

УДК 69:621.58

Пуховой И.И., Ляхович Л.Н.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА И АККУМУЛИРОВАНИЯ ЛЬДА, ЗАГОТОВЛЕННОГО ЗИМОЙ В УКРАИНЕ

Розглянуто і співставлено затрати енергії на виробництво та акумулювання льоду в умовах клімату України та на виробництво льоду (холоду) в холодильних установках. Знайдено, що при найнесприятливіших умовах при споживанні холоду влітку витрата енергії зменшується в 16 раз при заготівлі льоду на водоймах і в 51 раз при виробництві його на місці акумулювання та споживання. Використання 1000 тон льоду для літнього холодопостачання зменшує емісію CO<sub>2</sub> на 20 тон. Продаж квот CO<sub>2</sub> по протоколу Кіото цілковито компенсує енергетичні затрати на заготівлю природного льоду.

Рассмотрены и сопоставлены затраты энергии на производство и аккумулярование льда в условиях климата Украины, а также на производство льда (холода) в холодильных установках. Найдено, что для наиболее неблагоприятных условий при потреблении холода летом затраты энергии уменьшаются в 16 раз при заготовке льда на водоемах и в 51 раз при производстве его на месте аккумулярования и использования. Использование 1000 т льда для летнего хладоснабжения уменьшает эмиссию CO<sub>2</sub> на 20 тонн. Продажа квот CO<sub>2</sub> по протоколу Киото полностью компенсирует энергетические затраты на заготовку естественного льда.

Are reviewed and the energy consumptions on effecting and accumulation of ice in conditions of a climate of Ukraine, and also on effecting of ice (chill) in chillers are compared. Is retrieved, that for the most unfavorable conditions at consumption of chill with summer of energy consumption decrease in 16 times at bar of ice on pools and in 51 times by effecting it(him) in place accumulations and usages. Usage 1000 т of ice for summer cold supply reduces issue(emission) CO<sub>2</sub> by 20 tons. The sale of quota CO<sub>2</sub> under the minutes Kyoto completely indemnifies power costs of bar of natural ice.

$C$  – энергетическая себестоимость 1 тонны полученного угля;

$e$  – удельный расход электроэнергии на производство и использование 1 МДж холода из естественного льда;

$E$  – расход энергии на производство 1 тонны льда;

$m$  – поправочный коэффициент для реального цикла холодильной установки (ХУ);

$q_2$  – хладопроизводительность на 1 кг льда;

$T$  – абсолютная температура теплоносителя;

$V$  – объем аккумулятора льда;

$\varepsilon$  – холодильный коэффициент;

$\beta$  – коэффициент снижения холодильного коэффициента (хладопроизводительности) в производственных условиях;

$\eta$  – КПД аккумулярования льда;

ВИЭ – возобновляемые источники энергии;

ХУ – холодильная установка.

**Нижние индексы:**

1 – на выходе из конденсатора ХУ;

2 – на выходе из испарителя ХУ;

$a$  – аккумулятор;

$r$  – реальный;

$p$  – производственный.

### Введение

Как известно, в зимнее время Земля охлаждается из-за снижения интенсивности солнечной радиации. Вызванное этим снижение температуры атмосферы и поверхности Земли с одной стороны вынуждает отапливать помещения и нести большие расходы на подогрев воды, с другой стороны – способствует увеличению мощностей паротурбинных установок (на 5...7 %) и других двигате-

лей за счет снижения температуры так называемого “холодного” источника теплоты по терминологии термодинамики.

Снижение температуры в зимнее время за счет повышенного излучения в космическое пространство позволяет сохранять продукты без затрат энергии в холодильных установках, а также увеличивает холодильный коэффициент в холодильных установках или уменьшает затрату электри-

ческой и тепловой энергии в них за счет снижения температуры конденсации хладагента. Космический холод можно считать возобновляемым источником энергии таким же вечным, как и солнечная энергия. К сожалению, в современных изданиях литературы по ВИЭ нигде о холоде, как возобновляемом источнике энергии, не упоминается [1, 2]. Прямым доказательством того, что холод является возобновляемым источником энергии, есть употребление летом льда, заготовленного зимой и аккумулированного в ледохранилищах. Лед дает холод, который бы должны были вырабатывать в летний период холодильные установки, потребляющие преимущественно электроэнергию.

До шестидесятых годов минувшего столетия лед активно заготавливался и использовался в Украине. Зона его заготовки доходила до Одессы [3]. К сожалению, об этом известном еще нашим предкам способе производства холода летом стали постепенно забывать. Но возникшие экологические проблемы снижения запасов топлива, возрастающая эмиссия  $\text{CO}_2$  и обнадеживающие статьи Киотского протокола требуют отнестись к зимнему производству и аккумулированию льда со вниманием.

### **Состояние вопроса и постановка задачи исследования**

Известны методы использования теплоты кристаллизации воды зимой для отопления зданий в комбинации с солнечной и традиционными видами энергии [4, 5]. При этом имеется двойной эффект: зимой от отопления и летом от хладоснабжения (при хранении произведенного при отоплении льда). Есть случаи применения льда в весенне-летний период для повышения эффективности небольших паротурбинных установок и холодильных машин [6]. Лед используется для хранения рыбы и охлаждения молока, в колбасном производстве и других отраслях.

В Украине лед добывают, в основном, на водоемах. В редких случаях, в южных районах, лед производился с помощью так называемых льдоградирень [3]. Поскольку последний метод не очень широко известен, отметим, что в этом случае воду подавали в верхнюю часть сооружения, представляющего собой параллельно уложенные

деревянные жерди в двух уровнях, причем жерди верхнего уровня были перпендикулярны жердям нижнего уровня. Расстояние между ними 6,5 м. Вода подавалась форсунками сверху и на жердях двух ярусов нарастали сосульки, которые периодически снимали механическим способом. За 3-4 дня при температуре  $-2...-4$  °С градирня на 50 % была заполнена льдом. Производство льда в сосульках перспективно в Украине из-за небольшого уровня отрицательных температур зимой ( $-5...-15$  °С), когда невозможно заморозить лед в каплях, полученных путем распылительных устройств. В последнем случае вода замерзает лишь при  $-20...-25$  °С [7].

Нами проведены исследования льдогенератора с распылом воды вращающимся диском и охлаждением ее в стекающей пленке. Сосульки намораживались на нижней кромке вертикального цилиндра. Метод оказался эффективным для температур ниже  $-2...-3$  °С [8]. Замораживание льда в сталактитах с внутренней твердой основой позволило получать лед даже при  $-1$  °С. Производство льда на месте его аккумулирования позволяет автоматизировать и механизировать процесс заготовки льда. При этом отпадает тяжелый ручной труд по добыче льда на водоемах, его транспортировке и дроблению.

Альтернативой летнего использования льда является производство холода и льда машинным способом с затратой электроэнергии. Поэтому в данной работе мы рассмотрим и сравним эти два варианта.

### **Затраты энергии на производство естественного льда**

Рассмотрим имеющиеся в литературе данные о затратах на производство льда. На период 60...70-х годов XX столетия в Российской Федерации естественный лед, полученный зимой, стоил в 4 раза меньше искусственного (полученного в холодильных установках) [6]. Энергетические затраты на производство и использование естественного льда оцениваются [6] в величину  $E = 0,0042$  кВт·ч на 1 МДж холода (1,4 кВт·ч на 1 тонну естественного льда или 0,015 МДж электроэнергии на 1 МДж холода). Зимой в 3 кг льда содержится 1 МДж холода, а при использовании льда летом с учетом 10 % потерь при аккумулировании, зимой

нужно заготовить не менее 3,3 кг льда на 1 МДж холода [6]. В условиях Украины следует ожидать повышения затрат льда до 4 кг/МДж при летнем использовании льда.

При производстве льда на месте его потребления или аккумуляирования затраты энергии снижаются. Наши опыты показали [8], что на распыл 1 тонны воды расход электроэнергии составляет 0,15...0,20 кВт.ч. С увеличением диаметра распылительного вращающегося диска расход электроэнергии несколько возрастает. Можно ожидать, что для рассмотренных вариантов производства льда общие затраты энергии с учетом создания аккумулятора не превышает 0,5 кВт.ч на 1 тонну льда, что в 2...3 раза меньше, чем в случае заготовки льда на водоемах.

Использование естественного льда летом приводит к потерям в аккумуляторах льда (бунтах). Если в России КПД аккумуляирования составляет  $\eta_a = 0,84...0,95$  [1], то в Украине, где климат более умеренный, следует ожидать значений  $\eta_a = 0,6...0,85$ , в зависимости от объемов аккумулятора (чем аккумулятор больше, тем выше  $\eta_a$ , в маленьких аккумуляторах  $\eta_a = 0,4...0,5$ ).

Расход электроэнергии на тонну получаемого с аккумулятора льда будет:

$$E_a = \frac{E}{\eta_a},$$

где  $E = 1,4$  кВт.ч/т для заготовок на водоемах;  $E = 0,5$  кВт.ч/т для заготовки льда на месте использования и аккумуляирования льда.

### **Затраты энергии на производство льда и холода в холодильных установках**

Рассмотрим энергетические затраты на производство холода в холодильных машинах (льдогенераторах) путем анализа обратного цикла холодильной установки. Холодильный коэффициент реального цикла  $\varepsilon_r$  определим через абсолютные температуры теплоносителей в ХУ на выходе из испарителя  $T_2$  (лёд) и на выходе из конденсатора  $T_1$  (охлаждающая вода) [9]:

$$\varepsilon_r = k \frac{T_2}{T_1 - T_2},$$

где  $k = 0,6$ .

Принимая  $T_2 = 273$  К,  $T_1 = 313$  К летом и  $T_1 = 293$  К зимой получим реальные холодильные коэффициенты для указанных условий соответственно 4 и 8.

В практических условиях работы льдогенератора в составе ХУ имеются теплопритоки в испаритель из внешней среды, особенно значимые летом, потеря хладопроизводительности в процессе размораживания полученного льда, потери энергии на получение мелкого льда механическим путем. Согласно [6] необходимая хладопроизводительность ХУ на 1 кг льда составляет по практическим данным  $q_2 = 460...860$  кДж на 1 кг льда в летний период.

Чтобы учесть производственные потери хладопроизводительности, введем понятие производственного холодильного коэффициента:

$$\varepsilon_p = \frac{\varepsilon_r}{\beta},$$

где  $\beta = \frac{m}{m_p}$  показывает во сколько раз в производственных условиях хладопроизводительность ХУ меньше расчетной. Величина  $m$  есть теоретическая выработка льда на 1 МДж холода (принимая  $m = 3,3$  кг/МДж), а  $m_p$  показывает выработку льда в производственных условиях. В соответствии с практическими данными при  $q_2 = 460...860$  кДж/кг величина  $m_p = 2,17...1,19$  кг/МДж. При указанных условиях  $\beta = 1,5...2,7$ , а величина

$\varepsilon_p = 1,48...5,33$ . В летний период значение  $\varepsilon_p$  близко к 1,5...2, а зимой  $\varepsilon_p$  лежит в диапазоне 3...5.

Найдем расход электроэнергии на 1 тонну льда (300 МДж холода), полученного летом в ХУ для  $\varepsilon_p = 1,5$  и  $\varepsilon_p = 2$ . Он составит соответственно  $E = 55$  и  $E = 41$  кВт.ч/т, что входит в практически наблюдаемый диапазон расхода электроэнергии на производство искусственного льда в ХУ [6].

### **Сравнение энергозатрат при производстве естественного и искусственного льда**

В таблице приведены результаты расчетов для двух вариантов производства естественного льда при разных объемах аккумулятора и для двух ти-

пов машинных льдогенераторов, работающих летом. Там же указаны значения  $E$  (в кВт·ч/т) и энергетическая стоимость полученного льда  $C$  в грн/т и USD/т (в скобках). При расчетах принималась цена электроэнергии 20 коп/кВт·ч (0,04 USD/кВт·ч).

Из таблицы видно, что в сравнении даже с самым экономичным льдогенератором, вырабатывающим лед летом и при небольших объемах  $V$  аккумулярования льда расход электроэнергии снижается в 16 раз при добыче льда на водоемах и в 51 раз при производстве льда на месте аккумулярования. При больших значениях  $V$  эффект будет еще большим.

Напомним, что рассчитанная себестоимость производства льда  $C$  включает лишь энергетические затраты. Прочие затраты: зарплата рабочим при добыче и складывании льда, амортизация машин и оборудования для перевозки и складывания льда, плата за воду и землю под аккумулятором, а также другие расходы должны быть дополнительно рассмотрены для конкретных условий. При изучении экономических показателей следует также принять во внимание снижение выбросов  $CO_2$  при использовании естественного льда вместо вырабатываемого в ХУ. Благодаря возможностям по продаже квот  $CO_2$  в соответствии с протоколом Киото стоимость 1 тонны  $CO_2$  составляет в 2002 году около 5 USD/т, а к 2010 году, по прогнозам, она будет 10...15 USD/т. Чтобы оценить уменьшение выбросов  $CO_2$ , следует найти экономию топлива. При производстве

1 кВт·ч электроэнергии на ТЭС используется около 0,3 кг условного топлива (у.т.). Тогда на производство 1 тонны естественного льда будет израсходовано от 0,17 до 0,75 кг у.т., а на получение 1 тонны искусственного льда машинным способом – 12...16,5 кг топлива. Экономия составляет 11...16 кг/т льда.

При сгорании 1 тонны у.т. выделяется около 2 тонн  $CO_2$ . При использовании 1000 тонн льда эмиссия  $CO_2$  снижается минимум на 20 тонн, что составляет на 1 тонну льда – 0,02 тонны  $CO_2$ . Это приносит доход при продаже квот 0,1...0,2 USD/т льда, что полностью компенсирует энергетические затраты на производство естественного льда и даже дает прибыль до 18 USD за 1000 тонн льда при больших объемах аккумулярования, а также при производстве и аккумуляровании естественного льда на месте потребления.

### Выводы

1. Затраты энергии на производство естественного льда изменяются от 0,2 до 1,4 кВт·ч на тонну льда в зависимости от метода заготовки льда.
2. Затраты электроэнергии в холодильных установках, производящих лёд изменяются от 40 до 55 кВт·ч на тонну льда в зависимости от типа установок.
3. Производство естественного и искусственного льда требует соответственно от 0,17 до 0,75 и от 12 до 16,5 кг условного топлива на тонну льда.
4. Экономия, полученная от продажи квот на выброс  $CO_2$  согласно протоколу Киото компенсирует полностью затраты на энергию при произ-

Таблица 1

Естественный лед								Искусственный лед (ХУ)					
Из водоемов				Полученный на месте аккумулярования				Льдогенератор					
Объем аккумулятора, м <sup>3</sup>				Объем аккумулятора, м <sup>3</sup>				Ординарный	Экономичный				
V = 500...1000		V = 3000		V = 500...1000		V = 3000				E, кВт·ч/т	C, грн/т	E, кВт·ч/т	C, грн/т
E, кВт·ч/т	C, грн/т	E, кВт·ч/т	C, грн/т	E, кВт·ч/т	C, грн/т	E, кВт·ч/т	C, грн/т	E, кВт·ч/т	C, грн/т	E, кВт·ч/т	C, грн/т		
2.5	0.5 (0.1)	1.5	0.3 (0.06)	0.8	0.16 (0.03)	0.59	0.12 (0.021)	55	11 (2)	41	8.2 (1.65)		

водстве естественного льда.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Мхитарян Н.М.* Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников.– Киев: Наукова думка, 1999.– 313 с.
2. *Дикий М.О.* Поновлювані джерела енергії.– Київ: Вища школа, 1993.– 351 с.
3. *Бобков В.А.* Производство и применение водного льда.– М.: Госиздат торговой литературы, 1961.– 168с.
4. *Пуховой И.И.* Пассивные солнечные системы отопления, использующие теплоту кристаллизации воды//Промышленная теплотехника.– 1998.– Т. 20.– № 5.– С. 47-51.
5. *Пуховой И.И.*– А.с. 1388665 (СССР) МКИ F24D15/00. Система отопления здания И.И. Пухового.
6. Различные области применения холода/ Под ред. *А.В. Быкова.*– М.:Агропромиздат, 1985.– 272 с.
7. *Сморыгин Г.И.* Теория и методы получения искусственного льда.– Новосибирск: Наука. Сибирский отдел, 1988.– 282 с.
8. *Пуховий І.І., Живиця В.В.* Розробка та гідродинамічні дослідження бурулькового льодогенератора, що використовує природний холод// Наукові вісті Національного Технічного Університету України “КПІ”.– 1997. Серія теплоенергетики.– С.26-28.
9. *Patry I.* Stockage par chaleur latente.– Paris: PYS Edition, 1981.– 279p.

Получено 29.01.2003 г.