разрядки льдоаккумулятора).

Теория льдоаккумуляторов в части их освобождения ото льда является наименее исследованной частью общей теории льдоаккумуляторов. Широко публикуемых данных по этой части нет. Численные значения продолжительности разрядки, которые будут приведены далее в настоящем разделе, являются симбиозом данных по эксплуатации льдоаккумуляторов компании «Остров» и некоторых сведений из технической литературы, поэтому достаточно ориентировочны.

Продолжительность разрядки трубчатых змеевиковых льдоаккумуляторов, главным образом, зависит от площади поверхности льда и определяется наружным диаметром трубки, используемой в конструкции испарителя (чем меньше диаметр трубки, тем более развита поверхность теплообмена).

Продолжительность разрядки льдоаккумуляторов с испарителем из трубки с наружным диаметром 10 – 12 мм с обычными для предприятий молочной отрасли условиями эксплуатации (температура возвратной воды) составляет 1 – 1,2 часа. Продолжительность разрядки льдоаккумуляторов с испарителем из трубки с наружным диаметром 20 мм – 2-2,5 часа. При этом

необходимо понимать, что указанные значения достигаются при имеющихся место на реальных производствах тепловых нагрузках (достаточно больших). В то же время можно подобрать достаточно высокую температуру на возврате в льдоаккумулятор, при которой продолжительность разрядки может быть еще существенно сокращена.

Для демонстрации влияния продолжительности разрядки на выбор льдоаккумулирующего оборудования, ниже приведены два примера.

Пример 1. Имеется технологический процесс, в котором тепловая нагрузка порядка 400 кВт, действует два раза в сутки, каждый раз в течение получаса. Промежуток времени между пиками нагрузки – 8 часов (пример взят из практики).

Циклограмма работы льдоаккумулятора: накопление льда, полное стаивание накопленного льда; накопление льда, полное стаивание накопленного льда. Возникает вопрос, какой льдоаккумулятор использовать, если время разрядки даже для тонкой трубки (Дн 10-12 мм) составляет не менее 1 часа.

Решение для данного случая: увеличение поверхности теплообмена путем установки большего количества испарителей и уменьшения количества намораживаемого льда на отдельных испарителях (увеличение развитости поверхности льда).

Пример 2. (взят из практики)

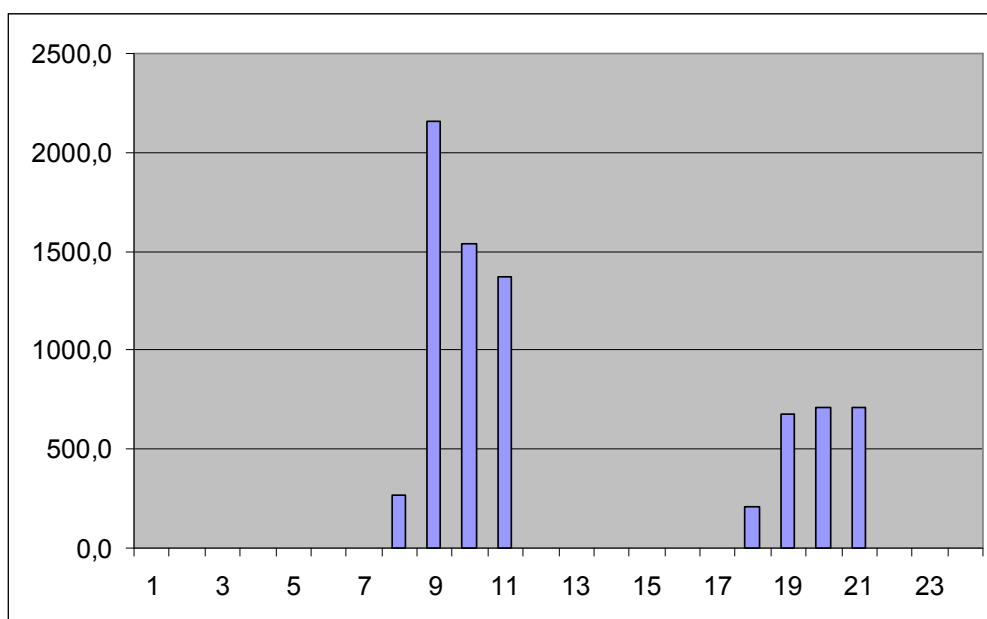


Рис. 8

Имеется пик тепловой нагрузки более 2000 кВт, действующий в течение 1 часа. Аккумулятор рассчитан на компенсацию также и других пиков тепловой нагрузки, т.е. за 1 час он хотя и не должен полностью разряжаться, но должен отдавать лед с достаточно большой интенсивностью. Возникает вопрос, какую холодильную мощность компрессорного агрегата предпочесть: близкую к определяемой по средней тепловой нагрузке или большую.

Льдоаккумулятор, подобранный по холодопроизводительности ХА, близкой к средней тепловой нагрузке, будет иметь большую теплообменную поверхность и, соответственно, большую эффективность по отдаче накопленного льда.

Однако, в рассматриваемом примере, перед пиком в 2200 кВт нет тепловой нагрузки, для компенсации которой необходимо стаивание льда (имеющаяся в 250 кВт компенсируется холодопроизводительностью ХА). Это означает, что к моменту потребления аккумулялированного льда, т.е. к моменту появления нагрузки в 2200 кВт, аккумулятор будет полностью заполнен льдом, и поверхность льда будет максимальной. Это позволяет выбрать холодопроизводитель-

ность большую, чем определенная по средней тепловой нагрузке, что позволит уменьшить льдоаккумулятор и стоимость установки.

8. Выбор холодопроизводительности компрессорного агрегата

Выбор холодопроизводительности холодильного агрегата по среднесуточной тепловой нагрузке (см. методику раздел 3) в настоящее время используется достаточно редко в силу целого ряда недостатков:

- требуются льдоаккумуляторы с большой аккумулирующей способностью, что при высоких ценах на льдоаккумулирующие испарители (нержавейка, медь) приводит к неоправданно высокой цене установки. В этой связи возникает вопрос: «Почему раньше рекомендовали принимать холодопроизводительность холодильного агрегата исходя из среднесуточной тепловой нагрузки?». Действительно в СССР были установки с холодопроизводительностью близкой к среднесуточной тепловой нагрузке. Правда, с баками и льдоаккумулирующими испарителями из черной стали, без горячего цинкования и какой-либо другой серьезной антикоррозионной защиты, со специфическим ценообразованием. В то же время в СССР было немало льдоаккумулирующих холодильных установок, в которых компрессорный агрегат работал только ночью, а в дневное время – даже в период действия пиковых нагрузок – находился в выключенном состоянии (холодопроизводительность таких установок явно выбиралась не по среднесуточной тепловой нагрузке, а использовались такие льдоаккумуляторы для снижения потребления электроэнергии в дневное время);

- продолжительность работы холодильного агрегата с холодопроизводительностью выбранной по среднесуточной тепловой нагрузке близка к 24 часам в сутки. Это делает невозможным максимизацию эффекта от использования льготного ночного тарифа, являющегося одним из главных преимуществ холодильных установок с аккумуляцией холода;

- не обеспечивается выполнение некоторых специфических требований Потребителя. Например, Потребитель не хочет оставлять работающую холодильную установку без присмотра, и не хочет иметь ночную дежурную смену. В этой связи ему требуется, чтобы установка выключалась по завершении работы вечерней смены и включалась с приходом утренней смены (при выборе холодопроизводительности по среднесуточной тепловой нагрузке это невозможно, т.к. должен использоваться холодильный агрегат с продолжительностью работы близкой к 24 часам в сутки);

- в льдоаккумулирующих установках, оснащенных многокомпрессорными агрегатами с холодопроизводительностью выбранной по среднесуточной тепловой нагрузке, в случае останова одного из компрессоров теоретическая продолжительность намораживания превысит 24 часа. В результате этого суммарное количество холода вырабатываемого такой установкой сократится не только за счет уменьшения холодопроизводительности компрессорного агрегата, но и за счет уменьшения количества намораживаемого льда в аккумуляторе. При использовании компрессорного агрегата с холодопроизводительностью, существенно превышающей среднесуточную тепловую нагрузку, холодопроизводительности, остающейся после останова одного из компрессоров, в большинстве случаев имеющих место на практике (днем работа, ночью – накопление льда) может оказаться вполне достаточно для полного накопления льда в льдоаккумуляторе. В итоге суммарные потери холода в таких установках во многих случаях могут быть намного меньшими, чем в установках с многокомпрессорными агрегатами с холодопроизводительностью определенной по среднесуточной тепловой нагрузке;

- и др.

Холодильная мощность компрессорного агрегата, определенная по среднесуточной тепловой нагрузке, по сути является минимальным значением холодопроизводительности, обеспечивающей компенсацию заданной тепловой нагрузки. Более низкие значения холодопроизводительности недопустимы (количество вырабатываемого холода будет недостаточно для компенсации тепловой нагрузки). Что касается более высоких значений холодопроизводительности, то

с математической точки зрения они ничем не ограничены.

В льдоаккумуляторах, производимых компанией «Остров», используются серийные испарители, каждая модель которых характеризуется индивидуальной комплектацией конструктивными элементами (ТРВ, дистрибьюторы, диаметры коллекторов и труб), рассчитанными на определенный режим работы. В результате этого назначаемая холодопроизводительность ХА должна быть согласована с рабочими параметрами подбираемых испарителей. Т.е. холодопроизводительность реальной установки может быть выбрана не любой, допускаемой математическим расчетом, а из некоторого диапазона значений, определяемого конструкцией и комплектацией используемых испарителей (см. Приложение 5).

Если холодопроизводительность холодильного агрегата выбирается не по среднесуточной тепловой нагрузке, то возникает вопрос: какое значение холодопроизводительности должно быть принято. Обычно выбор холодопроизводительности холодильного агрегата связывают с расчетом по некоей математической формуле, после подстановки исходных данных в которую получается требуемый результат, в соответствии с которым остается только выбрать соответствующий холодильный агрегат. К сожалению такой формулы не существует. Поэтому выбор холодильного агрегата должен представлять собой итерационный процесс, предусматривающий проведение расчетов нескольких вариантов, из которых в соответствии с принятыми критериями оптимизации определяется лучший.