

文章编号:0254-0096(2016)02-0505-06

横管式太阳能苦咸水淡化装置产水性能研究

常泽辉¹, 于苗苗¹, 郑子行², 侯静³, 代志涛¹, 国玉冰¹

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 中国船舶重工集团公司第七零四研究所, 上海 200031;
3. 内蒙古建筑职业技术学院机电与暖通工程学院, 呼和浩特 010070)

摘要: 提出一种新型横管式太阳能苦咸水淡化装置, 介绍装置的工作原理, 通过建立装置内传热传质关系, 得到单效及两效横管式太阳能苦咸水淡化装置的淡水产量预测值。用电加热管代替太阳能集热系统, 对单效和两效装置在稳态运行时测点温度变化和产水速率进行测试。结果表明: 两个装置稳态运行时, 蒸汽主要在套管内上部进行凝结, 产水速率均随加热温度的升高而增大, 两效淡化装置在加热温度为 80 °C 时的淡水产量为 0.728 kg/h, 是单效装置的 2.1 倍, 实验测试值与理论计算值随温度变化趋势一致, 两效淡化装置性能系数可达 1.67。

关键词: 太阳能; 横管; 产水速率; 苦咸水淡化

中图分类号: TK513.5 **文献标识码:** A

0 引言

Tiwari^[1]于 1988 年提出了管式太阳能蒸馏器的概念。在随后的几十年间, Ahsan 等^[2]对单效管式太阳能海水蒸馏淡化装置的传热传质过程进行了分析, 又对管子的材料做了研究, 利用聚乙烯材料作为管壁, 并对这种新型材料的管式蒸馏器进行了实验测试研究。Arunkumar 等^[3]研究了水和空气流量对同心管式太阳能海水淡化系统的影响。Rahmani 等^[4]为了提高传统太阳能蒸馏器的性能, 提出了一种新的实验方法, 即在太阳能蒸馏器内部应用一种集成的自然循环回路, 结果表明这种方法可提高日产水量。Rahbar 等^[5]利用 CFD 对管式太阳能蒸馏器内部的传热传质过程进行仿真, 提出了此类蒸馏器淡水产量预测值与传热传质系数之间新的关系式, 并将仿真结果与实验值进行了对比验证。

上述研究表明, 管式太阳能蒸馏器具有很多优势, 比如产水性能较好、结构简单、制作容易、维护方便、成本低、可实现多管组合运行以满足不同的淡水需求等。笔者在上述研究的基础上, 提出一种新型横管式太阳能苦咸水淡化装置, 并对其内部传

热传质过程进行理论分析、预测理论淡水产量, 并与实验测试值进行对比验证。

1 装置的结构及其工作原理

本文研究的装置包括单效太阳能苦咸水淡化装置和两效太阳能苦咸水淡化装置。其中, 两效太阳能苦咸水淡化系统结构如图 1 所示, 该装置由 4 根不锈钢管偏心嵌套组成, 由内向外的两级盛水槽以及各自对应的套管分别构成了第一、二级蒸发凝结腔。

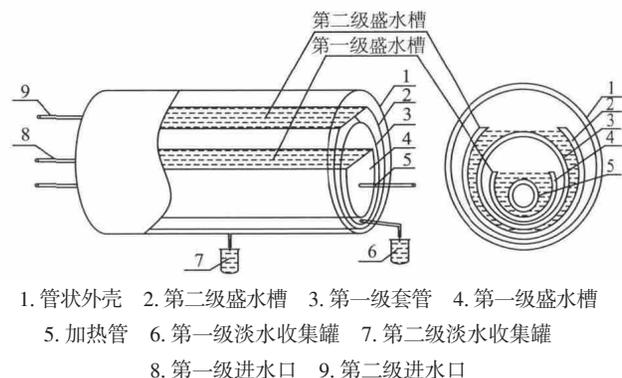


图 1 两效横管式太阳能苦咸水淡化装置结构图
Fig. 1 Structure diagram of double-effective horizontal tubular style solar desalination device

收稿日期: 2015-09-07

基金项目: 国家自然科学基金(U1261119); 内蒙古自然科学基金(2013MS0704; 2015MS0545); 内蒙古工业大学科学研究重点项目(ZD201507)

通信作者: 常泽辉(1978—), 男, 博士、副教授、硕士生导师, 主要从事太阳能热利用技术及海水淡化技术研究。changzehui@163.com

装置工作原理为:进料苦咸水从第一级,第二级进水口 8、9 分别进入对应的盛水槽中,太阳集热器通过加热管 5 加热第一级盛水槽中的苦咸水从而产生蒸汽。由于第二级盛水槽中的苦咸水温度较低,从而导致第一级套管内壁的温度低于其内部的蒸汽温度,因此蒸汽会在第一级套管的内壁上凝结成淡水,沿着管壁流到套管的底部,由第一级排水口流到淡水收集罐中,则蒸汽冷凝时会释放气化潜热,加热第二级盛水槽中的苦咸水。同时,加热管所产生的热量会通过对流和辐射两种传热方式传给第二级盛水槽中的苦咸水。这时第二级盛水槽中的苦咸水因受热蒸发产生蒸汽,同样由于套管外壳的内壁温度低于蒸汽温度,蒸汽会在管状外壳的内壁上凝结产生淡水,产生的淡水会顺着管壁流下通过第二级淡水出口进入淡水收集罐 7 中。

单效装置与两效装置中的第一级单元工作原理及结构相似,其实验装置的蒸发面面积即为装置盛水槽的开口面积。实验装置具体尺寸如表 1 所示。

表 1 实验装置尺寸

效数	盛水槽开口		外部套管		蒸发面积/ m ²	冷凝面积/ m ²
	尺寸/mm		尺寸/mm			
	管长	直径	管长	直径		
单效	1900	110	2000	133	0.209	0.835
两效	1900	100	1950	114	0.190	0.698
	1950	124	2000	168	0.242	1.055

横管式太阳能苦咸水淡化装置具有如下特点: 1)对于多效装置,能够对蒸汽冷凝时释放的汽化潜热进行重复利用,因此可提高装置能量利用效率和淡水产量; 2)装置中的冷凝面面积始终比对应的蒸发面面积大,可为蒸汽能够更好的凝结提供有利条件,加之冷凝套管是圆柱面,便于淡水的收集; 3)可通过增加盛水槽和套管数量来提高装置的淡水产量,满足不同的淡水需求。

2 横管式太阳能苦咸水淡化系统理论产水量预测

2.1 两效装置内传热传质过程

两效横管式太阳能苦咸水淡化装置内部能量的传输如图 2 所示。

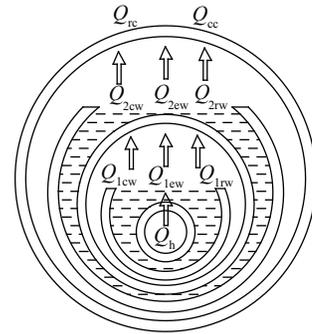


图 2 两效装置内传热传质过程

Fig. 2 Heat and mass process in the double-effect device

为了便于计算和分析,在装置运行时,假设置备内部混合气体组分为干空气和水蒸气的混合气体。作为近似讨论,认为水蒸气遵守理想气体状态方程:

$$p_a V = m_a R_g T \quad (1)$$

$$p_w V = m_w R_g T \quad (2)$$

则装置内混合气体密度为:

$$\rho_m = \frac{m_a + m_w}{V} = \frac{p_a M_a + p_w M_w}{RT_{av}} = \rho_a + \rho_w \quad (3)$$

式中, p ——平均压力, Pa; V ——气体体积, m³; m ——气体质量, kg; R_g ——气体常数, $R_g = R/M$, kJ/(kg·K), 其中 M 为摩尔质量; T ——温度, K; ρ ——气体密度, kg/m³; R ——摩尔气体常数, $R = 8.3145$ J/(mol·K); T_{av} ——装置内蒸发面和冷凝面平均温度; 下标 a, w ——空气、水蒸气。

假设装置内部为饱和水蒸气,则可利用式(4)计算不同温度下水蒸气的饱和蒸汽压 $p_w^{[6]}$ 。

$$p_w = e^{\left(\frac{25.317 - \frac{5144}{t+273}}{t}\right)} \quad (4)$$

式中, t ——温度, °C。

2.2 装置内有限空间自然对流传质

对于横管式太阳能苦咸水淡化装置内部的自然对流传质过程可用瑞利数加以表示:

$$Ra = Gr \times Pr \quad (5)$$

式中, Gr ——格拉晓夫数; Pr ——普朗特数。

在装置内部,除温差外,还存在空气中水蒸气的浓度差,由于水蒸气比空气轻,故装置内的传质过程加速了热量的传输。因此,对于多效横管式太阳能苦咸水淡化装置,需对格拉晓夫数进行修正,可采用 Sharpley 和 Boelter 的定义式^[7]进行计算:

$$Gr' = \frac{x_1^3 \rho^2 g}{\mu^2} \left(\frac{M_g' T_e}{M_e' T_g} - 1 \right) \quad (6)$$

式中, x_1 ——横管对流空腔的特征尺寸; ρ ——混合气体的密度; μ ——混合气体的动力黏度, Pa·s; M' ——湿空气的摩尔质量, g/mol; 下标 e、g ——蒸发面、冷凝面。

在装置内部, 湿空气的摩尔质量 M' 存在如下关系:

$$M' = M_a \frac{p_a}{p_T} + M_w \frac{p_w}{p_T} \quad (7)$$

式中, p_T ——装置内湿空气的总压力, 大小与环境大气压相同, $p_T = 101.3$ kPa。

将式(7)代入式(6), 整理后, 则:

$$Gr' = \frac{x_1^3 \rho^2 g}{\mu^2 T_g} \left[(T_e - T_g) + \frac{(p_e - p_g) T_e}{\frac{M_a p_T}{M_a - M_w} - p_{ew}} \right] \quad (8)$$

式中, M_a ——干空气的摩尔质量, $M_a = 28.96$ g/mol; M_w ——水蒸气的摩尔质量, $M_w = 18$ g/mol。

普朗特数可由式(9)计算。

$$Pr = \frac{c_{p,a-w} \mu}{k} \quad (9)$$

式中, $c_{p,a-w}$ ——装置空腔内湿空气的定压比热容, J/(kg·K); k ——工作介质的热导率, W/(m·K)。

上述两参数可通过以下经验公式^[8]进行计算:

$$c_{p,a-w} = 0.9992 \times 10^3 + 1.4339 \times 10^{-1} T_{av} + 1.101 \times 10^{-4} T_{av}^2 - 6.7581 \times 10^{-8} T_{av}^3 \quad (10)$$

$$k = 0.024 + 0.7673 \times 10^{-4} T_{av} \quad (11)$$

式中, T_{av} ——蒸发面温度和冷凝面温度的平均值, K。

对流换热系数 h_c 和传质系数 h_m 之间的关系为:

$$\frac{h_c}{h_m} = \frac{k}{D_{a-w}} (Le)^n \quad (12)$$

$$Le = \frac{a}{D_{a-w}} \quad (13)$$

式中, Le ——刘易斯数; a ——热扩散系数; D_{a-w} ——水蒸气在空气中的质扩散系数, 可采用经验关联式(14)计算。

$$D_{a-w} = \frac{0.00143 T_{av}^{1.75}}{p_T M_{aw}^{0.5} \left[\left(\sum_v \right)_a^{1/3} + \left(\sum_v \right)_w^{1/3} \right]^2} \quad (14)$$

对流传热系数 h_c 可由经验关联式(15)计算。

$$h_c = \frac{k}{x_1} CRa^n \quad (15)$$

式中, C 、 n ——关联式经验常数。

湿空气的密度 ρ 和动力黏度 μ_m 可采用式(16)和式(17)计算^[9]。

$$\rho = A_0 + A_1 t_{av} + A_2 t_{av}^2 + A_3 t_{av}^3 \quad (16)$$

$$\mu_m = B_0 + B_1 t_{av} + B_2 t_{av}^2 + B_3 t_{av}^3 + B_4 t_{av}^4 \quad (17)$$

式中, t_{av} ——装置蒸发面和冷凝面温度的平均值, °C。公式中的系数值如表2所示。

表2 湿空气物性参数计算公式(16)和(17)中物性参数值

Table 2 The value of the coefficients in Eqs.(16)and(17)	
$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\mu_m/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$
$A_0=1.299995662$	$B_0=1.685731754\times 10^{-5}$
$A_1=-6.043625845\times 10^{-3}$	$B_1=9.151853945\times 10^{-8}$
$A_2=4.697926602\times 10^{-5}$	$B_2=-2.16276222\times 10^{-9}$
$A_3=-5.760867827\times 10^{-7}$	$B_3=3.1413922553\times 10^{-11}$
-	$B_4=-2.644372665\times 10^{-13}$

于是, 横管式太阳能苦咸水淡化装置中的自然对流传质系数可表示为:

$$h_m = \frac{h_c}{\rho c_{p,a-w} Le^{1-n}} \quad (18)$$

根据对流传质关系式, 定温加热实验时装置的产水速率 \dot{m} (kg/s)为:

$$\dot{m} = h_m A_w (\rho_e - \rho_g) \quad (19)$$

这样, 即可计算出在不同加热温度下两种实验装置稳态运行时的产水速率。

3 横管式太阳能苦咸水淡化系统实验测试及与理论值对比

3.1 装置内测点温度变化实验及分析

分别对单效和两效横管式太阳能苦咸水淡化装置进行定温稳态加热实验。实验中, 运行温度保持恒定的条件下, 在两实验装置盛水槽的苦咸水中放置热电偶以及各套管内壁面上中下段分别放置3个热电偶, 将测得的3个温度的平均值作为装置各效冷凝面温度。其中, 单效装置的苦咸水温度以及两效装置的第一级苦咸水温度设定为两个装置的运行温度。实验时, 分别将两种装置加热温度设定为60、65、70、75、80 °C, 测得在这5种加热温度下, 装置达到稳定状态时的各测点温度值。实验在室内进行, 用自来水代替苦咸水, 用电加热器模拟

太阳集热器为两个淡化装置提供热量。两个装置内各测点温度随加热温度的变化如图3、图4所示。

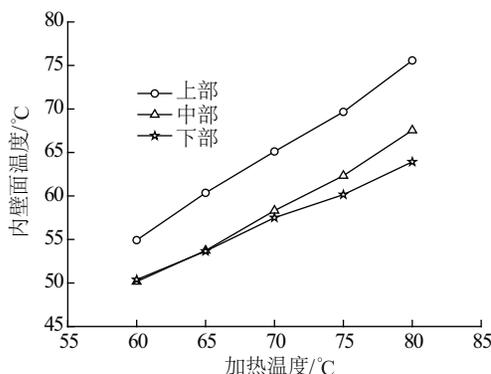


图3 单效装置温度变化曲线

Fig. 3 Variation of temperature of single-effect device with the heating temperature

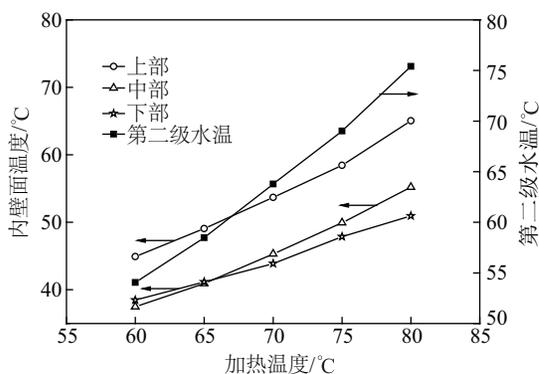


图4 两效装置温度变化曲线

Fig. 3 Variation of temperature of double-effect device with the heating temperature

从图3、图4可看出,单效装置和两效装置套筒内壁上温度高于中部和下部,而中部和下部的温度差别不大,尤其是当加热温度低于70℃运行时,温差更小。这说明装置内所产生的蒸汽主要在套筒内壁上部的凝结,这是因蒸汽密度低于空气密度所致,可在装置内部填充密度小于空气密度的介质气体来扩展装置的有效冷凝面面积。

3.2 淡水产量理论计算结果与实验测试结果对比

在定温稳态加热实验中,对两个装置的淡水产量进行测试,稳态运行时间保证在1h以上。当管内介质气体为空气时,文献[10]通过室内稳态实验给出了管式蒸馏器内的经验常数 $C=0.34$, $n=0.25$ 。对于单效淡化装置,理论计算值与实验测试值对比如图5所示。两效淡化装置,理论计算值与实验测

试值对比如图6所示。

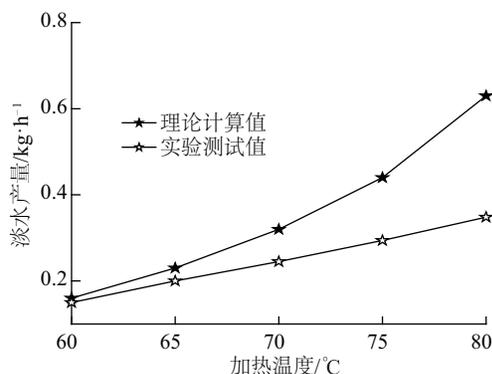


图5 单效装置的理论产水量与实验值对比

Fig. 5 Comparison between theoretical and experimental results of single-effect device

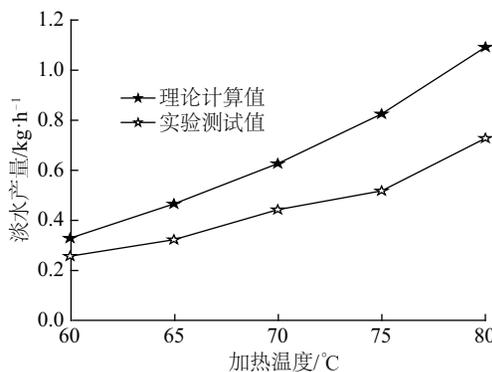


图6 两效装置的理论产水量与实验值对比

Fig. 6 Comparison between theoretical and experimental results of double-effect device

从图5、图6可看出:两种装置的实验产水速率随着加热温度的升高而增大,对于单效装置,加热温度达到80℃时的产水量比60℃时产水量提高了132%;对于两效装置,加热温度达到80℃时的产水量比60℃时产水量提高了约183%。两效装置的实验淡水产量明显大于单效装置,在加热温度为80℃时,两效装置淡水产量是单效装置的2.1倍。究其原因,主要是因为两效装置的总蒸发面积大于单效装置,并在运行过程中充分利用了蒸汽凝结时释放的潜热。除此以外,单效装置中的蒸汽直接在套筒内壁上部的凝结,随着运行时间的延长,蒸发面与冷凝面的温差小于两效装置中的对应温差。

从图5、图6还可看出:理论计算值和实验测试值随加热温度变化趋势一致。在加热温度低于70℃时,理论计算值和实验测试值吻合度较好,单效装置的误差值在9.3%~33.0%之间,两效装置的

误差值为 28.0%~41.5%;当加热温度在 70~80 ℃时, 两者的误差较大。其原因为:1)由于随着加热温度的升高,装置运行时间延长,装置内的盛水槽中水量越来越少,液面下降,蒸发面的面积减小,装置产水速率减缓;2)由于随着加热温度的升高,装置内部蒸汽压力随之增大,阻碍了蒸汽的蒸发和凝结过程,导致实验产水速率偏低;3)随着加热温度的升高,水蒸气占混合气体的比重越来越大,水蒸气本身不是理想气体。而在理论计算过程中未考虑上述 3 个原因,使理论计算值与实验测试值的差距随加热温度升高越来越大。

4 装置性能分析

性能系数(GOR)是表征苦咸水淡化装置性能的重要指标,性能系数越大,苦咸水淡化装置的能量利用率越高,装置的产水性能越好。根据能量输入输出的关系,该装置的 GOR 为:

$$GOR = \frac{L_{\text{pure}} \times h_{\text{fg}}}{Q_w} \quad (20)$$

式中, L_{pure} ——实验测试时间内的淡水产量, kg/h; h_{fg} ——测定温度下水的汽化潜热, kJ/kg; Q_w ——测试时间内输入系统的总热能, kJ/h。

对一效和两效装置进行定功率加热试验,测试在相同运行工况下的淡水产量和 GOR , 实验中,忽略装置的散热, h_{fg} 近似取为 2300 kJ/kg。结果如表 3 所示。

表 3 不同功率下装置产水量及性能系数

Table 3 The water yield and GOR in different heating powers

输入 功率/W	单效装置		两效装置	
	产水量/kg	GOR	产水量/kg	GOR
300	0.44	0.93	0.64	1.36
400	0.50	0.79	1.05	1.67

从表 3 可看出,随着输入功率的增大,两个装置的产水量也随之增大。对于性能系数,多效淡化装置相比单效装置大,这是因为多效淡化装置充分利用了蒸汽凝结时释放的蒸汽潜热,能量利用率高,从而保证了装置有较高的产水量。

5 结 论

本文提出一种新型横管式太阳能苦咸水淡化装置,对装置内部传热传质过程进行分析,给出了理论淡水产量的计算方法,并将计算结果与实验测

量值进行对比验证。

实验结果表明,两个装置套管内上部温度高于中部和下部,两效装置内上、下部温差最大为 15.9 ℃。两个装置的淡水产量均随加热温度的升高而增大,两效装置在加热温度为 80 ℃时淡水产量为 0.728 kg/h,是相同加热温度下单效装置的 2.1 倍。理论计算结果随加热温度变化趋势与实验测试值一致。在加热温度在 70 ℃以下时,两者吻合度较好。在定功率实验中,两效淡化装置的性能系数可达 1.67。

[参考文献]

- [1] Tiwari G N. Nocturnal water production by tubular solar stills using waste heat to preheat brine[J]. Desalination, 1988, 69: 309—318.
- [2] Ahsan A, Islam K M S, Fukuhara T, et al. Experimental study on evaporation, condensation and production of a new Tubular Solar Still[J]. Desalination, 2010, 260(1-3): 172—179.
- [3] Arunkumar T, Jayaprakash R, Ahsan A, et al. Effect of water and air flow on concentric tubular solar water desalting system[J]. Applied Energy, 2013, 103: 109—115.
- [4] Rahmani A, Boutriaa A, Hadeif A. An experimental approach to improve the basin type solar still using an integrated natural circulation loop[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 93: 298—308.
- [5] Rahbar N, Esfahani J A, Fotouhi-Bafghi E. Estimation of convective heat transfer coefficient and water-productivity in a tubular solar still- CFD simulation and theoretical analysis[J]. Solar Energy, 2015, 113 (2): 313—323.
- [6] Yadav S, Sudhakar K. Different domestic designs of solar stills: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 47(c): 718—731.
- [7] Sharpley B F, Boelter L M K. Evaporation of water into quiet air from a one-foot diameter surface[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research. Industrial and Engineering Chemistry, 1938, 30(10): 1125—1131.
- [8] Toyama S, Aragaki T, Salah H M, et al. Simulation of a multi-effect solar still and the static characteristics [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1987, 20: 473—478.
- [9] Tsilingiris P T. The influence of binary mixture thermophysical properties in the analysis of heat and

mass transfer processes in solar distillation systems [J].
Solar Energy, 2007, 81(12): 1482—1491.

Tubular Solar Still[J]. Solar Energy, 2010, 84(7):
1147—1156.

[10] Ahsan A, Fukuhara T. Mass and heat transfer model of

WATER PRODUCTION PERFORMANCE INVESTIGATION OF HORIZONTAL TUBULAR STYLE SOLAR BRACKISH WATER DESALINATION UNIT

Chang Zehui¹, Yu Miaomiao¹, Zheng Zihang², Hou Jing³, Dai Zhitao¹, Guo Yubing¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. No. 704 Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Shanghai 200031, China;

3. College of Mechanical Electrical Heating and Ventilation Engineering, Inner Mongolia Technical College of Construction,
Hohhot 010070, China)

Abstract: A novel horizontal tubular style solar brackish water desalination device was presented. The structure characteristics and working principle of the unit were introduced. The internal heat and mass transfer mechanism of the device were analyzed, the semi-empirical expression of the water yield was given. In addition, the water yield and temperature variation of the single-effect and double-effect devices were tested with an electric heater to simulate solar collector under the fixed heating temperature condition, respectively. The results show that the most condensation takes place on the upper side of the tubular shell. The water yield increases with the increase of heating temperature. When the heating temperature is 80 °C, the water yield rate of the double-effect device can reach 0.728 kg/h. It is increased by 2.1 times compared with that of the single-effect device. Then the theoretical results are compared with the experimental results, and it is found that the trend of theoretical water yield rate is consistent with the experimental results. The GOR of the double-effect device working under environmental pressure can reach to 1.67.

Keywords: solar energy; horizontal tubular; water yield rate; brackish water desalination