

Математическая модель абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины с двухступенчатой генерацией пара рабочего вещества

Д-р техн. наук Л. С. ТИМОФЕЕВСКИЙ, О. С. МАЛИНИНА

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Energy and technical economical efficiencies of a lithium bromide absorption refrigerator with two stage generation of working substance vapor (BARD), operating on three circuits are influenced by parameters of external sources of heat and temperature drops in apparatus. To estimate efficiency there was developed a simulator which consists of subprograms to calculate thermodynamic cycles, thermodynamic and thermophysical properties of water, water vapor and aqueous solution of lithium bromide; subprograms to calculate heat exchange apparatus and basic technical economic indices. The mathematical model developed helps to define the most effective type of machine for prescribed parameters of external heat sources.

Keywords: energy and technical economical efficiency, mathematical model, simulator, thermodynamic cycle.

Ключевые слова: энергетическая и технико-экономическая эффективность, математическая модель, термодинамический цикл.

В настоящее время в промышленности широко применяются абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины с двухступенчатой генерацией пара рабочего вещества (АБХМД) для получения холода в области положительных температур для различных технологических нужд. Эффективность АБХМД зависит от параметров внешних источников теплоты, перепадов температур в аппаратах, от стоимости сухой машины, количества бромистого лития в теплообменных аппаратах, стоимости греющего источника (пара, горячей воды, продуктов сгорания природного газа) и других факторов.

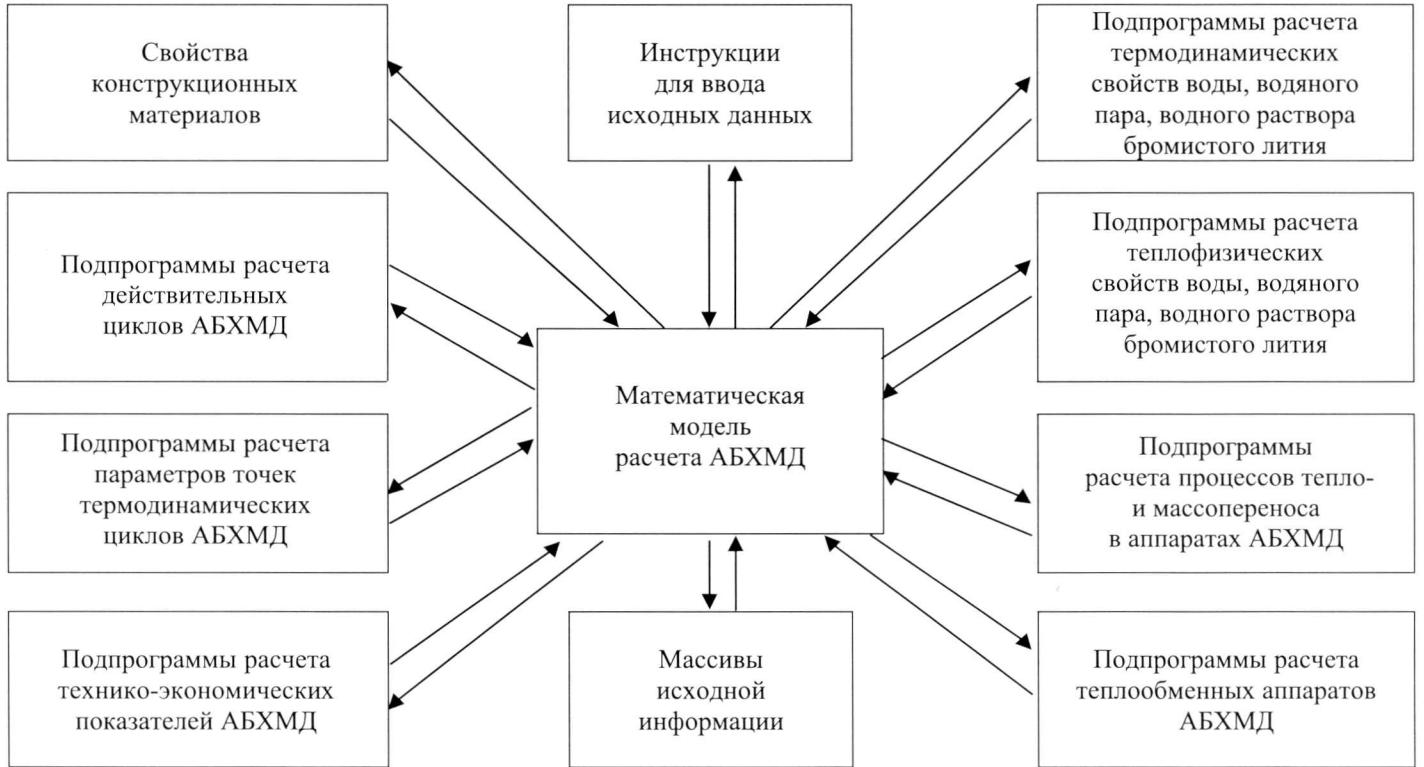
В данном случае рассматривается оценка эффективности АБХМД с тремя схемами движения раствора через ступени генератора: параллельной, последовательной [1] и противоточной. На основании предыдущих исследований оценка влияния перепадов температур в аппаратах до настоящего времени не рассматривалась, а принималась произвольно без технико-экономического обоснования для данных машин. Хотя предварительные расчеты по-

казали, что только величина перепадов температур на холодной стороне теплообменников раствора существенно влияет на эффективность АБХМД [2].

Для того чтобы оценить влияние изменяющихся параметров внешних источников теплоты и перепадов температур в аппаратах АБХМД, работающих по указанным схемам, имеется математическая модель, структурная схема которой показана на рисунке. Такая форма моделирования была использована в работах [3, 4].

Разработанная математическая модель включает в себя следующие подпрограммы:

1. Расчет термодинамического цикла. Осуществляется по известным методикам с учетом необратимых потерь действительных процессов [1].
2. Определение термодинамических свойств воды, водяного пара и водного раствора бромистого лития.
 - 2.1. Определение термодинамических свойств воды, водяного пара.



Структурная схема формирования математической модели расчета АБХМД

Наиболее надежные данные по термодинамическим свойствам воды и водяного пара приведены в источнике [5]. Была осуществлена их аппроксимация. В результате получены следующие зависимости:

— температура насыщенного водяного пара, °C

$$t = \frac{630,96}{\sqrt{50,65 - 1,663 \ln p} - 4,865} - 273,15,$$

где p — давление, кПа;

— энталпия насыщенного водяного пара, кДж/кг

$$h = \varphi(t) = 2919,7 + 1,903t - 0,00158t^2.$$

2.2. Определение термодинамических свойств водного раствора бромистого лития:

— температура водного раствора бромистого лития, °C

$$t = \frac{\sqrt{B^2 - 4AC + 4hC(1000 + 86,85m)} - B}{2C};$$

— энталпия водного раствора бромистого лития, кДж/кг [6]

$$h = \sum_{n=0}^4 a_n \xi^n + T \sum_{n=0}^3 b_n \xi_n + T^2 \sum_{n=0}^2 c_n \xi^n + T^3 d_n,$$

где T — температура, К;

a_n, b_n, c_n, d_n — постоянные коэффициенты.

С учетом разности опытных и расчетных значений энталпии в работе [7] получено выражение

$$h^* = h + \Delta h,$$

где $\Delta h = 357,492 - 204,546\xi - 240,476\xi^2$, кДж/кг.

3. Определение теплофизических свойств воды, водяного пара и водного раствора бромистого лития.

3.1. Определение теплофизических свойств воды и водяного пара.

При аппроксимации теплофизических свойств воды в пределах интервала $0 \leq t \leq 200$ °C получены следующие выражения:

— коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)

$$\lambda_w = (568,35974 + 1,8780693t - 0,0084004113t^2 + 8,3695795 \cdot 10^{-6}t^3 - 6,5978130 \cdot 10^{-9}t^4) \cdot 10^{-3},$$

где t — температура, °C;

— удельная теплота парообразования, кДж/кг

$$r = 2500,9661 - 2,3566201t + 0,00022992294t^2 - 8,1548314 \cdot 10^{-6}t^3 - 2,1617456 \cdot 10^{-8}t^4;$$

— поверхностное натяжение, Н/м

$$\sigma_w = (75,684092 - 0,14374270t - 0,00020954004t^2 - 5,1034190 \cdot 10^{-7}t^3 + 2,0670428 \cdot 10^{-9}t^4) \cdot 10^{-3}.$$

3.2. Определение теплофизических свойств водного раствора бромистого лития [1]:

— удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)

$$c = 3,6371 - 0,029\xi + 1,4285714 \cdot 10^{-5}(65t + 30\xi - t\xi);$$

— коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К):

при $t \leq 80^\circ\text{C}$

$$\lambda_p = -3,5552933 + 3,407759 \cdot 10^{-2}T - 9,381419 \cdot 10^{-5}T^2 + \\ + 8,834924 \cdot 10^{-8}T^3 + A(\xi);$$

при $t > 80^\circ\text{C}$

$$\lambda_p = -8,8574733 + 6,973969 \cdot 10^{-6}T - 1,694229 \cdot 10^{-4}T^2 + \\ + 13,689024 \cdot 10^{-8}T^3 + A(\xi);$$

— коэффициент динамической вязкости, Па·с:
при $35 \leq t \leq 70^\circ\text{C}$ и $55 \leq \xi \leq 60\%$

$$\mu_p = [1,8793 - 0,025765\xi - 0,035t + 0,004\xi t + \\ + \frac{(-169,263 + 6,989\xi)}{(t + 223,95 - 3,63\xi)}] 10^{-3};$$

при $70 \leq t \leq 180^\circ\text{C}$ и $55 \leq \xi \leq 60\%$

$$\mu_p = \left[-0,5707 + 0,009235\xi + \frac{(-169,263 + 6,989\xi)}{(t + 223,95 - 3,63\xi)} \right] 10^{-3};$$

— поверхностное натяжение, Н/м

$$\sigma_p = (A_1 + A_2T + A_3T^2 + A_4T^3 + A_5\xi + A_6T\xi + \\ + A_7T^2\xi + A_8\xi^2 + A_9T\xi^2 + A_{10}\xi^3) / 100.$$

4. Термовой и конструктивный расчет аппаратов:

— определение средних значений логарифмической разности температур в аппаратах Θ_i ;

— определение коэффициента теплопередачи между средами в аппаратах (проводится по известным методикам [1]);

— площадь теплопередающих поверхностей, м²

$$F_i = \frac{Q_i}{k_i \Theta_i},$$

где i — обозначение аппарата;

— объем бромистого лития в теплообменных аппаратах, м³

$$V_i = F_i V_{\text{LiBr}_i};$$

— масса раствора бромистого лития в каждом из аппаратов, кг

$$M_i = V_i \rho_i;$$

— массовый расход охлаждающей воды, кг/с:
в абсорбере

$$G_{wa} = \frac{Q_a}{c_{p_w} \Delta t_{wa}};$$

в конденсаторе

$$G_{wk} = \frac{Q_k}{c_{p_w} \Delta t_{wk}};$$

— массовый расход греющей среды, кг/с:
воды

$$G_{wh} = \frac{Q_{\text{г.в}}}{c_{p_w} \Delta t_h};$$

водяного пара

$$G_n = \frac{Q_{\text{г.в}}}{r},$$

где r — удельная теплота парообразования, кДж/кг.

5. Расчет основных технико-экономических показателей:

— капитальные затраты, руб.

$$K = \frac{K_{\text{обор}} + K_{\text{LiBr}} + K_{\text{с.м.р}} + K_{\text{тр}}}{1 - k_{\text{пр}}},$$

где $K_{\text{обор}}$ — стоимость оборудования, руб.;

K_{LiBr} — стоимость соли бромида лития для первоначального заполнения АБХМД, руб.;

$K_{\text{с.м.р}}$ — затраты на строительно-монтажные работы, руб.;

$K_{\text{тр}}$ — затраты на монтаж трубопроводов, связывающих АБХМД с внешними источниками и потребителями, руб.;

$k_{\text{пр}}$ — прочие затраты, %;

— эксплуатационные издержки, руб./год

$$I = I_{\text{пост}} + I_{\text{пер}},$$

где $I_{\text{пост}}$ — постоянные издержки производства, руб./год;

$I_{\text{пер}}$ — переменные (энергетические) издержки производства, руб./год;

— себестоимость производства холода в АБХМД, руб./ГДж

$$c_x^{\text{пр}} = \frac{И}{Q_{\text{год}}},$$

где $Q_{\text{год}}$ — годовой объем производства холода, ГДж;
— экономический эффект, руб./год

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = (c_x - c_x^{\text{пр}})Q_{\text{год}},$$

где c_x — себестоимость производства холода в базовом варианте, руб./ГДж;

— чистый дисконтированный доход (ЧДД)

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^{T_{\text{пр}}} |K_{\text{доп } t} - \mathcal{E}_{\text{год } t}| DF_t,$$

где $T_{\text{пр}}$ — планируемый срок реализации проекта, лет;

$\mathcal{E}_{\text{год } t}$ — экономический эффект от реализации проекта в год t , руб.;

DF_t — коэффициент дисконтирования.

С помощью разработанной математической модели можно определить наиболее эффективный тип машины для заданных параметров внешних источников теплоты.

Список литературы

1. Абсорбционные преобразователи теплоты: Моногр. / А. В. Бараненко, Л. С. Тимофеевский, А. Г. Долотов, А. В. Попов. — СПб.: СПбГУНиПТ, 2005.

2. Малышев Л. А., Малинина О. С., Тимофеевский Л. С. Оценка влияния теплообменников растворов на эффективность абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины // Вестник МАХ. 2008. № 2.

3. Желудь А. А., Волкова О. В., Тимофеевский Л. С. Принципы формирования математической модели для определения путей совершенствования абсорбционных бромистолитиевых преобразователей теплоты // Вестник МАХ. 2005. № 2.

4. Желудь А. А., Миневцев Р. М. Основные принципы формирования математической модели для определения путей совершенствования абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин // Известия СПбГУНиПТ. 2003. № 1.

5. Вукалович М. П. и др. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. — М.: Стандарты, 1969.

6. Alefeld G. Bestimmung der thermophysikalischen Daten des stjffpaaras Wasser-Lihiumbromid // Technischen Universität. München. 1991. S. 25.

7. Долотов А. Г., Тимофеевский Л. С., Пятко В. Ю. Уточнение расчета термодинамических свойств водного раствора бромистого лития на ЭВМ // Холодильная техника. 1995. № 9–10.