

Расчетное моделирование процессов зарядки аккумулятора холода

Д-р техн. наук И.К. САВИН, д.в. НЕФЁДОВ
Петрозаводский государственный университет

At the further study of the question connected with creation of physical model of the thermal accumulator, offered to use in system of cooling with application of natural cold equipped for maintenance of process of loading by gravitational evaporation-condensational systems, has demanded the decision of a question on effective arrangement of GECS on the area of the thermal accumulator. For the decision of the given problem experimental researches of the processes occurring at crystallization of water in different conditions were made.

Одно из приоритетных направлений развития энергетики – энергосбережение. В этой связи перспективны разработки холодильных систем на основе использования природного холода [2], для которых необходимо сконструировать аккумулятор холода и обеспечить оптимальную его зарядку и разрядку. Решение поставленных задач требует создания моделей, адекватно отражающих протекающие процессы, что позволит оптимизировать выбор конструктивных решений и используемых технологий.

Рассмотрим процесс замерзания воды при граничных условиях первого рода. Примем следующие допущения: в каждый рассматриваемый момент времени тепловые потоки установившиеся (квазистационарная задача); тепловые потоки и температура изменяются только по оси x (задача одномерная). Внутренних источников тепловыделения нет. Состав воды и льда однородный.

Для расчета принимаем следующее значения теплоемкости c , плотности ρ , теплопроводности λ и скрытой теплоты замерзания r : $c_{\text{в}} = 4,212 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $c_{\text{л}} = 1,93 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{л}} = 913 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\lambda_{\text{л}} = 2,216 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ и $r = 334 \text{ кДж}/\text{кг}$ [1] (для воды индекс «в», для льда – «л»).

Границные условия:

при $x = 0$ $t = t_{\text{пп}}$; при $x = \delta$ $t = t_{\text{вп}} = 0^\circ\text{C}$; толщина слоя льда зависит от времени промерзания, т.е. $\delta = f(\tau)$. Постоянство температуры наружной поверхности можно обеспечить различными способами (например, с помощью тепловой трубы).

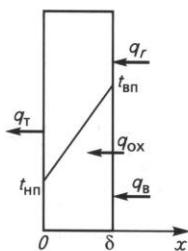


Рис. 1. Расчетная модель замерзания воды при граничных условиях первого рода

При этих условиях отводимый от наружной поверхности тепловой поток $q_{\text{т}}$ (отрицательная температура) будет равен сумме потоков охлаждения воды $q_{\text{в}}$ (от $+4$ до 0°C), ее кристаллизации q_{r} и охлаждения льда q_{ox} (рис. 1).

В этом случае уравнение теплового баланса принимает следующий вид:

$$q_{\text{т}} = q_{\text{в}} + q_{\text{r}} + q_{\text{ox}} \quad (1)$$

Плотности тепловых потоков определим из следующих выражений:

$$\begin{aligned} q_{\text{т}} &= (\lambda_{\text{л}}/\delta) t_{\text{пп}}; q_{\text{в}} = 4 c_{\text{в}} \rho_{\text{в}} \delta / \tau; q_{\text{r}} = \rho_{\text{в}} \delta / \tau; \\ q_{\text{ox}} &= c_{\text{л}} \rho_{\text{л}} (\delta/\tau) t_{\text{пп}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $t_{\text{пп}}$ – температура наружной поверхности, К.

Отрицательное значение температуры в выражениях (2) учтено.

Уравнение (1) при подстановке (2) примет вид:

$$(\lambda_{\text{л}}/\delta) t_{\text{пп}} = 4 c_{\text{в}} \rho_{\text{в}} \delta / \tau + \rho_{\text{в}} \delta / \tau + c_{\text{л}} \rho_{\text{л}} (\delta/\tau) t_{\text{пп}}. \quad (3)$$

Из уравнения (3) можно определить зависимость изменения толщины слоя льда δ от времени τ и температуры наружной поверхности $t_{\text{пп}}$:

$$\delta^2 = \lambda_{\text{л}} \tau t_{\text{пп}} / (c_{\text{л}} \rho_{\text{л}} t_{\text{пп}} + \rho_{\text{в}} + 4 c_{\text{в}} \rho_{\text{в}}) \quad (4)$$

или

$$\delta = 60 \sqrt{\lambda_{\text{л}}} \sqrt{\tau t_{\text{пп}}} / \sqrt{c_{\text{л}} \rho_{\text{л}} t_{\text{пп}} + \rho_{\text{в}} + 4 c_{\text{в}} \rho_{\text{в}}}, \quad (5)$$

где τ выражено в часах.

Для принятых физических параметров воды и льда получаем расчетную зависимость для δ :

$$\delta = (8,94 \sqrt{\tau t_{\text{пп}}} + \sqrt{1,76 t_{\text{пп}} + 350,8 c_{\text{в}} \rho_{\text{в}}}) 10^{-2}, \text{ м.} \quad (6)$$

Плотность теплового потока $q_{\text{т}}$ ($\text{Вт}/\text{м}^2$) определяем в соответствии формулой (2):

$$q_{\text{т}} = \lambda_{\text{л}} t_{\text{пп}} \sqrt{c_{\text{л}} \rho_{\text{л}} t_{\text{пп}} + \rho_{\text{в}} + 4 c_{\text{в}} \rho_{\text{в}}} / (60 \sqrt{\lambda_{\text{л}} \tau t_{\text{пп}}}), \text{ Вт}/\text{м}^2. \quad (7)$$

С учетом физических параметров:

$$q_{\text{т}} = 24,8 \sqrt{t_{\text{пп}}} (1,76 t_{\text{пп}} + 350,8) / \tau. \quad (8)$$

Результаты расчетов представлены на рис. 2 и 3.

Из рис. 2 видно, что чем больше разность температур между внутренней (0°C) и наружной поверхностью льда, тем быстрее происходит увеличение толщины льда. При этом со временем скорость увеличения толщины льда снижается, что связано с уменьшением отводимого теплового потока (рис. 3). Таким образом, в данном процессе постепенно определяющим (лимитирующим) фактором становится термическое сопротивление теплопро-

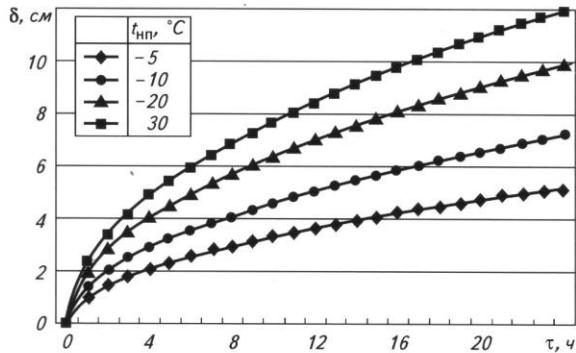


Рис. 2. Зависимость изменения толщины льда от времени промерзания и температуры $t_{пп}$

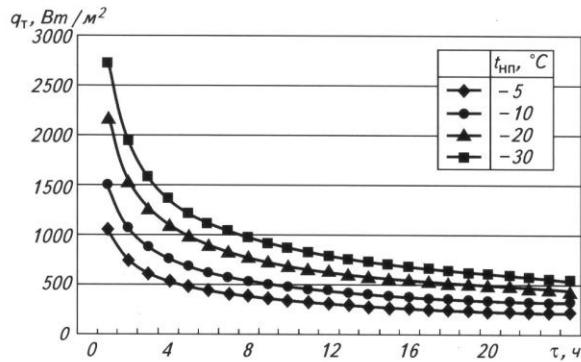


Рис. 3. Зависимость изменения теплового потока от времени промерзания и температуры $t_{пп}$

водности слоя льда. Данные зависимости позволяют осуществлять выбор оптимального расстояния между тепловыми трубами.

Рассмотрим другой случай, реализуемый в природных условиях, а именно образование льда на открытой поверхности. Отличие от предыдущей модели заключается в способе отвода теплоты от наружной поверхности льда к воздуху. Схема процесса и экспериментальная ячейка представлены на рис. 4.

Внутренний диаметр стакана $d = 0,08$ м, высота $h = 0,07$ м. Боковая поверхность и дно теплоизолированы пенополистиролом толщиной 0,02 м. В стакан до верхнего среза наливают воду и ячейку помещают в морозильную камеру с температурой -18°C .

В ходе эксперимента контролировали температуры поверхности льда и воздуха в морозильной камере, толщину слоя льда и время эксперимента. Температуру измеряли контактным термометром типа ТК-5 с ценой деления $0,1^{\circ}\text{C}$. Толщину льда определяли штангенциркулем с ценой деления $0,0001$ м, при этом для устранения таяния льда во время замеров он также находился в морозильной камере. Измерения осуществляли по прохождении требуемого периода времени, после чего весь лед удалялся и процесс начинался опять с начального (нулевого) момента времени.

Теплота с наружной поверхности льда отводится путем конвекции q_k (естественной в эксперименте, вынужденной — в природных условиях) и излучением q_l .

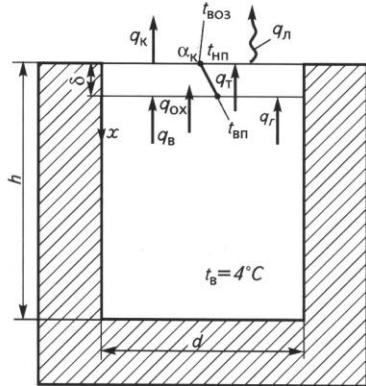


Рис. 4. Расчетная модель образования льда на открытой поверхности

В соответствии с принятой моделью уравнение (1) можно представить в виде

$$q_k + q_l = q_t = q_b + q_r + q_{ox}. \quad (9)$$

Плотность теплового потока при естественной конвекции определяется в соответствии с законом Ньютона — Рихмана, а лучистого — согласно закону Стефана — Больцмана (степень черноты льда $\varepsilon = 0,95$).

Таким образом, уравнение (9) с учетом уравнения (3) примет вид

$$\alpha_k(t_{пп} - t_{возд}) + 5,67\varepsilon(T_{пп}/100 - T_{возд}/100) = (\lambda_l/\delta)t_{пп} = 4c_{вп}\rho_B\delta/\tau + \rho_B\delta/\tau + c_{л\rho_l}(\delta/\tau)t_{пп}. \quad (10)$$

Коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции α_k согласно рекомендациям для принятых условий [1] находим из уравнения

$$Nu = 5,4(Gr \cdot Pr)^{0,25}, \quad (11)$$

где $Nu = \alpha_k d / \lambda_d$ — число Нуссельта;

$$Gr = g \beta (t_{пп} - t_{возд})d^3 / v^2 \quad \text{— число Грасгофа};$$

$$Pr = v/a \quad \text{— число Прандтля.}$$

Физические параметры берутся при средней температуре между температурами наружной поверхности льда и окружающего воздуха. Вычисленный коэффициент теплоотдачи [1] рекомендуется увеличить на 30 %.

Зависимость общего отводимого от наружной поверхности льда к воздуху теплового потока в зависимости от температурного напора ($t_{пп} - t_{возд}$) будет иметь вид, представленный на рис. 5.

Из графика видно, что при температуре воздуха -18°C максимальная плотность теплового потока не может пре-

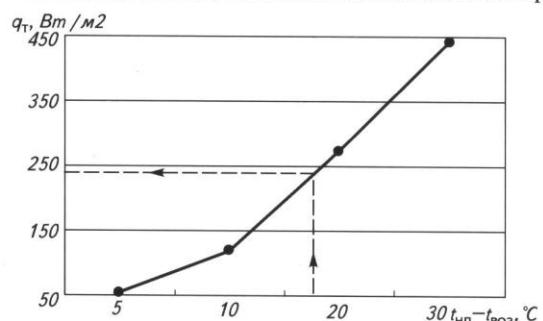


Рис. 5. Зависимость теплового потока, отводимого с открытой поверхности льда, от температурного напора

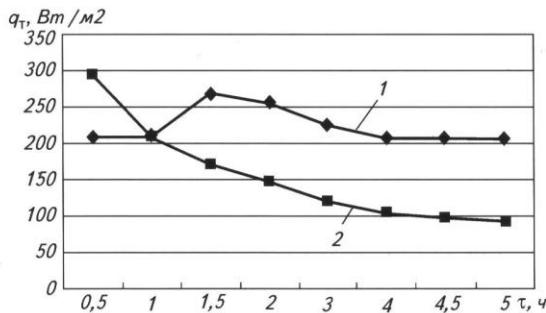


Рис. 6. Изменение плотности теплового потока, отводимого с открытой поверхности льда

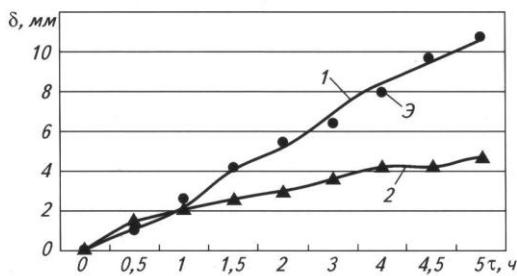


Рис. 7. Изменение толщины льда от времени промерзания:
Э — экспериментальные точки; 1 — расчет по уравнению (6) с учетом измеренных температур поверхности льда;
2 — расчет при $t_{\text{пп}} = -0,2$ °C

вышать 220...240 Вт/м². Следовательно, лимитирующим (определяющим) фактором в рассматриваемом процессе является отвод теплоты с наружной поверхности льда. При этом в течение часа процесс определяется кристаллизацией, а в дальнейшем отводом теплоты с поверхности (рис.6). Следует отметить, что за 5 ч температура наружной поверхности льда уменьшается от 0 °C до -1,0 °C, что и обеспечивает баланс тепловых потоков.

Сравнение экспериментальных данных (рис. 7, точки Э) с расчетными по уравнению (6) с учетом измеренных температур поверхности льда (кривая 1) показывает удовлетворительное совпадение, причем на начальной стадии, когда условия практически одинаковы, результаты совпадают. Расчет по уравнению (6) в предположении постоянства $t_{\text{пп}} = -0,2$ °C дает с увеличением времени замораживания большую погрешность.

Таким образом, проведенная экспериментальная проверка модельных представлений подтверждает ее правильность.

Полученные результаты позволяют оптимизировать конструктивные решения при разработке аккумуляторов холода.

Список литературы

- Луканин В.Н. Теплотехника. — М.: Высшая школа, 2000.
- Савин И.К. Возможности использования природного холода // Вестник Международной академии холода. 1998. № 1.