

Б.Т. Маринюк, А.Е. Ермолаев

ВАКУУМНО-СУБЛИМАЦИОННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДНОГО ЛЬДА

Производство водного льда связано со значительными энергетическими затратами, связанными не только со спецификой свойств воды, имеющей высокую теплоту замерзания, но и из-за недостатков, связанных со схемой организации технологии его производства.

В частности, распространенной схемой производства водного льда является его намораживание на изотермической поверхности стенки, охлаждаемой изнутри и погруженной в воду. Такой пример является панельный погружной холодоаккумулятор, который при периодическом оттаивании может действовать как льдогенератор.

Другим примером может служить барабанный генератор водного льда, в котором осуществляется непрерывный процесс льдогенерации. Съем слоя льда здесь производится с помощью неподвижного скребкового устройства, снимающего слой с вращающегося барабана. Во всяком случае, на рынке холодильного оборудования широко предлагаются такие аппараты. По оценкам, в подобных аппаратах на 1 кг произведенного льда расходуется 0,23 — 0,35 кВт·ч электроэнергии (льдогенераторы EURFRIGOR, получается лед в форме кубиков со стороной 33 мм), в рассольных блочных льдогенераторах для стальных льдоформ затраты энергии на 1 кг льда составляют 0,145 — 0,163 кВт·ч [1].

Принципиальным недостатком аппаратов с намораживанием льда на охлаждаемой поверхности, погруженной в воду, является повышение термического сопротивления слоя льда при росте его толщины. Известно, что коэффициент теплопроводности водного льда при околонулевой температуре составляет приблизительно $2,23 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{гр}^{-1}$ и повышается с понижением

температуры. Стремление намораживать слои льда большей толщины приводит к понижению температуры кипения холодильного агента, охлаждающего поверхность намораживания, соответственно повышается расход энергии, потребляемой компрессорным агрегатом. Эффективность процесса намораживания уменьшается. Поэтому останавливаются на достаточно тонких слоях льда, которые легче отделяются от подложки.

Существуют также и другие методы производства водного льда с послойным намораживанием на стенке в среде холодного воздуха. Стенка в этом случае не охлаждается, а только орошается водой, которая, замерзая, удерживается на ней.

В данной схеме пленка воды замерзает за счет потока холодного воздуха, который подохлаждается в воздухоохладителе. Паразитное влияние термического сопротивления слоев льда существенно уменьшается, однако эффективность процесса замерзания слоев воды низкая из-за малоинтенсивного процесса теплоотдачи от воздуха к пленке воды, которая не превышает в условиях направленного обдува 40—50 Вт·м². При разности температур между воздухом и пленкой воздуха в 15 °С плотность теплового потока q составит 600—700 Вт·м². Соответственно можно ожидать интенсивность намораживания на уровне $(2,2—2,5) \cdot 10^{-3}$ кг·м⁻²·ч⁻¹. То есть с 1 м² теплопередающей поверхности за 1 час можно получить 8—10 кг льда, что сравнимо с методом намораживания льда на охлаждаемой поверхности стенки, погруженной в воду. При этом удельный расход энергии здесь будет выше из-за больших потерь от необратимости процесса теплообмена.

Более удачным с точки зрения эффективности ведения процесса может оказаться вариант послойного намораживания водного в вакуумно-сублимационной колонке, днище которой представляет собой вакуумный затвор-задвижку (рисунок 1). В процессе сублимации с поверхности ледяного слоя в резервуаре-испарителе при давлении ниже атмосферного (1 — 30 мм рт. ст.) происходит интенсивный отвод тепла с порциями паров, откачиваемых

специальным двухроторным вакуумным насосом, которые затем конденсируются в водяном конденсаторе.

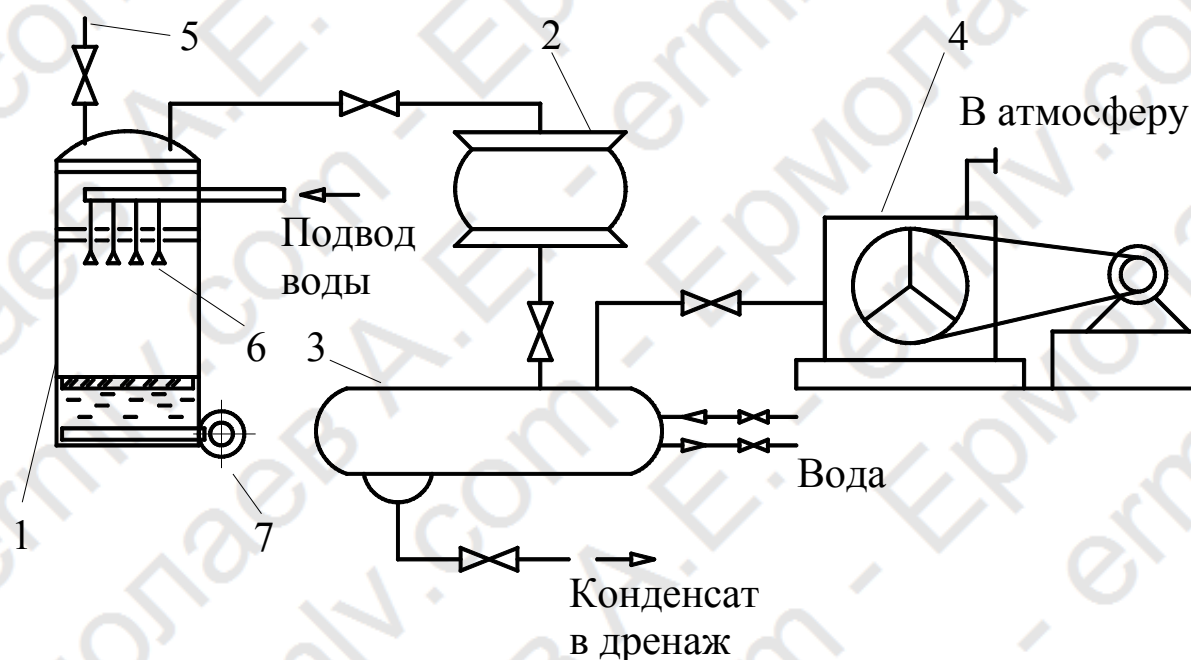


Рисунок 1 — Схема вакуумно-сублимационной установки по производству водного льда

1 — резервуар-накопитель; 2 — основной вакуумный насос;
3 — водяной конденсатор; 4 — вспомогательный механический вакуумный насос;
5 — вентиль-натекатель; 6 — форсунки для впрыска воды; 7 — задвижка

Процесс намораживания водного льда по такой схеме осуществляется в следующей последовательности.

Рабочее вещество (вода) заправляется в бак-испаритель, который сначала вакуумируется с помощью вспомогательного насоса, создающего предварительное разрежение, необходимое для работы основного насоса, особенностью которого является невозможность работы с атмосферным давлением на входе. Как только давление в испарительной системе достигнет необходимого значения (10—25 мм рт. ст.) включается основной насос, создающий рабочее давление на уровне 1—7 мм рт. ст., при котором и происходит предварительный процесс вакуумного кипения охлаждаемой

жидкости (и далее основной процесс — сублимации льда). Во время работы основного насоса часть рабочего вещества (воды) испаряется (сублимируется), поглощая при этом тепло и соответственно охлаждая основную массу рабочего вещества, при этом откачиваемые основным насосом пары уносятся в вакуумные коммуникации и попадают затем в конденсатор, где основная часть тепла передается охлаждающей жидкости, а водяные пары конденсируются.

Результаты работы установки были оценены и с энергетической точки зрения. По предварительным оценкам затраты электроэнергии на производство 1 кг льда вакуумно-сублимационным методом составляют 0,240 кВт·ч. Этот показатель можно существенно уменьшить применяя в качестве вспомогательного вакуумного насоса машину с меньшей быстротой откачки 1—3 л·с⁻¹, а не 5 л·с⁻¹, которая была задействована в экспериментальной установке

Для расчета зависимости толщины слоя намораживаемого льда ξ от времени τ предлагается следующая формула:

$$\xi = \frac{2 \cdot \tau \cdot S^* \cdot (L+r) \cdot \mu}{L \cdot \rho_{\text{л}} \cdot R} \cdot \left(k - \frac{b}{T_{\text{ф}} - \frac{\rho_{\text{л}} \cdot L \cdot \xi^2}{2 \cdot \lambda \cdot \tau}} \right), \quad (1)$$

где S^* — скорость откачки основного насоса, отнесенная к площади поверхности, с которой испаряется водяной пар; μ — молекулярная масса воды; L — удельная теплота льдообразования воды; r — удельная теплота парообразования воды; R — универсальная газовая постоянная; k — эмпирическая константа ($k = 35$); b — эмпирическая константа ($b = 8940$); λ — коэффициент теплопроводности льда; τ — время; ξ — толщина намороженного слоя льда; $\rho_{\text{л}}$ — плотность льда; $T_{\text{ф}}$ — температура фазового перехода воды в лед.

По результатам опытов (толщина каждого слоя до 10 мм) и предложенному выше уравнению были построены зависимости толщины слоя льда от времени (рисунок 2).

Намораживание слоями по 10 мм

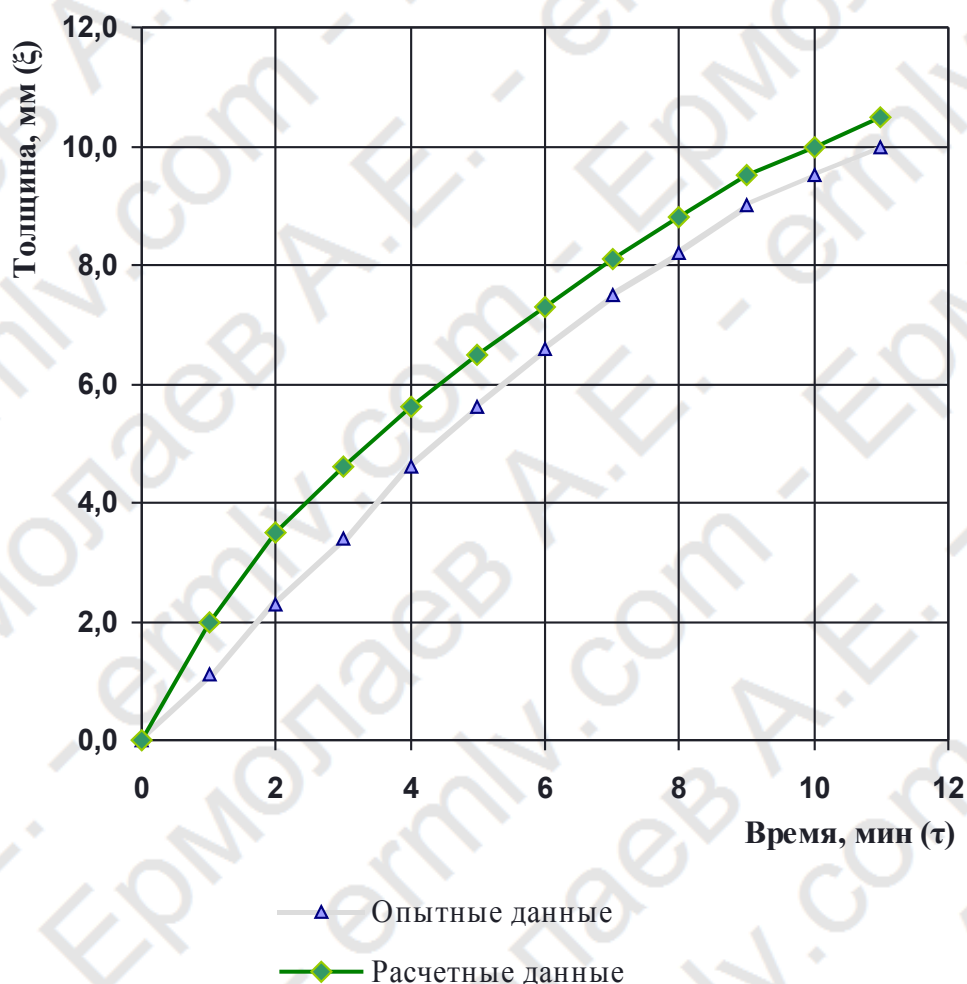


Рисунок 2 — Сравнение экспериментальных и теоретических данных по вакуумно-сублимационной ледогенерации

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобков, В.А. Производство и применение льда / В.А. Бобков. — М. : "Пищевая промышленность", 1977. — 231 с., ил.
2. Маринюк, Б.Т. Вакуумно-испарительные холодильные установки, теплообменники и газификаторы техники низких температур / Б.Т. Маринюк. — М. : "Энергоатомиздат", 2003. — 208 с., ил.