

МЕТОДЫ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ХОЛОДОЗАРЯДКИ ЛЕДЯНЫХ СКЛАДОВ

Канд. техн. наук Г. С. КОНОКОТИН

Ленинградское отделение ВНИРО

Практикой строительства ледяных изотермических складов доказано, что лед и мерзлые грунты являются довольно прочными строительными материалами. Особенно они прочны, если имеют большую толщину и находятся при температуре ниже нуля [4]. В отличие от обычных строительных материалов лед и мерзлые грунты сохраняют свою прочность и устойчивость в сооружениях исключительно при отрицательной температуре.

Такие условия в ледяных складах достигаются, во-первых, путем предохранения ледяной конструкции склада от таяния посредством укрытия ее изотермической изоляцией, во-вторых, поддержанием внутри склада температуры воздуха не выше минус 1°. Постоянная температура воздуха в камерах ниже нуля поддерживается не только за счет приборов охлаждения, но главным образом за счет аккумуляции холода зимой в ледяной конструкции.

Зимняя холодозарядка ледяных складов естественным холодом является важнейшей операцией их эксплуатационного режима. Она, во-первых, обеспечивает накопление в ледяном массиве, в теплоизоляционном укрытии и в грунте основания склада запаса холода, необходимого для нормальной эксплуатации склада в летний период, а во-вторых, наряду с ремонтом ледяного склада, удлиняет срок его службы.

В настоящий момент известны и применяются на практике три способа холодозарядки ледяных складов, причем все операции по холодозарядке основаны главным образом на инженерной интуиции и учете производственного опыта. Методы теплового расчета процессов холодозарядки ледяных складов пока мало разработаны. С целью устранения этого пробела в предлагаемой работе дано некоторое теоретическое обоснование холодозарядки ледяных складов и методы ее теплового расчета.

Холодозарядка ледяных складов по методу Крылова

М. М. Крылов [5] предложил следующий метод холодозарядки складов. В середине или конце января склад освобождают от продукции. После этого, если склад имеет тамбуры с обоих концов коридора, чтобы создавалась сквозная тяга холодного наружного воздуха через весь склад, откры-

вают настежь двери в обоих тамбурах. Если ледяной склад имеет только один тамбур, то для обеспечения сквозной тяги необходимо в противоположной тамбуру торцевой стене склада пробить отверстие размером 3—5 м². Это отверстие в случае оттепелей рекомендуется закрывать щитами или завешивать брезентами, а на весну и лето основательно заделывать льдом и укрывать теплоизоляцией. Одновременно с вентиляцией склада производится ремонт его ледяной части, а именно намораживание пола и подтаявших мест стен и сводов.

При таком способе аккумуляции холода зимой ледяной склад бывает выведен из эксплуатации минимум на 50—60 дней, а хранившаяся в нем продукция должна быть удалена. Для этого требуются дополнительные затраты, не говоря уже о затруднениях, связанных с разгрузкой ледяного склада. По ориентировочным подсчетам стоимость затрат на все операции, связанные с разгрузкой склада, составляет около 60 руб. на 1 т продукции [6].

Практикой эксплуатации ледяных складов доказано, что наиболее существенным недостатком описанного способа холодозарядки является обязательный перерыв работы ледяных складов, сопряженный с необходимостью перемещения сохраняемой продукции.

Однако, поскольку этот метод холодозарядки прост, он до сих пор применяется на практике, а потому мы приводим некоторые тепловые расчеты, при помощи которых можно изменить условия холодозарядки и сократить время на эту операцию.

Запас холода в ледяном складе, создаваемый при зимней холодозарядке, должен сочетаться с поступлением тепла в склад при эксплуатации. Чем больше поступление тепла, тем больший запас холода должен создаваться при холодозарядке. При этом суммарное поступление тепла при эксплуатации склада в летний период не должно превышать 60% запаса холода, полученного при холодозарядке зимой. Если поступление тепла будет больше и достигнет 90—100% запаса холода, то погашение притока тепла будет осуществляться за счет таяния ледяной конструкции внутри склада.

Чтобы подсчитать суммарное поступление тепла за период эксплуатации склада, необходимо учесть все притоки тепла в него, для чего необходимо знать условия эксплуатации ледяного склада, его тепловой режим, грузопоток и характер грузов. Ниже приведен расчет тепла для Ручьевского ледяного склада емкостью 150 т; внешние размеры ледяного массива данного склада 22×24×6 м.

Суммарное поступление тепла при эксплуатации ледяного склада составляется из следующих слагаемых:

1) q_1 — приток тепла от изотермической поверхности через лед внутрь склада. Этот приток тепла может быть определен по формуле:

$$q_1 = K\theta Ft,$$

где: K — коэффициент общей теплопередачи через лед и мерзлую часть укрытия; при коэффициенте теплопроводности льда 2 ккал/м²·час·град и мерзлой части укрытия 0,6 ккал/м²·час·град величина K составляет около 0,4 ккал/м²·час·град;

θ — температурный перепад в толще ледяного перекрытия, равный в среднем 2°;

F — поверхность теплообмена ледяного склада, которая равна 1000 м²;

t — продолжительность эксплуатации ледяного склада в Ручьях за период года с положительной температурой, равная около 5000 часов.

Подставляя в формулу приведенные выше величины, получим:
 $q_1 = 0,4 \times 2 \times 1000 \times 5000 = 4\,000\,000$ ккал.

2) q_2 — приток тепла снизу от грунта основания. По нашим опытным данным, полученным в районе Ручьевского консервного завода, этот приток равен в среднем 1,5 ккал на 1 м². Площадь, занятая ледяной частью склада, составляет 528 м². Отсюда за 5000 часов эксплуатации склада приток тепла от грунта основания составит:

$$q_2 = 1,5 \times 528 \times 5000 = 3\,960\,000 \text{ ккал.}$$

3) q_3 — расход холода на охлаждение рыбных продуктов, помещаемых на хранение в ледяной склад. Этот приток тепла определяется по формуле:

$$q_3 = cG(t_1 - t_2) + c_m G_m(t_1 - t_2) \text{ ккал.}$$

За летний период эксплуатации в ледяном складе при 2—3 оборотах сохраняется рыбной продукции $G = 150 \times 3 = 450$ т. Обычно рыбные продукты поступают в склад с температурой $t_1 = +13^\circ$ и охлаждаются в процессе хранения до $t_2 = 0^\circ$ (теплоемкость продуктов $c = 800$ ккал на тонну). Также происходит охлаждение деревянной тары, составляющей 15% от веса продукции (G_m), имеющей теплоемкость $c_m = 300$ ккал на 1 т. Подставляя указанные значения в формулу, получим:

$$q_3 = 800 \times 450 \times 13 + 300 \times 67,5 \times 13 = 4\,680\,000 + 263\,250 \approx 4\,943\,250 \text{ ккал.}$$

4) q_4 — приток тепла при эксплуатации ледяного склада вследствие открывания дверей, работы людей, горения света, тепловыделения продуктами и охлаждения поваренной соли, вносимой в склад для ледосолевого охлаждения, и прочие неучтенные притоки тепла, что составляет от 20 до 50% от q_1 или:

$$q_4 = 4\,000\,000 \times 0,5 = 2\,000\,000 \text{ ккал.}$$

5) q_5 — приток тепла из тамбура в склад при температуре воздуха в тамбуре $+3^\circ$.

Этот приток тепла при теплопроводности стенки тамбура $K = 0,4$ ккал/м² · час · град, поверхности стенки тамбура $F = 12$ м² и разности температур между тамбуром и складом 5° за 5000 часов эксплуатации склада составит:

$$q_5 = 0,4 \times 5 \times 5000 \times 12 = 120\,000 \text{ ккал.}$$

Суммарное поступление тепла для ледяного склада в Ручьях составит:

$$\Sigma q = 4\,000\,000 + 3\,960\,000 + 4\,943\,250 + 2\,000\,000 + 120\,000 \approx 15\,023\,250 \text{ ккал.}$$

Указанное поступление тепла должно быть погашено внутри склада за счет накопленного зимой холода в ледяном массиве стен, пола и перекрытий склада и за счет скрытой теплоты плавления ледяного пола при его ледосолевым охлаждении. Следовательно, необходимо произвести расчет запаса холода, который получается при зимней холодозарядке склада. Этот запас холода складывается из следующих статей.

1. Охлаждение ледяного массива склада, имеющего общий объем льда около 2500 м³, во время холодозарядки в среднем от 0 до -10° , подсчитываем по формуле:

$$Q^1_1 = c_v \cdot V_{\lambda} \cdot \Delta t \text{ ккал,}$$

где: c_v — объемная теплоемкость льда, равная 500 ккал/м³;
 V_{λ} — объем льда в ледяном массиве, равный 2500 м³;
 Δt — разность температур в начале и конце летнего периода эксплуатации склада, равная 10°.

Подставляя в формулу приведенные значения, получаем:

$$Q^1_1 = 500 \cdot 2500 \cdot 10 = 12\,500\,000 \text{ ккал.}$$

2. Скрытая теплота плавления замороженного раствора между кристаллами льда, составляющего 2% к объему льда в ледяном массиве, рассчитывается по формуле:

$$Q^1_2 = 80\,000 \cdot V_{\lambda} \cdot 0,02 \cdot \gamma \text{ ккал,}$$

где: 80 000 — скрытая теплота плавления 1 т льда;
 V_{λ} — объем льда в ледяном массиве, равный 2500 м³;
 γ — удельный вес льда, намороженного в бунте, равный 0,9.

Подставляя эти значения в формулу, получаем:

$$Q^1_2 = 80\,000 \cdot 2500 \cdot 0,02 \cdot 0,9 = 3\,600\,000 \text{ ккал.}$$

3. Скрытая теплота плавления ледяного пола, расходуемая на ледосолевое охлаждение его в период эксплуатации. От таяния 1000 кг льда получаем 80 000 ккал, а от таяния всего ледяного пола, получим:

$$Q^1_3 = 80\,000 \cdot V_{\lambda.п} \cdot \gamma \text{ ккал,}$$

где: $V_{\lambda.п}$ — объем ледяного пола, равный 200 м³;
 γ — удельный вес льда пола, равный 0,9.

Отсюда:

$$Q^1_3 = 80\,000 \cdot 200 \cdot 0,9 = 14\,400\,000 \text{ ккал.}$$

Следовательно весь запас холода составит:

$$\Sigma Q = Q^1_1 + Q^1_2 + Q^1_3 = 12\,500\,000 + 3\,600\,000 + 14\,400\,000 = 30\,500\,000 \text{ ккал.}$$

Этот запас холода расходуется в период летней эксплуатации склада и он в два раза больше притоков тепла. Но в период холодозарядки склада необходимо учесть дополнительный запас холода на подмораживание грунта под ледяным полом склада. Грунт под ледяным полом склада пропитан водой и рассолом и для подмораживания этого грунта требуется:

$$Q^1_4 = S \times h \times V_p \times q \text{ ккал,}$$

где: S — площадь под ледяным полом склада, равная 240 м²;
 h — глубина промораживаемого грунта, которую принимаем равной 1 м;
 V_p — объем рассола, впитанного 1 м³ грунта, принимаем равным 350 л;
 q — удельная холодопроизводительность ледосолевой смеси грунта, принимаемая по расчету равной около 60 ккал/кг [4].

Подставляя приведенные значения в формулу, получаем:

$$Q^1_4 = 240 \cdot 1 \cdot 350 \cdot 60 \approx 5\,000\,000 \text{ ккал.}$$

Таким образом, суммарная потребность в холоде при зимней холодозарядке склада будет равна:

$$\Sigma Q = Q_1^1 + Q_2^1 + Q_3^1 + Q_4^1 = 12\,500\,000 + 3\,600\,000 + 14\,400\,000 + \\ + 5\,000\,000 = 35\,500\,000 \text{ ккал.}$$

Данное количество холода необходимо аккумулировать при зимней холодозарядке склада независимо от методов холодозарядки.

Расчет времени, необходимого на холодозарядку склада. Зимняя холодозарядка склада по методу Крылова осуществляется только за счет естественного сквозняка, который образуется при открывании дверей склада [5]. Площадь открытых дверей, через которые создаются сквозняки, принимаем максимальной, равную 5 м^2 . Средняя скорость сквозняка в центральном коридоре склада, как показали наши опыты, не превышает $0,8\text{--}1,1 \text{ м/сек}$, а в камерах скорость движения воздуха равняется от $0,1$ до $0,3 \text{ м/сек}$.

Исходя из указанных условий, определяем количество воздуха, проходящего в час через сквозное отверстие:

$$V_s = S \cdot V \cdot 3600 \text{ м}^3/\text{час.}$$

где: S — площадь сквозного отверстия в коридоре, равная 5 м^2 ;

V — средняя скорость движения воздуха в коридоре, принимаемая 1 м/сек .

Подставляя эти значения в формулу, получим:

$$V_s = 5 \cdot 1 \cdot 3600 = 18\,000 \text{ м}^3/\text{час.}$$

Учитывая теплосодержание проходящего через коридор воздуха со средней температурой минус 15° и его объемную теплоемкость и принимая во внимание увлажнение воздуха, находим, что съем тепла с $18\,000 \text{ м}^3$ воздуха в течение часа практически будет равным $18\,000 \text{ ккал}$.

Суммарная потребность холода при холодозарядке, как указывалось выше, составляет $35\,500\,000 \text{ ккал}$ или, с округлением на добавочное охлаждение грунта под стенами и в краевых частях в укрытии принимается равной $40\,000\,000 \text{ ккал}$.

Если зимняя холодозарядка склада будет производиться при средней температуре наружного воздуха минус 15° , то на нее потребуется в среднем

$$Z = \frac{40\,000\,000}{18\,000} = 2222 \text{ часа или } 93 \text{ суток.}$$

Таким образом, исходя из вышеприведенного расчета и условий холодозарядки, требуемый перерыв в эксплуатации ледяного склада зимой выразится в три месяца вместо 50 дней, установленных Крыловым.

Метод расчета теплового потока, возникающего в наружных ограждениях склада при холодозарядке. Для исследования теплового потока, возникающего в наружных ограждениях ледяного склада (стены и перекрытия) под воздействием холодного потока воздуха, необходимо определить температуру на внутренних и наружных поверхностях и в массе самого ледяного ограждения.

Как известно, изменение температуры во времени и пространстве при распространении тепла в плоской стенке нормально к ее поверхности определяется дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\Delta^2 t}{\Delta x^2},$$

в котором: t — переменная температура;
 τ — время;
 x — расстояние между рассматриваемой точкой и поверхностью стенки.

Если в это уравнение подставить вместо бесконечно малых конечные, хотя и малые величины, то получим то же уравнение в конечных разностях [9, 13]:

$$\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = a \frac{\Delta^2 t}{\Delta x^2}.$$

Разделим мысленно стенку на слои толщиной Δx , а время на отрезки продолжительностью $\Delta \tau$.

Для какого-либо слоя, расположенного на расстоянии $m\Delta x$ от поверхности стенки, изменение температуры за отрезок времени $\Delta \tau$ будет равно:

$$\Delta t_{m\Delta x} = t_{(n+1)\Delta\tau, m\Delta x} - t_{n\Delta\tau, m\Delta x}.$$

а изменение температуры в пространстве для момента времени $n\Delta \tau$ будет равно:

$$\Delta^2 t_{n\Delta\tau} = t_{(m+1)\Delta x, n\Delta\tau} - t_{m\Delta x, n\Delta\tau}.$$

Величина $\Delta^2 t_{n\Delta\tau}$ в уравнении представляет собой вторую разность, т. е. разность двух разностей. Она равняется:

$$\Delta^2 t_{n\Delta\tau} = (t_{n\Delta\tau, (m+1)\Delta x} - t_{n\Delta\tau, m\Delta x}) - (t_{n\Delta\tau, m\Delta x} - t_{n\Delta\tau, (m-1)\Delta x})$$

или

$$\Delta^2 t_{n\Delta\tau} = t_{n\Delta\tau, (m+1)\Delta x} - 2t_{n\Delta\tau, m\Delta x} + t_{n\Delta\tau, (m-1)\Delta x}.$$

Подставив найденные значения $\Delta t_{m\Delta x}$ и $\Delta^2 t_{n\Delta\tau}$ в основное уравнение, получаем:

$$\frac{t_{(n+1)\Delta\tau, m\Delta x} - t_{n\Delta\tau, m\Delta x}}{\Delta \tau} = a \frac{t_{n\Delta\tau, (m+1)\Delta x} - 2t_{n\Delta\tau, m\Delta x} + t_{n\Delta\tau, (m-1)\Delta x}}{\Delta x}.$$

Произвольно задавшись значением Δx , выберем для $\Delta \tau$ значение не произвольно, а в соответствии с соотношением:

$$\Delta \tau = \frac{\Delta x^2}{2a}$$

В этом случае предыдущее выражение упрощается и принимает вид:

$$t_{(n+1)\Delta\tau, m\Delta x} = \frac{t_{n\Delta\tau, (m+1)\Delta x} + t_{n\Delta\tau, (m-1)\Delta x}}{2}. \quad (1)$$

Это соотношение показывает, что температура слоя (m) в момент времени, отстоящий на $(n+1)$ элементарных промежутков от начала процесса холодозарядки, равна среднему арифметическому из температур двух соседних с ним слоев ($m+1$) и ($m-1$) в предшествующий момент времени (отстоящий на n элементарных промежутков от начала процесса холодозарядки).

Это уравнение, связывая температуру, наступающую через $(n+1)\Delta \tau$ от начала процесса холодозарядки, с температурами, которые были в соседних слоях на $\Delta \tau$ ранее, позволяет производить расчет температурного поля во времени при условии, если температура в начальный момент во всех слоях ограждения будет задана.

Выведенное соотношение является недостаточным для определения значений температуры на поверхностях всего ограждения, а именно:

$$t_{n\Delta\tau,0} \text{ и } t_{n\Delta\tau,\Sigma\Delta x}.$$

Эти значения можно определить, исходя из температуры воздуха t_s и коэффициента теплоотдачи (α).

Так как количество отданного тепла, с одной стороны, определяется уравнением теплопроводности

$$q = \lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=0},$$

а с другой стороны — уравнением

$$q = \alpha (t_s - t_{n\Delta\tau,0}),$$

то, сопоставляя оба уравнения, имеем:

$$t_{n\Delta\tau,0} = t_s - \frac{\lambda}{\alpha} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=0}.$$

Если температура $t_{n\Delta\tau,\Delta x}$ на расстоянии Δx от поверхности известна, то приближенное значение производной $\frac{\partial t}{\partial x}$ на поверхности определяется в виде

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{t_{n\Delta\tau,0} - t_{n\Delta\tau,\Delta x}}{\Delta x}.$$

Подставив значение производной в предшествующее уравнение будем иметь:

$$t_{n\Delta\tau,0} = t_s - \frac{\lambda}{\alpha} \cdot \frac{t_{n\Delta\tau,0} - t_{n\Delta\tau,\Delta x}}{\Delta x}.$$

Решая это уравнение, находим искомую температуру

$$t_{n\Delta\tau,0} = \frac{\alpha \Delta x t_s + \lambda t_{n\Delta\tau,\Delta x}}{\lambda + \alpha \Delta x}.$$

Разделив числитель и знаменатель дроби на α и λ окончательно имеем:

$$t_{n\Delta\tau,0} = \frac{\frac{\Delta x}{\lambda} t_s + \frac{1}{\alpha} t_{n\Delta\tau,\Delta x}}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\Delta x}{\lambda}} = \frac{R t_s + R_s t_{n\Delta\tau,\Delta x}}{R + R_s}, \quad (2)$$

где R и R_s — соответствующие термические сопротивления. Полученное уравнение (2) вместе с уравнением (1) позволяет полностью проводить расчеты температурного поля не только в однородной стенке, но и в более сложных по конструкции стенах, то есть определять ход изменения температуры на поверхностях и в массе ограждения при сезонном изменении температуры наружного воздуха.

Приведем пример расчета температурного поля для ледяной стены склада в Ручьях, покрытой с наружной стороны теплоизоляционным укрытием толщиной в 1,2 м (рис. 1), при условии, что температура наружного воздуха в зимнее время мало изменяется в течение 90 суток.

Физические параметры для ледяной стены принимаем следующие.

Для льда:

$$\lambda = 2 \text{ ккал/м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}; \quad c = 0,5 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град};$$

$$\gamma = 900 \text{ кг/м}^3; \quad a = \frac{2}{0,5 \cdot 900} = 0,00444 \text{ м}^2/\text{час}.$$

Для теплоизоляционного укрытия:

$$\lambda = 0,6 \text{ ккал/м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}; c = 0,5 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}; \gamma = 800 \text{ кг/м}^3;$$

$$a = \frac{0,6}{0,5 \cdot 800} = 0,0015 \text{ м}^2/\text{час}.$$

Для коэффициентов теплоотдачи принимаем значения:

$$\alpha_s = 7 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}, \alpha_n = 20 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}.$$

Соответственно для термических сопротивлений теплоотдачи получим:

$$R_s = \frac{1}{\alpha_s} = \frac{1}{7} = 0,14 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}}{\text{ккал}} \text{ и } R_n = \frac{1}{\alpha_n} = \frac{1}{20} = 0,05 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}}{\text{ккал}}.$$

Полное термическое сопротивление всей стены будет равно:

$$R_o = R_s + \frac{\sigma_n}{\lambda} + \frac{\sigma}{\lambda} + R_n$$

или

$$R_o = 0,14 + \frac{1,2}{0,6} + \frac{2,0}{2,0} + 0,05 = 3,19 = 3,2 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}}{\text{ккал}}.$$

Считаем, что в начальный момент холодозарядки склада распределение температуры в стене при $t_n = -15^\circ$ и $t_s = 0^\circ$ соответствует стационарным условиям теплопередачи, т. е. определяется по формулам стационарного состояния. Соответственно будем иметь для температуры на внутренней поверхности льда:

$$t_1 = t_s - (t_s - t_n) \frac{R_s}{R_o}. \quad (3)$$

Температура в плоскости соприкосновения льда с изоляцией

$$t_3 = t_s - (t_s - t_n) \times \frac{R_s + R_{1+2}}{R_o}, \quad (4)$$

где R_{1+2} — термическое сопротивление изоляции равно $\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0,6} = 1,66$.

Температура на наружной поверхности стены:

$$t_4 = t_n + (t_s - t_n) \frac{R_n}{R_o}. \quad (5)$$

Пользуясь приведенными формулами (3), (4), (5), получаем для нашего случая нижеследующие значения температуры для начального состояния:

температура на внутренней поверхности стены (температура t_s в ледяном складе в начальный период равна -1°)

$$t_1 = -1^\circ - (-1^\circ + 15^\circ) \frac{0,14}{3,2} = -0,44^\circ;$$

температура плоскости соприкосновения льда с изоляцией (t_n в этом случае равна 0°)

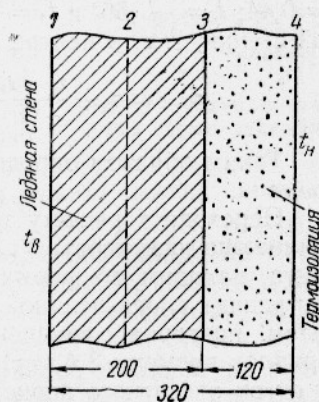


Рис. 1. Ледяная стена, отепленная термоизоляцией.

$$t_3 = -1^\circ - (-1^\circ - 0^\circ) \frac{0,14 + 1,66}{3,2} = -1 - 0,56 = -1,56^\circ;$$

температура на наружной поверхности теплоизоляционного укрытия

$$t_4 = -15^\circ + (-1^\circ + 15^\circ) \frac{0,14}{3,2} = -15 + 0,56 = -14,44^\circ.$$

Дальнейший расчет температуры стен и перекрытия проводим согласно уравнениям (1) и (2) при изменении температуры наружного воздуха в течение 90 суток в период с 1 января до 1 апреля.

При делении стены на элементарные слои принимаем толщину теплоизоляционного укрытия за один слой толщиной, равной 0,6 м, а расчетный интервал времени определяем по формуле:

$$\Delta \tau = \frac{\Delta x^2}{2a} = \frac{0,6^2}{2 \cdot 0,0015} = 120 \text{ часов.}$$

Этому интервалу времени соответствует расчетная толщина элементарного слоя ледяной стены:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta \tau \cdot 2a} = \sqrt{120 \cdot 2 \cdot 0,00444} = 1 \text{ м,}$$

то есть ледяную стену делим на два слоя толщиной по 100 см (см. рис. 1).

Имея, по предыдущему, для начального момента (при $\tau=0$) значения $t_1=0,44$; $t_3=-1,56^\circ$ и $t_4=-14,44^\circ$, находим температуру в сечении 2 ледяной стенки, т. е. в центре ледяной конструкции при $\tau=0$

$$\tau_{0-2} = \tau_3 + \frac{t_1 - t_3}{2} = -1,56 + \frac{-0,44 + 1,56}{2} = -1,00^\circ.$$

Таким образом определены все температуры для начального момента времени.

Переходя к расчету температур для следующего интервала времени, начинающегося через $\Delta \tau=120$ часов или 5 суток после начального момента, находим по формуле (1) значения температуры на поверхностях внутренних слоев ледяной стенки ограждения (t_2) при $\tau=5$ суток и т. д. Затем, повторяя совершенно аналогичный расчет для последующих интервалов времени 2 $\Delta \tau=10$ суток; 3 $\Delta \tau=15$ суток и т. д. на протяжении 90 суток расчетного периода, определим ход изменения температуры в ледяной конструкции.

Пользуясь расчетными значениями температуры, возможно построить кривые их изменения для всего периода времени в 90 суток, по которым легко установить температуру в любом слое конструкции.

Холодозарядка ледяных складов по методу Канаева

А. Ф. Канаев [6] предложил способ холодозарядки ледяных складов без перерыва их эксплуатации. Сущность этого метода заключается в следующем.

Осенью, при наступлении устойчивого похолодания, своды склада освобождают от изоляции, пока она не промерзла и когда удаление ее не представляет затруднений, затем с наступлением морозов начинается намораживание свода, если в этом есть необходимость, и холодозарядка склада производится естественным теплообменом, без создания сквозного проветривания. Охлаждение ледяного массива происходит снаружи через открытую ледяную поверхность сводов.

При охлаждении склада этим способом эксплуатация его не прекращается, но хранящуюся в нем продукцию во избежание подмораживания покрывают рогожами или крафт-бумагой в два слоя или насыпают слой снега толщиной до 10 см. Снег после окончания холодозарядки используют для ремонта ледяного пола склада.

Такой способ холодозарядки складов имеет преимущество по сравнению с вышеописанным, так как позволяет производить холодозарядку без перерыва эксплуатации склада, но имеет также и ряд существенных недостатков.

1. Практикой установлено, что процесс удаления изоляции со сводов склада является очень трудоемким и тяжелым. Нам пришлось производить холодозарядку трех ледяных складов на заводах треста «Ленрыба» (два в г. Приморске и один на рыбообрабатывающей базе в селе Шепелево), причем оказалось, что данный способ холодозарядки не только громоздкий, но и дорогой. Все операции по холодозарядке ледяного склада емкостью в 150 т обходятся в сумме 20—25 тыс. руб. или 130—170 руб. на 1 т продукции, т. е. в 2—3 раза дороже, чем по способу, предложенному Крыловым.

2. После окончания холодозарядки трудно брать из общего бунта изоляцию для покрытия сводов, так как она смерзается в монолитную глыбу.

3. Все работы по холодозарядке складов затягиваются до весенних солнечных дней, вследствие чего теряется часть запаса холода, аккумулярованного в ледяном массиве, и основная изоляция склада не успевает проморозиться, что очень неблагоприятно сказывается на тепловом режиме склада во время эксплуатации его летом.

Схема теплового расчета холодозарядки ледяного склада по методу Канаева. Освобожденный от изотермической изоляции ледяной свод представляет собой плоскую стенку, толщина которой значительно меньше линейных размеров поверхности (рис. 2). По одну сторону стенки, внутри склада, находятся рыбные продукты при постоянной температуре равной t_1 . По другую сторону стенки находится наружный воздух, температуру которого также считаем неизменной (берем средние величины) и равной t_2 . Температура внутренней и наружной поверхности стенки при этом будет везде постоянной и равной соответственно t_{F_1} и t_{F_2} .

Необходимо найти распределение температур в ледяной стенке толщиной S и определить величину теплового потока сквозь стенку в склад при холодозарядке. Задача является одномерной и, следовательно [14], интеграл уравнения $\frac{d \cdot T}{dx^2} = 0$ находится в виде уравнения:

$$T = c_1 x + c_2.$$

Применяя для данной задачи третий род граничных условий и имея в виду, что

$$\theta_{F_1} = t_1 - t_{F_1}; \theta_{F_2} = t_{F_2} - t_2 \text{ и } \theta = T - T_2,$$

находим

$$\left(\frac{d\theta}{dn}\right)_{F_1} = \left(\frac{dT}{dx}\right)_{F_1} = \frac{\alpha_1}{\lambda} (t_1 - t_{F_1}) = c_1,$$

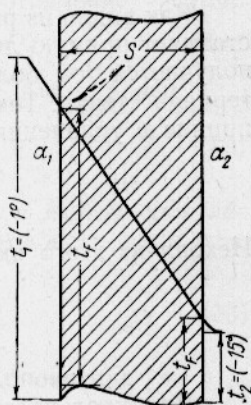


Рис. 2. Ледяная стена без термоизоляции.

где: α_1 — коэффициент теплоотдачи на поверхности стенки со стороны склада;
 λ — коэффициент теплопроводности стенки.

Так как $\alpha_1(t_1 - t_{F_1}) = q$ есть удельный тепловой поток, то следовательно:

$$c = -\frac{q}{\lambda}$$

и

$$T = T_{F_1} - q \frac{x}{\lambda}. \quad (6)$$

Как видно из рис. 2, распределение температуры в толще стенки представляет прямую линию, наклон которой при одном и том же значении q получается тем больше, чем меньше коэффициент теплопроводности материала стенки. Температуру на наружной стороне стенки можно найти, приняв в уравнении (6)

$$x = S_1 \text{ и } T_{E_2} = T_{F_1} - q \frac{S}{\lambda}.$$

Исходя из этого имеем:

$$q = \lambda \frac{T_{F_1} - T_{E_2}}{S} = \frac{t_{F_1} - t_{E_2}}{\frac{S}{\lambda}}. \quad (7)$$

Для удельного теплового потока применительно к обеим поверхностям стенки имеем также:

$$\left. \begin{aligned} q &= \alpha_1(t_1 - t_{F_1}), \\ q &= \alpha_2(t_{E_2} - t_2). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Из уравнения (7) и (8) последовательно находим температурные разности:

$$\left. \begin{aligned} t_1 - t_{F_1} &= q \frac{1}{\alpha_1}, \\ t_{F_1} - t_{E_2} &= q \frac{S}{\lambda}, \\ t_{E_2} - t_2 &= q \frac{1}{\alpha_2}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Суммируя эти значения находим общую разность температур для передачи тепла сквозь стенку:

$$(t_1 - t_2) = q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right).$$

Отсюда для теплового потока на 1 м^2 стенки получаем общую формулу в виде:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (10)$$

Этой формулой можно пользоваться для вычисления теплопередачи плоских стен. Числитель формулы (10) представляет собой общий температурный напор для передачи тепла от одной среды к другой; знамена-

тель — сумму трех слагаемых, которые именуются термическими сопротивлениями. Чем больше будет термическое сопротивление ледяной стенки, тем, при одинаковой разности температур ($t_1 - t_2$), будет меньше тепловой поток сквозь эту стенку.

Термическое сопротивление обозначают R , а сумму отдельных термических сопротивлений стенки ΣR . Различают внутреннее термическое сопротивление стенки $R_{cm} = \frac{S}{\lambda}$, и внешнее термическое сопротивление $R_1 = \frac{1}{\alpha_1}$ и $R_2 = \frac{1}{\alpha_2}$. Если стенка имеет n разнородных слоев, то при

плотном соприкосновении всех слоев общее сопротивление будет

$$\Sigma R = R_1 + R_{cm,1} + R_{cm,2} + \dots + R_{cm,n} + R_2. \quad (11)$$

Удельный тепловой поток сквозь стенку в этом случае будет равен:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\Sigma R}. \quad (12)$$

Согласно уравнениям (9) температурная разность в любом слое ледяной стенки может быть найдена как произведение теплового потока на термическое сопротивление слоя:

$$\theta_{cm,i} = q R_{cm,i}. \quad (13)$$

Холодозарядка ледяных складов по способу Конокотина

Данный метод предложен автором настоящей работы и заключается в следующем. При строительстве ледяного склада в ледяном массиве наружных стен и сводов устраивают воздушные каналы (рис. 3). По этим каналам в зимнее время циркулирует холодный наружный воздух

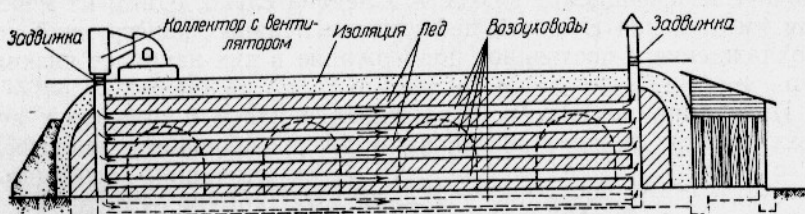


Рис. 3. Схема расположения воздухопроводов в ледяном массиве.

с температурой ниже температуры ледяного массива. Воздушные каналы можно устраивать одноходовые, двухходовые и многоходовые. Мы рекомендуем двухходовые каналы, так как их, по сравнению с другими, значительно проще соорудить. Воздушные каналы делают прямоугольной формы из однодюймовых досок или без досок. Размер поперечного сечения воздушных каналов следует подбирать в зависимости от принятой скорости движения воздуха в каналах и объема воздуха [3].

Для входа воздуха в каналы и выхода его из каналов на сводах ледяных складов устраивают деревянные коллекторы, позволяющие осуществлять естественную и искусственную циркуляцию воздуха. Искусственная циркуляция воздуха выгоднее, так как при этом сокращается срок холодозарядки. Для искусственной циркуляции у входного коллектора устанавливают вентилятор соответствующей мощности, при помощи которого можно достигать скорости движения воздуха по каналам от

3 до 5 м/сек, вместо 1—1,2 м/сек при естественной циркуляции. Данный способ холодозарядки складов имеет следующие преимущества по сравнению с вышеописанными двумя способами.

1. Ледяной склад все время эксплуатируется и хранящиеся в нем пищевые продукты не вывозят и не перегружают в другой склад, во время холодозарядки.

2. Своды ледяного склада не требуется освобождать от изоляционного укрытия, что упраздняет необходимость излишних затрат на эту очень трудоемкую работу.

3. Увеличивается срок службы ледяных складов, так как можно достигать наиболее низких температур в ледяном массиве за очень короткий отрезок времени.

Известно [1, 4, 7], что пластические свойства льда проявляются при весьма малых нагрузках, а потому обеспечить абсолютную устойчивость ледяной конструкции невозможно и последняя будет все время медленно деформироваться. Наши наблюдения показали, что ледяные конструкции деформируются непрерывно, причем скорость их деформации по мере эксплуатации не затухает и при постоянных нагрузках и температуре остается приблизительно одинаковой.

На основании многочисленных замеров деформации сводов и стен ледяных складов установлено, что коэффициент вязкости (η) для наливного льда в конструкциях ледяных складов при температуре минус 2—3° составляет от $3 \cdot 10^{13}$ до $3 \cdot 10^{14}$ пуаз.

Прочность льда как строительного материала довольно высокая, однако полностью использовать ее нельзя из-за большой скорости пластических деформаций льда.

Полная деформация ледяной конструкции складывается из упругой и пластической деформации, причем последняя проявляется в виде медленного течения льда, подобно течению вязкой жидкости [1; 7].

Скорость деформации ледяных конструкций обратно пропорциональна величине коэффициента вязкости. Следовательно, одним из мероприятий для уменьшения скорости деформации ледяных конструкций является их охлаждение и постоянное поддержание в них наиболее низких температур.

4. Прокладка воздушных деревянных каналов в наружных стенках и сводах ледяных складов является как бы армированием ледяных конструкций, особенно перекрытий, что в свою очередь уменьшает деформацию ледяной конструкции.

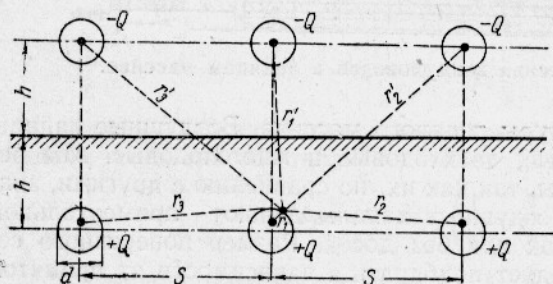


Рис. 4. Сложение температурных полей при наличии ряда источников и стоков в ледяном массиве с плоской поверхностью.

ных в однородный ледяной массив на глубину h от его поверхности F .

Температура воздуха t_a , проходящего по воздушным каналам, нам известна, также как и температура на поверхности трубы t_F (т. е. в ледяном массиве), которая поддерживается равномерной во всех местах. Тре-

Теплопередача ряда воздушных каналов, заложённых в ледяной массив

В нашем случае (рис. 4) имеется ряд параллельно расположенных воздушных каналов диаметром d , с расстоянием между осями S , погружен-

буется определить величину теплового потока сквозь массив от отдельного воздуховода, находящегося в ледяном массиве в ряду с другими воздуховодами.

Для решения этой задачи применим метод источников и принцип наложения [2, 3, 12].

Внутри каждого воздуховода, который называем источником, протекает тепловой источник t_s производительностью Q ккал/м·час; симметрично этому источнику от поверхности ледяного массива F расположен обратный воздуховод равной производительности, называемый стоком (см. рис. 4). Тогда для любой точки источника можно написать ряд температурных разностей относительно всех независимо действующих пар источников и стоков:

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= Q \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{r'_1}{r_1}, \\ \theta_2 &= Q \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{r'_2}{r_2}, \\ \theta_3 &= Q \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{r'_3}{r_3}, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где: $r_1; r'_1; r_2; r'_2; r_3; r'_3$ — расстояния от заданной точки воздуховода до отдельных источников и стоков.

При одновременном действии всех источников и стоков, помещенных в ледяном массиве, общую температурную разность в любой точке воздуховода можно найти суммированием разностей:

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \dots = t_s - t_F = Q \frac{1}{2\pi\lambda} \left(\ln \frac{r'_1}{r_1} + \ln \frac{r'_2}{r_2} + \ln \frac{r'_3}{r_3} + \dots \right).$$

Отсюда для термического сопротивления воздуховода в ледяном массиве получаем:

$$R = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \left(\frac{r'_1}{r_1} + \frac{r'_2}{r_2} + \frac{r'_3}{r_3} + \dots \right).$$

Находя по известным h и S отношение расстояния для каждой пары источников и стока и вводя упрощения [10, 11, 12], получаем следующую формулу термического сопротивления воздуховода:

$$R = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \left\{ 4 \frac{h}{d} \left[1 + \left(2 \frac{h}{S} \right)^2 \right] \times \left[1 + \frac{1}{4} \left(2 \frac{h}{S} \right)^2 \right] \times \left[1 + \frac{1}{9} \left(2 \frac{h}{S} \right)^2 \right] \right\}. \quad (15)$$

Первый множитель под знаком логарифма соответствует термическому сопротивлению одного воздуховода, а каждый последующий множитель соответствует повышению термического сопротивления от присутствия других двух воздуховодов, симметрично расположенных¹.

Таким образом два множителя под знаком логарифма соответствуют трем воздуховодам в ряду, три множителя — пяти воздуховодам и т. д.

Пользуясь разложением гиперболического синуса в ряд [8, 10, 12], можно найти упрощенный вид уравнения (15):

$$R = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \left[\frac{2}{\pi} \cdot \frac{S}{d} \cdot S \cdot h \left(2\pi \frac{h}{S} \right) \right]. \quad (16)$$

¹ Для расчета принимают воздуховоды круглого сечения, равного по площади обычному прямоугольному сечению.

Термическое сопротивление воздухопроводов в ледяном массиве увеличивается с глубиной заложения воздухопроводов h и уменьшается с увеличением расстояния S между трубами.

На рис. 5 показан результат вычисления термического сопротивления воздухопровода по формуле (16) для ледяного массива, имеющего коэффициент теплопроводности $\lambda = 2$ ккал/м · час · град при различных $\frac{h}{d}$ и $\frac{S}{d}$.

При рассмотрении задачи температура по всей поверхности массива предполагается одинаковой. Если мы задаемся одинаковой температурой

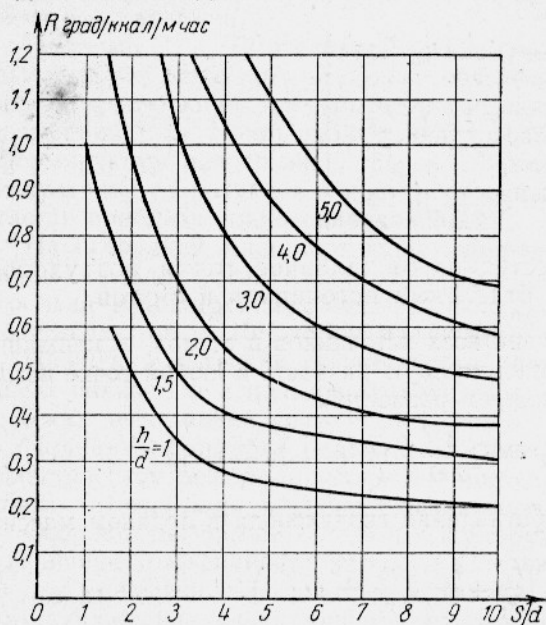


Рис. 5. Термическое сопротивление одного из ряда воздухопроводов в ледяном массиве.

(16). Таким образом, эффективная глубина заложения воздухопроводов составит:

$$h_{\text{эkv}} = h + S_{\text{эkv}} \quad (17)$$

Среднюю эффективную температуру поверхности массива находят из равенства:

$$t_F = t_o + QR_F \quad (18)$$

где: t_o — температура окружающей среды;

R_F — наружное термическое сопротивление полосы массива, соответствующей тепловому потоку одного воздухопровода.

Теплопередача 1 м воздухопровода определяется по следующей формуле:

$$Q = \frac{t_F - t_o}{R_F} \text{ ккал/м} \cdot \text{час.}$$

Величина R_F определяется из равенства:

$$q_F = \frac{Q}{S} = \alpha_F (t_F - t_o);$$

откуда

$$R_F = \frac{1}{\alpha_F \cdot S}. \quad (19)$$

Количество тепла, которое удаляется посредством вентилирования ледяного массива по воздуховодам, определяется по формуле:

$$Q = 3600 \cdot C (t_o - t_a) L \tau \text{ ккал/час,} \quad (20)$$

где: L — расход воздуха на вентилирование в кг/сек;

C — весовая теплоемкость воздуха, равная 0,24 ккал/кг·град;

t_a — температура в ледяном массиве в °С.

Результаты тепловых расчетов процессов холодозарядки ледяных складов, произведенных нами по описанной методике, были сопоставлены с опытными данными, полученными на Ручьевском ледяном складе, где осуществлялась холодозарядка ледяного массива различными способами.

Сравнение результатов опытов и расчетов показало, что предлагаемые методы расчета ледяных складов холодозарядки вполне удовлетворяют практическим требованиям холодильной техники.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Безухов Н. И., Введение в теорию упругости и пластичности, Стройиздат, 1950.
2. Воскресенский К. Д., Сборник задач по теплопередаче, Госэнергоиздат, 1951.
3. Глаголев В. И., Холодильные установки, часть I, Снабтехиздат, 1934.
4. Конокотин Г. С., Строительство и эксплуатация ледяных складов системы Крылова в рыбной промышленности, Пищепромиздат, Москва, 1951.
5. Крылов М. М., Ледяные изотермические склады, АН СССР, 1942.
6. Канаев А. Ф. и Чекотилло А. М., Ледяные склады и их использование, АН СССР, 1952.
7. Кардашкин Б. Д., Экспериментальные исследования физико-механических свойств льда, Труды ЦАГИ № 607, изд. Бюро новой техники, 1947.
8. Муромов С. И., Расчетные температуры наружного воздуха и теплоустойчивость ограждений, Стройиздат, 1939.
9. Соколов В. С., Нестационарный теплообмен в строительстве, Профиздат, 1953.
10. Смирнов В. И., Курс высшей математики, т. II, Гостехиздат, 1948.
11. Фокин К. Ф., Строительная теплотехника, Стройиздат, 1947.
12. Чудновский А. Ф., Физика теплообмена в почве, ОГИЗ, Гостехиздат, 1948.
13. Шак А., Теплопередача в промышленных установках, ОНТИ, 1933.
14. Шорин С. Н., Теплопередача, Гос. издательство литературы по строительству и архитектуре, 1952.