

文章编号:2095-6134(2016)02-0247-06

# 旋转超空泡蒸发器抽汽参数选取的数值模拟<sup>\*</sup>

郑智颖<sup>1</sup>, 李倩<sup>1</sup>, 李凤臣<sup>1†</sup>, KULAGIN V A<sup>2</sup>

(1 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001; 2 西伯利亚联邦大学热技术与流体动力学系, 克拉斯诺亚尔斯克 660041)

(2015 年 3 月 13 日收稿; 2015 年 6 月 1 日收修改稿)

Zheng Z Y, Li Q, Li F C, et al. Numerical study on parameter selection for steam extraction of rotational supercavitating evaporator[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2016, 33(2): 247-252.

**摘 要** 应用超空泡原理, 提出一种新型的海水淡化装置——旋转超空泡蒸发器. 为研究从空泡中抽取蒸汽对旋转超空泡蒸发器水动力学特性的影响并确定抽汽量, 对一定转速和不同抽汽量下的旋转超空泡蒸发器超空化流动进行数值模拟. 结果表明: 抽汽量随抽汽压力的降低而线性增大. 相比未抽汽工况, 抽汽对超空泡的面积和体积有较大影响. 抽汽后抽汽量的变化对超空泡面积和体积的影响较小.

**关键词** 旋转超空泡蒸发器; 海水淡化; 抽汽; 数值模拟

中图分类号: P747; O359+.1 文献标志码: A doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2016.02.016

## Numerical study on parameter selection for steam extraction of rotational supercavitating evaporator

ZHENG Zhiying<sup>1</sup>, LI Qian<sup>1</sup>, LI Fengchen<sup>1</sup>, KULAGIN V A<sup>2</sup>

(1 School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2 Department of Heat Technology and Fluid Dynamics, Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660041, Russia)

**Abstract** With the application of supercavitation effect, a novel device named rotational supercavitating evaporator (RSCE) has been designed for seawater desalination. In order to study the effect of steam extraction on hydrodynamic characteristics of RSCE and then determine the steam extraction rate, numerical simulations are carried out on the supercavitating flows in RSCE at a constant rotational speed and at different steam extraction rates. The results show that steam extraction rate linearly increases with the decrease of extraction pressure and that the area and volume of the supercavity could be significantly affected by steam extration, as compared with the case without steam extration. However, both of them vary slightly with the increase of steam extraction rate in the process of steam extraction.

**Key words** rotational supercavitating evaporator; desalination; steam extraction; CFD numerical simulation

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(51276046)资助

<sup>†</sup> 通信作者, E-mail: lifch@hit.edu.cn

当前淡水资源匮乏已成为全球性的环境问题,相比于另外两种淡水取用方式——地下取水和远程调水,海水淡化以其能耗低、来源广和资源丰富等优点被认为是最具前景的淡水取用方式.目前海水淡化技术主要有热蒸馏法和膜方法,而工业上大规模应用的是热蒸馏法中的多级闪蒸和低温多效蒸馏以及膜方法中的反渗透法.但是,由于热蒸馏法的换热面为固体壁面,因而存在能量密度低和换热面易形成水垢和污垢等缺点,而反渗透法则需要对源水进行严格的预处理.为克服上述缺点,应用超空泡原理,提出一种新型的海水淡化装置——旋转超空泡蒸发器 (rotational supercavitating evaporator,简称 RSCE). RSCE 的核心部件是由两个出口边宽度变化的楔形叶片组成的旋转空化器,空化器在盐水中高速旋转形成超空泡,在叶片根部的适当位置设置抽汽孔用于抽取空化形成的水蒸汽,经冷凝后形成淡水.

空化是液体在温度基本保持不变的情况下由于压力降低而发生汽化,使液体内部的气核迅速膨胀,形成含有水蒸气或其他气体的明显气(汽)泡,从而造成液体破裂的现象.通常采用空化数来描述空化流动,流动中特征压力越低或特征速度越大,则空化数越小,空化程度越剧烈.超空泡即是小空化数下发生的一种完全发展的附着空泡,其尾部在过流部件固体边界下游闭合,空泡长度大于过流部件的特征长度.目前,绝大部分对空化在海水淡化中应用的研究主要集中在俄罗斯,但鲜见公开发表的相关文献.其中一个例子是俄罗斯 TJEROS-MIFI 科技中心设计的商用空化海水

淡化装置 WATERFALL-1200<sup>[1]</sup>. 最近, Likhachev 等<sup>[2-4]</sup>提出 RSCE,并进行了初步的设计和研究.旋转空化常见于螺旋桨、水轮机和泵等流体机械中,有大量的实验观测和理论分析对其进行了研究<sup>[5-6]</sup>,但是针对从空泡中抽取蒸汽对空泡形状和尺寸影响的研究则很少. Likhachev 和 Li<sup>[7]</sup>通过对圆锥型空化器超空泡流动进行二维数值模拟,发现从超空泡中抽取蒸汽将增强空泡尾部的回射流,从而减小超空泡的轴向尺寸,并在径向上撑大超空泡体积,但是其增大的幅度比轴向尺寸减小的幅度小,因而超空泡表面积将减小,引起蒸汽生成率的降低,进而导致超空泡的缩短.而 Likhachev 等<sup>[4]</sup>对 RSCE 进行抽汽实验的结果表明,在实验设定的抽汽参数范围内,蒸汽抽取对超空泡尺寸影响很小.

本文在 Likhachev 和 Li 提出 RSCE 并进行初步研究的基础上,从抽汽参数的角度对其进行优化,为达到提供实验参数的目的,针对不同抽汽量下的三维 RSCE 超空泡流动进行数值模拟,获得了合适的抽汽孔位置,分析不同工况下超空泡的尺寸以及抽汽量对超空泡形态的影响,以此指导实验中抽汽参数的设定和真空泵的选取.

1 模型建立

旋转空化器如图 1 所示. 根据实验装置的具体尺寸<sup>[4]</sup>,选取高为 100 mm,直径为 430 mm 的圆柱体区域作为计算域. 旋转空化器直径  $d$  为 400 mm,转轴直径  $d_0$  为 52 mm,叶片旋转平面位于计算域正中间.

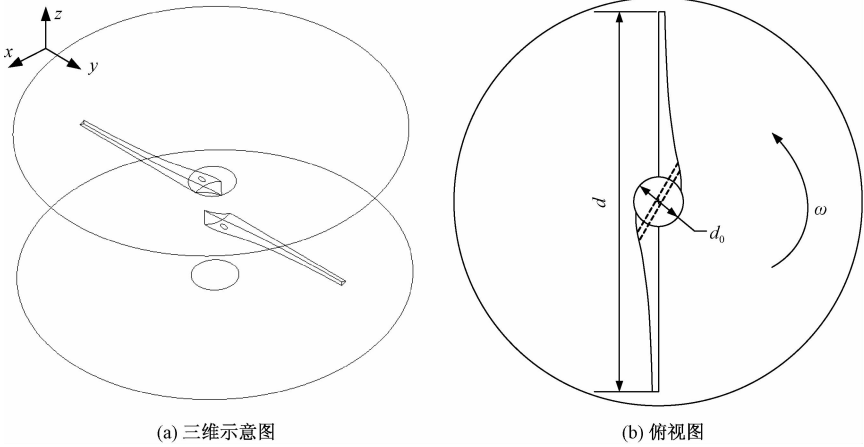


图 1 旋转空化器示意图  
Fig.1 Schematic diagram of RSCE

为获得旋转空化器的叶片形状,采用与文献[3]中相同的公式对其进行计算,但是原方法中不同半径  $r$  处  $\alpha$  值并不严格等于对应半径处的楔形角 ( $22.5^\circ$ ),且随着  $r$  的减小,其偏差越大.针对这一问题,提出如图2所示的改进的计算方法,用  $r_c$  替代  $r$  计算得到的超空泡长度  $L$  和圆弧长度进行比较,从而得到改进的旋转空化器叶形,如表1所示.此外,表1中也给出了由经验公式(1)<sup>[3]</sup>得到的不同  $r$  处的超空泡长度  $L$ .

$$L = (2.6h/\sigma) \sqrt{C_d/e}, \quad (1)$$

式中,  $h$  为叶片出口边半高;  $\sigma$  为空化数,其定义为  $\sigma = 2(p_0 - p_c)/\rho v^2$ , 其中  $p_0$  为环境压力,  $p_c$  为超空泡内压力,计算中其值等于饱和蒸汽压,  $\rho$  为水的密度,  $v$  为叶片线速度;  $C_d$  为阻力系数,其值为  $C_d = 0.175 + 0.3\sigma$ ;  $e$  为经验系数,定义为  $e = (1 + 50\sigma)/(1 + 56.2\sigma)$ .

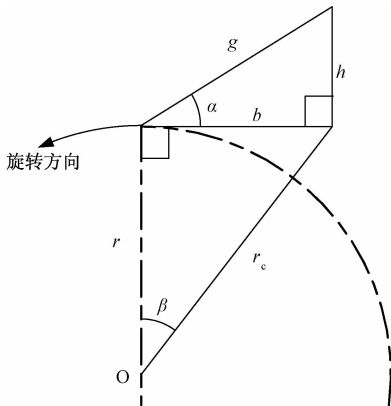


图2 旋转空化器叶片形状计算方法示意图

Fig.2 Calculation method for blade shape of RSCE

表1 旋转空化器叶片形状参数

Table 1 Parameters of blade shape of RSCE

半径 $r/\text{mm}$	出口边半高 $h/\text{mm}$	超空泡长度 $L/\text{mm}$
30	9.42	93.965
40	8.64	120.060
50	7.80	148.677
60	7.01	178.927
70	6.31	210.021
80	5.70	241.204
90	5.19	273.039
100	4.76	305.302
110	4.38	336.775
120	4.06	368.884
130	3.78	400.817
140	3.53	432.140
150	3.32	464.833
160	3.13	497.048
170	2.96	529.230
180	2.80	559.954
190	2.66	591.517
200	2.54	624.762

## 2 数值计算方法

### 2.1 控制方程

本文针对三维 RSCE 定常超空泡流动进行数值模拟,而超空泡流动是一种多相、湍动的复杂流动,在数值模拟中多相流模型采用基于均匀平衡多相流理论的混合模型,将气相和液相的混合物看成均匀的单相流体,其控制方程为:

混合相连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m u_i) = 0, \quad (2)$$

混合相动量方程

$$\frac{\partial(\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu_m + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right], \quad (3)$$

气相输运方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_v \rho_v u_i) = R_g - R_c, \quad (4)$$

式中,  $\rho_m$  为混合相密度,  $u_i$  或  $u_j$  为速度,  $\alpha_v$  为气相体积分数,  $\rho_v$  为气相密度,  $R_g$  和  $R_c$  分别为气相生成率和气相凝结率.

空化模型采用 Schnerr-Sauer 模型<sup>[8]</sup>,给出相变率  $R_g$  和  $R_c$  的方程:

当  $p_v \geq p$  时,

$$R_g = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{\Re_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(p_v - p)}{\rho_l}}; \quad (5)$$

当  $p_v \leq p$  时,

$$R_c = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{\Re_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(p - p_v)}{\rho_l}}. \quad (6)$$

式中,  $\rho_l$  为液相密度;  $p_v$  为饱和蒸汽压;  $n$  为液体单位体积中的微小气泡数,其值为  $1 \times 10^{13}$ ;  $\Re_B$  为气泡半径,该空化模型中其定义式为

$$\Re_B = \left( \frac{\alpha_v}{1 - \alpha_v} \frac{3}{4\pi} \frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (7)$$

湍流模型采用 Realizable  $k - \varepsilon$  模型,其模型方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon, \quad (8) \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ &\quad \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}}, \quad (9) \end{aligned}$$

式中,  $\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2, C_1 = \max\left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right],$   
 $C_2 = 1.9, \eta = Sk/\varepsilon, S = (2S_{ij} \cdot S_{ij})^{1/2}, S_{ij} =$   
 $\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right), C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s U^* k/\varepsilon}, A_0 = 4.04,$   
 $A_s = \sqrt{6} \cos \phi, \phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W), W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{(S_{ij} S_{ij})^{1/2}},$   
 $U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}}, \tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk} \omega_k, \Omega_{ij} =$   
 $\tilde{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k.$  同时采用 Scalable 壁面函数处理近壁面的流动.

2.2 数值求解

采用结构化网格对计算域进行划分,同时对

叶片附近网格进行加密处理,如图 3 所示,网格数量为 8 159 268. 计算中建立的笛卡尔直角坐标系如图 1(a) 所示,  $y$  轴位于叶片进口边所在直线,  $z$  轴为旋转轴线. 计算域上表面和底面分别设置为压力入口和压力出口边界条件,压力均设定为 101 325 Pa,圆柱面设置为固定无滑移壁面边界条件,其他边界均设置为具有恒定转速的无滑移壁面. 水和水蒸气物性参数采用国际 IAPWS95 标准<sup>[9]</sup>, 25 ℃ 时水的物性为:密度 997 kg/m<sup>3</sup>,动力黏度  $8.9011 \times 10^{-4}$  Pa·s;水蒸气的物性为:密度 0.023 075 kg/m<sup>3</sup>,动力黏度  $9.8669 \times 10^{-6}$  Pa·s;饱和蒸汽压  $p_v$  为 3 169.9 Pa.

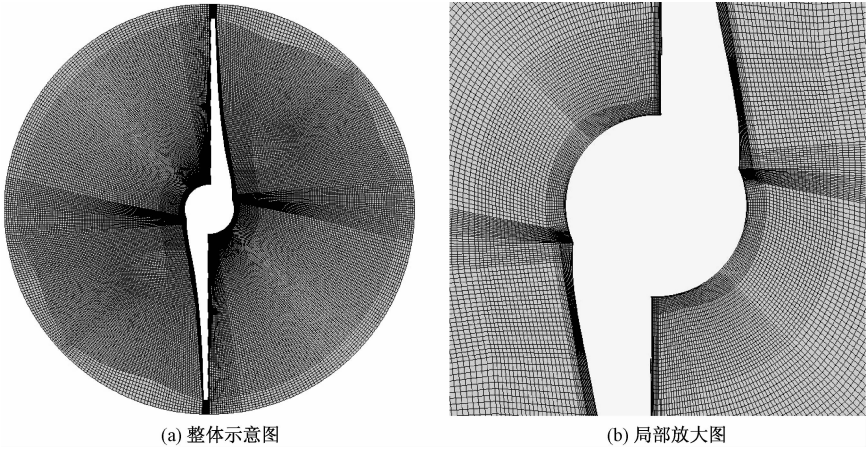


图 3 网格划分示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of mesh

3 计算结果及分析

通过初步试算得到未抽汽工况下当转速为 4 500 r/min 时空化器后方形成具有最大尺寸的超空泡,通过分析气相体积分数分布确定抽汽孔的位置. 在此基础上针对不同抽汽压力下的三维 RSCE 超空泡流动进行数值模拟,通过分析超空泡表面积和体积,得到抽汽量对超空泡尺寸的影响,以此对后续实验中抽汽参数的选取进行指导.

3.1 未抽汽工况计算结果及抽汽孔位置选取

图 4 给出  $z = 0$  m 平面水蒸气体积分数分布,从图中可看出其分布呈对称的扇形. 为对超空泡进行定量分析,将水蒸气体积分数为 0.5 的等值面定义为超空泡的轮廓,则其轮廓如图 5 所示. 通过进一步计算得到超空泡的面积和体积分别为 0.208 62 m<sup>2</sup> 和  $2.277 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>,从图中可看出,当

半径较小时,超空泡尾部有明显的回射流,如图 5 (b) 所示. 而回射流会将水滴夹带到超空泡中,若将抽汽孔设置在靠近超空泡尾部的位置,将大大影响抽取的水蒸气的纯度,因此根据这一计算结果将直径为 6 mm 的抽汽孔设置在与叶片进口边所在直线( $y$  轴)成 30°角的位置,如图 1(b) 所示.

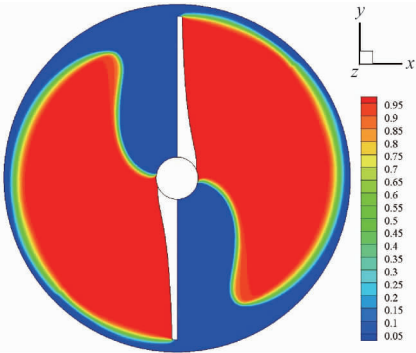


图 4  $z = 0$  m 平面水蒸气体积分数分布  
Fig. 4 Distribution of vapor volume fraction in the plane at  $z = 0$  m

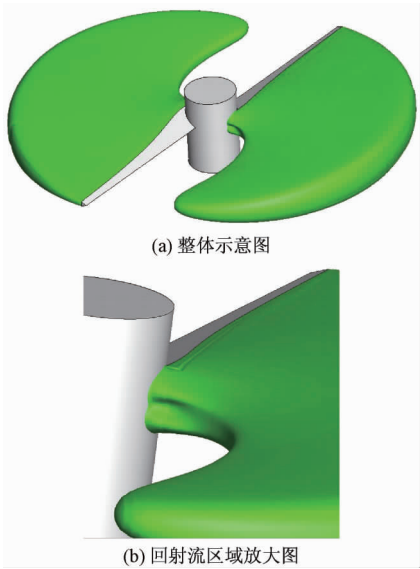


图 5 超空泡轮廓示意图  
Fig.5 Supercavity profile

以上述定义为基础得到的超空泡长度随半径的变化如图 6 所示,图中也给出了经验公式(1)的计算结果进行对比.从图中可看出,当半径小于 180 mm 时,经验公式得到的结果和数值模拟的结果有较好的符合,均随半径增大呈现近似线性的增大,而半径大于 180 mm 后,则有较大的差距.这是由于经验公式是由楔形空化器平面流动得到的,没有考虑旋转带来的影响,同时圆柱壁面也会对超空泡的发展起到约束作用,因而造成大半径下结果的较大偏差.

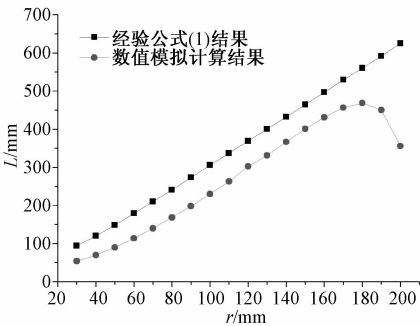


图 6 超空泡长度经验公式和数值模拟结果对比  
Fig.6 Calculated results for supercavity lengths at different radii and comparison of these results with those using empirical formula

3.2 不同抽汽量下计算结果

为模拟不同抽汽量下的三维 RSCE 超空泡流动,将抽汽孔设置为压力低于饱和蒸汽压的压力出口边界条件,分别计算压力为 0,1 000 和 2 000

Pa 3 个工况,从而得到不同抽汽压力  $P$  下的抽汽量  $Q$ ,如表 2 所示,抽汽量随抽汽压力的降低而线性增大.此外,表 2 中还给出不同抽汽压力下抽汽孔的液态水体积分数平均值,从一定程度上反映抽取的蒸汽的纯度.从表中可看出,虽然液态水体积分数平均值随抽汽压力的降低而增大,但是其值始终维持在较低的量级,说明抽取的蒸汽纯度很高,也进一步证明抽汽孔位置设置的合理性.

表 2 不同抽汽压力  $P$  下的抽汽量  $Q$  和抽汽孔水体积分数  
Table 2 Steam extraction rate  $Q$  and water volume fraction at the extraction hole under different extraction pressure  $P$

抽汽压力 $P$ / Pa	抽汽量 $Q$ / (kg/s)	抽汽孔水体积 分数平均值
0	$4.945 \times 10^{-3}$	$1.112 \times 10^{-3}$
1 000	$3.829 \times 10^{-3}$	$1.018 \times 10^{-3}$
2 000	$2.421 \times 10^{-3}$	$0.848 \times 10^{-3}$

图 7 给出不同抽汽量下超空泡的面积  $A_c$  和体积  $V_c$ ,抽汽量为零的结果对应于未抽汽工况.从图中可看出,抽汽对超空泡的面积和体积有较大影响,但是在抽汽的情况下,超空泡面积和体积随抽汽量的增大只有略微减小,且进一步的数值模拟结果表明,即使低于饱和蒸汽压,当抽汽压力较大时,并没有抽汽现象,这一阈值的确定将在后续研究中给出.

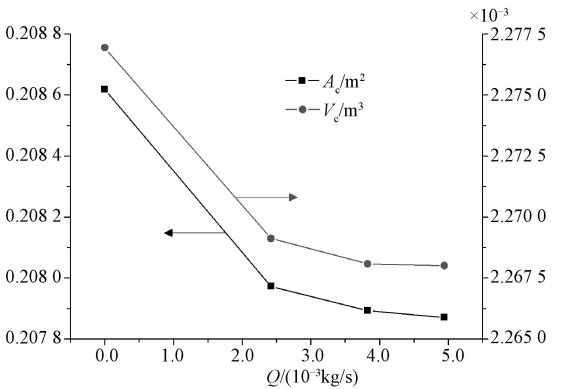


图 7 超空泡面积  $A_c$  和体积  $V_c$  随抽汽量  $Q$  的变化  
Fig.7 Variations in supercavity area  $A_c$  and volume  $V_c$  with steam extraction rate  $Q$

4 结论

通过对不同抽汽量下的三维 RSCE 超空泡流动进行数值模拟,得到超空泡的轮廓以及不同工况下超空泡的面积和体积,分析水蒸气体积分数

分布和抽汽对超空泡尺寸的影响,确定了合适的抽汽孔位置,得到以下主要结论:

1)未抽汽工况下,半径较小处的超空泡尾部存在明显的回射流,因而将抽汽孔设置在与叶片进口边所在直线成 30°角的位置处.在大部分半径范围内,超空泡长度的数值模拟结果和经验公式得到的结果有较好的符合.

2)抽汽情况下,抽汽量随抽汽压力的降低而线性增大,相比未抽汽工况,抽汽对超空泡的面积和体积有较大影响,但抽汽后抽汽量的变化对超空泡面积和体积的影响较小.

参考文献

[ 1 ] Rudenko B. How to make up water resource[J/OL]. Journal of Science Life, 2007, 12, ( 2011-10-02 ) [ 2015-02-15 ]. <http://www.nkj.ru/archive/articles/12366/>( in Russian ).

[ 2 ] Likhachev D S, Li F C. Large-scale water desalination methods: a review and new perspectives [ J ]. Desalination and Water Treatment, 2013, 51 ( 13/15 ) : 2 836-2 849.

[ 3 ] Likhachev D S, Li F C. Modeling of rotational supercavitating

evaporator and the geometrical characteristics of supercavity within [ J ]. Science China: Physics, Mechanics & Astronomy, 2014, 57 ( 3 ) : 541-554.

[ 4 ] Likhachev D S, Li F C, Kulagin V A. Experimental study on the performance of a rotational supercavitating evaporator for desalination [ J ]. Science China: Technological Sciences, 2014, 57 ( 11 ) : 2 115-2 130.

[ 5 ] Brennen C E. Cavitation and bubble dynamics [ M ]. Oxford: Oxford University Press, 1995.

[ 6 ] 潘中永,袁寿其. 泵空化基础 [ M ]. 镇江: 江苏大学出版社, 2013.

[ 7 ] Likhachev D S, Li F C. Numerical study of the characteristics of supercavitation on a cone in a stationary evaporator [ J ]. Desalination and Water Treatment, 2014, 52 ( 37/39 ) : 7 053-7 064.

[ 8 ] Schnerr G H, Sauer J. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics [ C ] // Fourth International Conference on Multiphase Flow. New Orleans, USA, 2001.

[ 9 ] Wagner W, Pruß A. The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use [ J ]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 2002, 31 ( 2 ) : 387-535.