УДК 621.58

Системы холодоснабжения с льдоаккумуляторами: реализация трех обязательных условий

Канд. техн. наук **В.С. КАЛЮНОВ, К.А. ТУШЕВ**
ООО «ОК»

Three conditions of cold accumulation by ice in the systems of refrigeration provision with ice accumulators are considered in the article: freezing of the needed volume of ice with minimum expenses, simultaneous removal of heat load from refrigerated objects and from the frozen-on ice and ensuring of maximum speed of ice melting at minimum temperature of refrigerated water and of removal of the peak heat gain. Possible technical solutions for fulfilling these conditions are considered. It is shown that systems with ice accumulators should always have evaporators exclusively for chilling of ice water. The systems with ice accumulators are not cost effective at the plants with uniform heat load.

Заманчивая идея использования скрытой теплоты таяния льда для аккумулирования холода время от времени будоражит умы холодильщиков.
А почему бы и не использовать эту возможность? Лед применяли для охлаждения пищевых продуктов с незапамятных времен. Ведь 1 кг воды при охлаждении на 1 К позволяет аккумулировать немногим больше 4 кДж холода, а 1 кг льда при его замораживании - 335 кДж, т.е. больше почти в 80 раз. Как только начинает активизироваться спрос на льдоаккумулирование холода, так сразу же появляются новые решения, с помощью которых инженеры пытаются более эффективно реализовать этот процесс.
В первую очередь творческие усилия направляются на обеспечение ***намораживания необходимого объема льда с минимальными затратами.***
На втором этапе решается задача ***одновременного отведения тепловой нагрузки как от охлаждаемых объектов, так и от намораживаемого льда.*** *Основной же, третий этап - это* ***достижение в период пикового теплопритока максимальной скорости таяния льда при минимальной температуре охлаждаемой воды*** *и полной холодопроизводительности системы охлаждения. К сожалению, он обделен эффективными техническими решениями, хотя система аккумулирования холода льдом создается именно ради этого третьего этапа.*
Рассмотрим вкратце три этапа аккумулирования холода льдом и соответствующее каждому из этих этапов обязательное условие.

Намораживание необходимого объема льда с минимальными затратами

На первый взгляд задача решается в один заход: определяется либо площадь теплообменной поверхности испарителя, на которой намораживается лед, либо объем бака, в который насыпается чешуйчатый лед. Практически все проектировщики и поставщики оборудования для льдоаккумулирования предлагают использовать для этого уравнения:

$$F_{и} = \Sigma Q_i \tau_i / (r_{л} \rho_{л} \delta_{л}),$$

$$V_{б\text{-}а} = \Sigma Q_i \tau_i / (r_{л} \rho_{н.\,л}),$$

где $F_{и}$ – площадь теплообменной поверхности испарителя, м^2;

Q_i – тепловая нагрузка в i-й отрезок времени, кВт;

τ_i – продолжительность i-го отрезка времени, с;

$r_{л}$ – теплота плавления льда, кДж/кг;

$\rho_{л}$ – плотность льда, кг/м^3;

$\delta_{л}$ – толщина слоя намораживаемого льда, м;

$V_{б\text{-}а}$ – объем бака-аккумулятора чешуйчатого льда, м^3;

$\rho_{н.\,л}$ – насыпная плотность чешуйчатого льда, кг/м^3.

По сути, вышеприведенные уравнения, определяя площадь теплообменной поверхности испарителя-льдоаккумулятора или объем бака-льдоаккумулятора, ничего не говорят о возможности намораживания нужного количества льда в фиксированный период времени.

В первую очередь хочется выяснить, какое количество холода необходимо аккумулировать. Для расчета требуемого значения $\Sigma Q_i \tau_i$.следует построить суточный график тепловых нагрузок (рис. 1). И здесь появляются первые сложности. На вид графика основное влияние оказывает организация технологического процесса на предприятии. Его изменения на протяжении суток определяют перераспределение тепловых нагрузок. Иногда на действующем предприятии фактическая максимальная тепловая нагрузка может превышать возможности установленного холодильного оборудования в несколько раз.

Требуемый запас холода обеспечивается в тот период суток, когда тепловая нагрузка меньше среднесуточной. Чем ближе период аккумулирования

ОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА

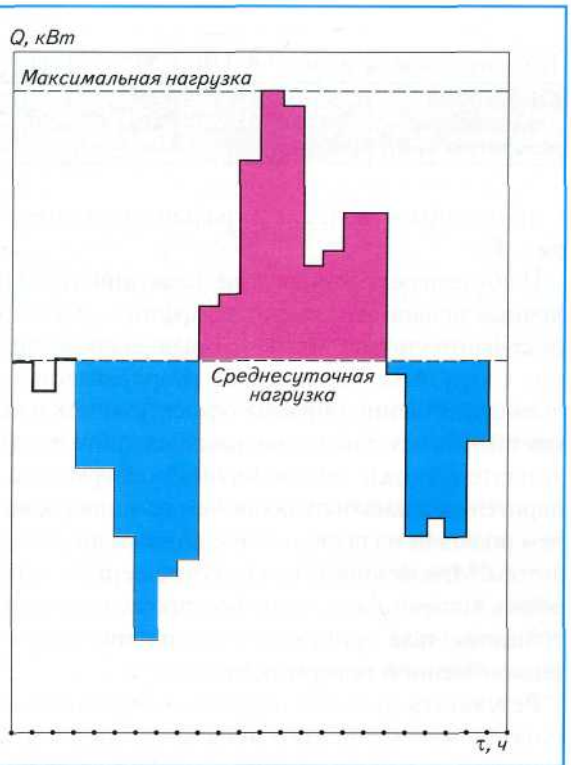

Рис. 1. Суточный график тепловых нагрузок Q (исходные данные для расчета льдоаккумулятора)

холода ко времени его потребления, тем меньше непроизводительные потери холода тающего льда на охлаждение воздуха в помещении компрессорного цеха. График тепловых нагрузок, представленный на рис. 1, характерен для молокоперерабатывающих производств с относительно небольшим объемом переработки, работающих, как правило, в одну смену. На крупных производствах с 2–3-сменным режимом работы график тепловых нагрузок более равномерный (например, как на рис. 2).

При подобных колебаниях тепловой нагрузки использование систем с аккумулированием холода становится нецелесообразным. Рекомендации, разработанные и опубликованные ВНИХИ, советуют аккумулировать холод при продолжительности пикового теплопритока не более 4 ч в сутки и при превышении им среднесуточного теплопритока более чем на 40 %.

Когда, наконец, проектировщику удается найти консенсус с главным технологом и определить необходимое количество аккумулируемого холода, то на очереди встает внешне безобидный, но весьма коварный вопрос: каким из возможных способов осуществлять льдоаккумулирование? На рис. 3 приведены далеко не все варианты.

Плотность льда при аккумулировании на тепло-

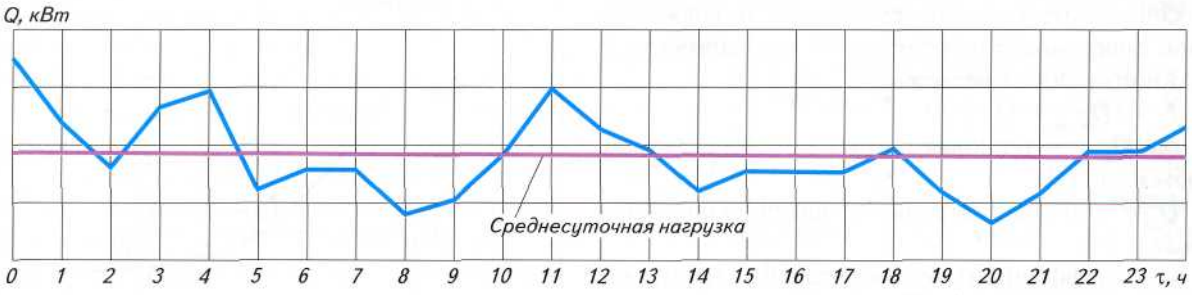

Рис. 2. Суточный график тепловых нагрузок, при котором аккумулирование холода нецелесообразно

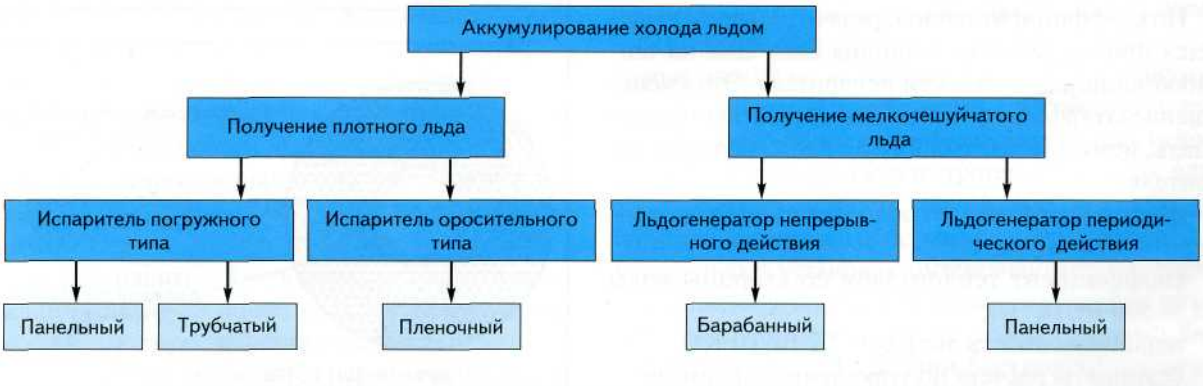

Рис. 3. Некоторые варианты льдоаккумулирования холода

ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕ

Таблица 1

Толщина слоя льда $\delta_л$, мм	20	30	40	50	60
Площадь теплообменной поверхности, м², не менее	600	400	300	240	200

обменной поверхности испарителя около 900 кг/м^3, а насыпная плотность мелкочешуйчатого льда не превышает 400 кг/м^3. Для наглядности представим несколько цифр. Масса льда, необходимого для создания запаса холода в 1 МВт-ч, составляет примерно 11 т (1000-3600/335). При плотности льда 900 кг/м^3 его объем составит около 12 м^3.

Необходимая площадь теплообменной поверхности в зависимости от толщины слоя намораживаемого льда представлена в табл. 1.

Для мелкочешуйчатого насыпного льда плотностью 400 кг/м^3 потребуется бак-аккумулятор объемом не менее 27 м^3. Магия цифр подталкивает к намораживанию на теплообменной поверхности слоя плотного льда относительно большой толщины. Но, устремляясь по этому пути, инженер упирается в проблемы реализации второго этапа льдоаккумулирования.

Обеспечение одновременности отведения тепловой нагрузки от охлаждаемых объектов и от намораживаемого льда

Определить необходимую площадь теплообменной поверхности испарителя $F_и$ для выполнения данного условия несложно

$F_и = (Q_{ох.\ об} + Q_л)/(k\theta)$,

где $Q_{ох.\ об}$ – тепловая нагрузка от охлаждаемых объектов, кВт;

$Q_л$ – тепловая нагрузка от намораживаемого льда, кВт;

k – коэффициент теплопередачи испарителя, кВт/(м^2·К);

θ – температурный напор в испарителе (разность температур охлаждаемой воды и кипящего хладагента), К.

Но коэффициент теплопередачи резко уменьшается при увеличении толщины слоя льда на теплообменной поверхности испарителя. Это уменьшение коэффициента $к$ можно приближенно оценить, исходя из следующих условий работы испарителя:

коэффициент теплоотдачи со стороны хладагента $\alpha_х = 1000$ Вт/(м^2·К);

коэффициент теплоотдачи со стороны воды $\alpha_w = 500$ Вт/(м^2·К);

теплопроводность льда $А_л = 2{,}2$ Вт/(м·К).

Результаты расчета по упрощенной формуле

$k = 1/(1/\alpha_х + \delta_л/\lambda_л + 1/\alpha_w)$

Таблица 2

Толщина слоя льда $\delta_л$, мм	0	10	20	30	40	50
Коэффициент теплопередачи испарителя k, Вт/(м^2·К)	333	220	110	70	50	40

приведены в табл. 2, а в графическом виде – на рис. 4.

И вот первое разочарование: пластинчатые и пленочные испарители имеют коэффициент теплопередачи в отсутствие льда почти на порядок выше, чем под слоем льда. Термическое сопротивление слоя льда существенно снижает эффективность работы как пленочных, так и панельных испарителей. В результате площадь теплообменной поверхности испарителя должна быть более чем на порядок выше, чем полагали на первом этапе подбора льдоаккумулятора! Мгновенное техническое решение – использовать испаритель из труб, в котором с увеличением толщины льда происходит увеличение наружной теплообменной поверхности (рис. 5).

Результаты расчета наружной теплообменной поверхности трубчатого испарителя при нарастании слоя льда и изменения коэффициента теплопередачи приведены в табл. 3, из которой следует,

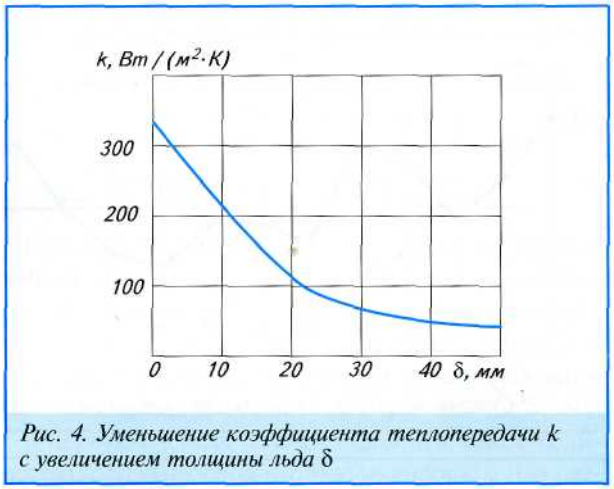

Рис. 4. Уменьшение коэффициента теплопередачи k с увеличением толщины льда δ

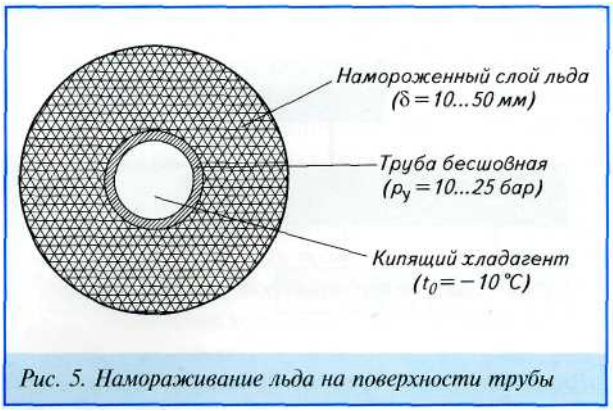

Рис. 5. Намораживание льда на поверхности трубы

Таблица 3

Толщина слоя льда, $\delta_л$, мм	0	10	20	30	40	50
Наружный диаметр, мм	25	45	65	85	105	125
Площадь наружной поверхности 1 м трубы со льдом, м²	0,078	0,141	0,204	0,267	0,330	0,392
Коэффициент теплопередачи трубчатого испарителя k, Вт/(м²·К)	333	183	139	117	104	95

что работа трубчатого испарителя-аккумулятора в условиях намораживания льда более эффективна, чем панельного аппарата.

А ответ на вопрос, где лучше организовать движение охлаждаемой воды – между панелями или среди частокола труб, даст сравнение прогулок в ветреную погоду по проспекту с высотными домами или в лесопарке. Но в любом из двух вариантов приходится увеличивать площадь теплообменной поверхности испарителя и понижать температуру кипения до –10...–15 °С, т. е. увеличивать затраты на приобретение оборудования, его монтаж, дополнительные строительные площади. А повышенное потребление электроэнергии на поддержание более низких температур снижает прибыль.

Можно идти по другому пути – отводить тепловую нагрузку от охлаждаемых объектов с помощью высокоэффективных пластинчатых испарителей, а лед заготовлять с помощью льдогенераторов чешуйчатого льда.

Для льдогенераторов чешуйчатого льда непрерывного действия нужна температура кипения хладагента порядка –20 °С, а для пленочных льдогенераторов периодического действия более высокая: в диапазоне –6...–10 °С. Пленочные льдогенераторы имеют более высокий коэффициент теплопередачи, чем панельные испарители, так как на них намораживается слой льда небольшой толщины – 6... 10 мм (рис. 6). К сожалению, время на сброс намороженного льда в бак-аккумулятор частично снижает полученный эффект.

Основные преимущества аккумулирования холода мелкочешуйчатым льдом:

- ✓ часть компрессорных агрегатов установки работает на более высокую температуру кипения (около 0 °С);
- ✓ часть испарителей используется только для охлаждения ледяной воды, следовательно, имеет наиболее высокую эффективность.

Таким образом экономятся первоначальные затраты и снижается потребление электроэнергии.

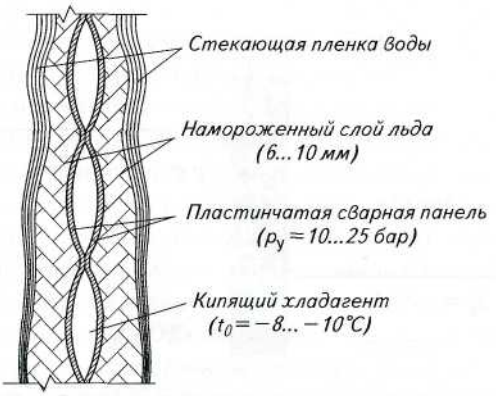

Рис. 6. Намораживание льда на поверхности пленочного испарителя

Следует учитывать, что сэкономленную строительную площадь займут бак-аккумулятор с чешуйчатым льдом и дополнительные насосы, обеспечивающие эффективную работу льдогенератора.

Преодоление трудностей второго этапа создания системы охлаждения с льдоаккумулятором несколько убавляет оптимизм. А впереди тот этап, ради которого и применяется льдоаккумулирование холода.

Обеспечение максимальной скорости таяния льда при минимальной температуре охлаждаемой воды и отведение пикового теплопритока

Написать математическое выражение, соответствующее максимальной холодопроизводительности системы охлаждения, просто:

$$Q_{max} = F_и k\theta + F_л \alpha_л \theta_{т.\,л},$$

где $F_л$ – площадь поверхности тающего льда, м²;

$\alpha_л$ – коэффициент теплоотдачи от воды к тающему льду, кВт/(м²·К);

$\theta_{т.\,л}$ – температурный напор (разность температур охлаждаемой воды и тающего льда), К.

Просто и красиво! Но это только верхушка айсберга, о которой разбиваются многие «Титаники» систем холодоснабжения с льдоаккумулированием!

Вспомним, что системы льдоаккумулирования холода далеко не новое изобретение: оно широко использовалось в прошлом веке. Особенно целесообразно его применение было в регионах с недостаточной мощностью электрогенерирующих или энергоснабжающих систем. Ночью, когда большинство предприятий не работало, на испарителях холодильных установок интенсивно наращивался лед. В дневное время холодильные установки выключались, а холодоснабжение обеспечивалось таянием этого льда. Последний факт почему-то упорно забывают и спокойно, используя последнюю

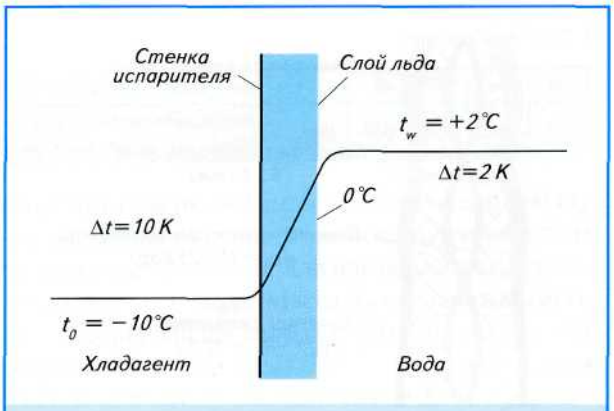

Рис. 7. Перепады температур на стенке испарителя-льдоаккумулятора

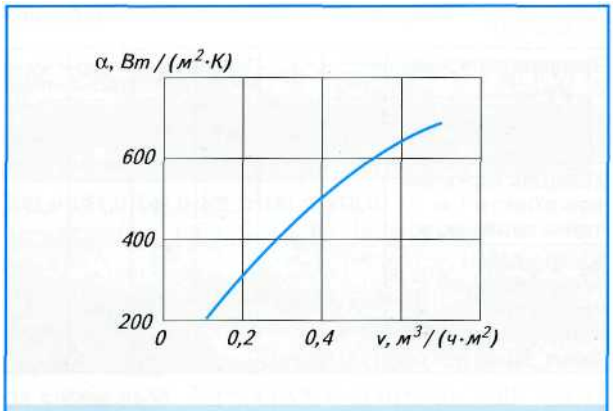

Рис. 8. Теплоотдача α от воды к тающему льду в зависимости от удельного объемного расхода воды v

формулу, делают сложение холодопроизводительности оборудования при отсутствии льда на испарителе с холодопроизводительностью тающего льда, слой которого ранее был наморожен на этом испарителе.

Для таяния льда при работающей холодильной установке необходимо, чтобы разность температур охлаждаемой воды была больше, чем льда и кипящего хладагента, что и наблюдают постоянно холодильщики, обслуживающие подобного рода охлаждающие системы. Но то, что хорошо подходит для систем комфортного кондиционирования, не всегда приемлемо при охлаждении ледяной воды.

На рис. 7 показаны перепады температур при температуре кипения хладагента t_0 = –10 °С и температуре воды на уровне t_w = +2 °С. В этом случае либо лед должен таять при отрицательной температуре, либо теплоотдача со стороны воды должна быть в несколько раз выше, чем со стороны кипящего хладагента. И одно, и другое нереально.

Заметим, что температура поверхности льда, контактирующего с водой, всегда будет равна 0 °С. А какой процесс будет происходить – намораживание или таяние льда, определяется динамикой тепловых потоков. Возрастание тепловой нагрузки вызывает таяние льда. Если объема тающего льда недостаточно и температура воды на выходе из испарителя-льдоаккумулятора повышается, то увеличивается холодопроизводительность компрессорных агрегатов, снижается температура кипения хладагента и лед начинает намораживаться, а температура воды повышаться. После того как холодопроизводительность установленных компрессоров достигнет максимальной величины, продолжится таяние льда.

Теплоотдача от тающего льда к охлаждаемой воде, как правило, не очень значительна (рис. 8). Организовывать интенсивное движение воды для повышения теплоотдачи в емкости с открытой поверхностью – задача неблагодарная (достаточно вспомнить течение воды в горных реках или волны на реках и озерах при сильном ветре). Существенно увеличиваются затраты на перемещение воды, возрастает насыщение воды кислородом, а увеличение теплоотдачи незначительно, как видно из рис. 8.

Создание условий для таяния льда при требуемой по технологии температуре воды требует отключения испарителя-льдоаккумулятора от компрессорных агрегатов. Однако теплообменная поверхность тающего льда и, следовательно, испарителей-льдоаккумуляторов должна быть достаточной как для отвода максимальной тепловой нагрузки, так и эффективного таяния льда. Следовательно, теплообменная поверхность испарителя-льдоаккумулятора должна быть еще в несколько раз больше, чем определено на втором этапе. Сомневаетесь? Посмотрите на фотографии, помещенные на сайтах фирм-производителей льдоаккумуляторов подобного типа. Территории, занимаемые льдоаккумуляторами, превышают площади, занятые холодильным оборудованием. Отключение испарителя-льдоаккумулятора от компрессорных агрегатов в период таяния льда вряд ли можно назвать новостью, так как это требование уже излагалось в работах по использованию зероторов и в работах известных ученых (например, Г. Лоренца), а также рекомендациях ВНИХИ.

Несколько лучше обстоит дело при использовании мелкочешуйчатого льда, который накапливается в баке-аккумуляторе. В таком варианте системы холодоснабжения льдогенератор и испаритель (охлаждающий ледяную воду и обеспечивающий расчетную холодопроизводительность) разделены. Требуется организовать интенсивное таяние льда в баке-аккумуляторе. Нагляднее всего этот процесс

иллюстрируют не математические выкладки, формулы и графики, а наблюдения за таянием снега и льда весной, которые показывают, что быстрее тает снег, чем лед, так как он имеет большую поверхность тепло- и массообмена. Орошение льдоснеговой массы водой ускоряет таяние. Лед, распределенный по обширной поверхности, тает быстрее, чем собранный в большую кучу. Эти наблюдения можно использовать при проектировании бака-аккумулятора.

✓ Бак должен иметь достаточные площадь, глубину и заполнение водой, чтобы весь объем льда, ссыпающегося в воду, мог распределиться по поверхности воды, а не создавать «псевдоайсберг» под льдогенератором.

✓ Лед в баке-аккумуляторе должен орошаться водой по всей поверхности.

✓ Вода должна свободно протекать через бак-аккумулятор даже при максимально возможном заполнении его мелкочешуйчатым льдом.

Отсюда следует, что объем бака-аккумулятора должен превышать расчетный объем мелкочешуйчатого льда в несколько раз. Тем не менее стоимость бака-аккумулятора бесспорно меньше, чем испарителя-льдоаккумулятора.

* * *

Таким образом, на основании изложенного можно сделать следующие выводы:

✓ Системы холодоснабжения с намораживанием льда на теплообменной поверхности аккумулятора холода должны иметь испарители, которые только охлаждают ледяную воду, и аппараты-льдоаккуму-ляторы, на теплообменной поверхности которых намораживается лед. В процессе таяния льда аппараты-льдоаккумуляторы должны быть отключены от компрессорных агрегатов. Площадь теплообменной поверхности аппаратов–льдоаккумуляторов при охлаждении ледяной воды должна определяться в основном из условий таяния льда при температуре воды, определяемой требованиями технологии основного производства. Если необходима вода с более высокими значениями температуры (12...15 °С), то превалирующими могут оказаться другие условия.

✓ Системы холодоснабжения с льдогенераторами мелкочешуйчатого льда также должны иметь испарители, которые только охлаждают ледяную воду. Их достоинство заключается в том, что льдогенераторы можно не отключать от компрессорных агрегатов в режиме пикового теплопритока, когда необходим холод, аккумулированный льдом.

Размеры бака-аккумулятора должны быть достаточны не только для размещения заготовленного льда, но и для реализации технических решений, обеспечивающих его интенсивное таяние.

✓ На предприятиях с равномерной загрузкой технологического оборудования колебания тепловой нагрузки относительно невелики, в связи с чем использование систем холодоснабжения с льдоаккумуляторами экономически нецелесообразным.

Аккумулировать холод или нет? Каким образом аккумулировать ? Какое оборудование использовать ? В любом случае выбор остается за заказчиком.

Специалисты «ОК» всегда готовы рассмотреть ваши предложения, проконсультировать, выполнить интересующие вас технико-экономические расчеты. При этом используется богатый опыт проектирования, подбора оборудования, монтажа, пусконаладки подобных систем холодоснабжения и обучения специалистов-эксплуатационников.

Работы производятся как для вводимых в строй, так и для действующих предприятий, причем реконструкция осуществляется без остановки основного производства, а в сложных производственных условиях по согласованию с заказчиком возможен поэтапный ввод в эксплуатацию новой системы холодоснабжения.