

УДК 532.528; 536.25

Определение расчетных зависимостей рабочих параметров суперкавитационного испарителя

В.А. Кулагин*, Т.А. Пьяных

*Сибирский федеральный университет,
Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79*

Received 11.02.2013, received in revised form 18.02.2013, accepted 25.02.2013

В статье предложена математическая модель суперкавитационного испарителя. Получены расчетные зависимости безразмерных критериев, которые могут быть использованы для определения основных режимных и конструктивных параметров суперкавитационных испарителей.

Ключевые слова: суперкавитационный испаритель, математическая модель, гомогенный поток.

Введение

В последние три-четыре десятилетия мировым сообществом достигнуты серьезные успехи в области разработки техники и технологии опреснения морских вод с целью удешевления производства пресной воды. Эти наработки с успехом применяются и в теплоэнергетике. Значительный прогресс достигнут при разработке установок термодистилляционного получения пресной воды высокого качества. Этот метод становится предпочтительным для применения в теплоэнергетике вместо установок ионообменных технологий, использование которых связано со значительными трудностями, встречающимися при решении задач ликвидации отработанных регенерационных растворов ионообменных установок.

Сравнительный анализ различных схем опреснения и способов улучшения теплообмена в испарительных установках показывает, что наибольшей эффективностью отличаются методы, в которых изменение гидродинамических характеристик течения жидкости приводит к увеличению энергонапряженности теплообменной поверхности. В этом направлении перспективно использование режимов развитой кавитации, поскольку особенности конструктивного оформления суперкавитационных аппаратов и возможность за счет гидродинамики поддерживать устойчивую границу раздела между жидкой и паровой фазами обуславливают некоторые преимущества этого способа испарения по сравнению с известными методами.

В отличие от известных методов процесс испарения в аппаратах суперкавитирующего типа осуществляется за счет создания развитого кавитационного течения при обтекании не-

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: v.a.kulagin@mail.ru

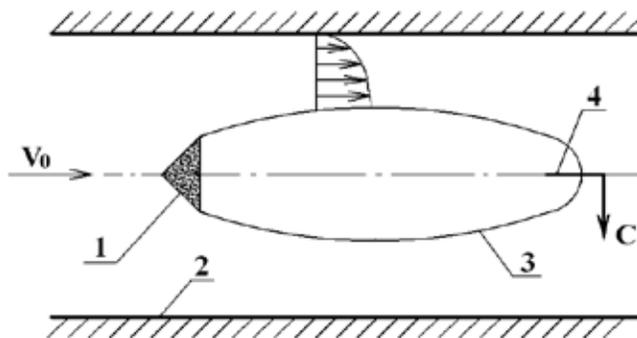


Рис. 1. Принципиальная схема суперкавитационного испарения: 1 – кавитатор; 2 – труба круглого сечения; 3 – суперкаверна; 4 – отбор пара из каверны

догретой жидкостью кавитатора с последующим отбором пара из образовавшихся каверн [1]. Анализ исследований развитых кавитационных течений показал, что в большинстве работ по определению форм и размеров каверн, как теоретических, так и экспериментальных, в качестве кавитаторов в основном использовали диски, конусы и шары [1]. В настоящей работе исследовались режимы кавитационного испарения при обтекании конусов с различными углами раствора и диаметром основания. На рисунке 1 представлена схема суперкавитационного испарения.

Одновременное существование граничной динамики, фазового перехода и сильного изменения плотности значительно затрудняет задачу исследования рабочих процессов термокавитационных испарителей. Проведенный обзор современных методов математического моделирования кавитационных течений [2] позволил определить адекватный подход к решению данной задачи.

Математическая модель суперкавитационного испарителя

Здесь для оценки поверхности кавитационного испарения используется модель двухфазного гомогенного потока, в которой поток рассматривается как гомогенная смесь. Эта модель основана на предположении локального кинематического и термодинамического равновесия между фазами и не предполагает поверхность раздела между паром и водой. Объемная доля фазы может изменяться от нуля до единицы в зависимости от занимаемого пространства в двухфазном потоке. Задача рассматривается в стационарной двумерной осесимметричной постановке и предполагает решение уравнений (1)-(6).

Уравнение неразрывности для каждой фазы α

$$\nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha \mathbf{u}_m) = \dot{S}_{iv}, \quad (1)$$

где r_α – объемная доля фазы α ; ρ_α – плотность фазы α , кг/м³; \dot{S}_{iv} – массовая скорость образования фазы, кг/м³с; \mathbf{u}_m – скорость смеси, м/с.

Уравнение движения для смеси

$$\nabla \cdot (\rho_m \mathbf{u}_m \mathbf{u}_m - \mu_m (\nabla \mathbf{u}_m + (\nabla \mathbf{u}_m)^T)) = -\nabla P, \quad (2)$$

где ρ_m – плотность смеси, кг/м³; μ_m – коэффициент кинематической вязкости смеси, Па·с; P – давление, Па.

Турбулентность учитывается использованием $k - \varepsilon$ модели. Уравнения переноса для кинетической энергии турбулентности k , м²/с², и ее диссипации ε , м²/с³:

$$\nabla \cdot (\rho_m k \mathbf{u}_m) = \nabla \cdot \left(\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + G - \rho_m \varepsilon, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho_m \varepsilon \mathbf{u}_m) = \nabla \cdot \left(\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \rho_m \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (4)$$

где G – скорость генерации турбулентности, μ_t – турбулентная вязкость. Эмпирические константы имеют следующие значения: $\sigma_k = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$; $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$. Так как фазы должны полностью заполнять весь объем, то принимается следующее условие:

$$\sum_a^N r_a = 1. \quad (5)$$

Для массовой скорости образования фазы используется кавитационная модель [3]:

$$\dot{S}_{lv} = \begin{cases} F_{var} \frac{3r_{nuc}(1-r_v)\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2|P_v - P|}{3\rho_l}} & \text{при } P < P_v \\ F_{con} \frac{3r_v\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2|P_v - P|}{3\rho_l}} & \text{при } P > P_v, \end{cases} \quad (6)$$

где r_{nuc} – объемная доля зародышей («ядер») кавитаций; R_B – радиус зародыша кавитации, м. При моделировании применялись следующие параметры модели: $R_B = 10^{-6}$ м, $r_{nuc} = 5 \cdot 10^{-4}$, $F_{var} = 50$ и $F_{con} = 0,01$.

Для замыкания системы уравнений принимали следующие граничные условия: на входе в рабочий участок задавалась скорость, линейный масштаб и интенсивность турбулентности, объемные доли пара и воды, а на выходе – давление.

Результаты численного исследования

На первом этапе исследований были проведены расчеты для холодной воды, температура которой составляла 20 °С, такой режим можно считать предельным по температуре ведения процесса для кавитационного испарения. На втором этапе расчеты проводили для горячей воды. Температура воды принималась в диапазоне 110–120 °С. Температурный интервал был принят в соответствии с максимальной температурой воды на входе в первую ступень испарения большинства современных испарительных установок [4].

На рисунке 2 в качестве примера представлена доля пара в смеси при различных числах кавитации. Численный эксперимент проводили при постоянном значении числа Фруда (37,4) и степени стеснения потока (0,29).

На рисунке 3 отображена зависимость относительной длины каверны от числа кавитации, указывающая на хорошее согласование расчетных и экспериментальных значений. Рассогласование расчетных и экспериментальных данных может считаться допустимым из-за условности

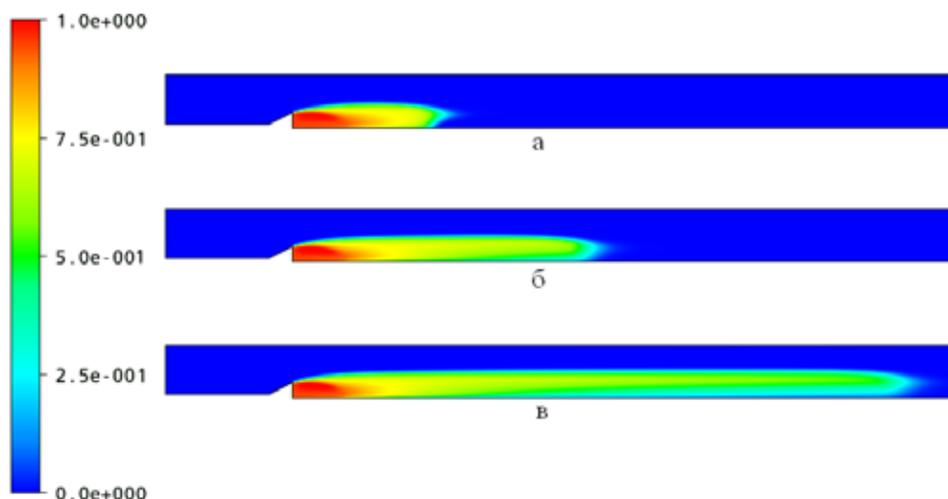


Рис. 2. Расчетные результаты распределения доли пара при разных числах кавитации: а – число кавитации 0,47; б – число кавитации 0,465; в – число кавитации 0,46

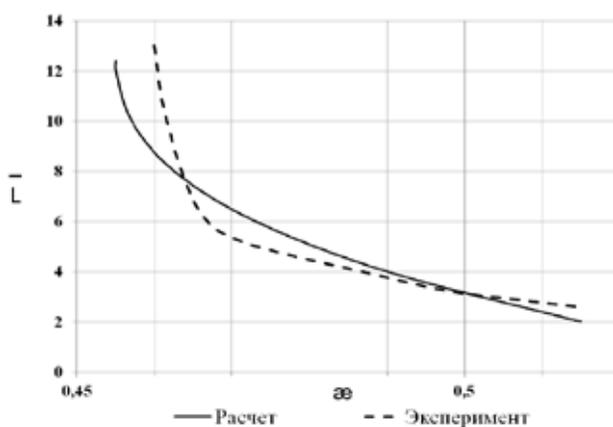


Рис. 3. Зависимость относительной длины каверны от числа кавитации, степень стеснения потока – 0,29; число Фруда – 37,4

самого понятия длины каверны. Анализ полученных результатов показывает, что при постоянных значениях коэффициента стеснения потока и числа Фруда уменьшение числа кавитации приводит к росту размеров каверны. При постоянных значениях коэффициента стеснения потока и уменьшении числа Фруда наблюдается уменьшение размеров каверны (рис. 4).

Увеличение степени стеснения потока и уменьшение чисел Фруда приводит к увеличению чисел кавитации, при которых реализуется предельная форма суперкавитационного обтекания, когда площадь миделевого сечения каверны и ее длина при данном стеснении достигают максимальной величины.

Зависимости относительной длины каверны от числа кавитации и температуры воды на входе в рабочий участок при постоянных значениях коэффициента стеснения потока и числа

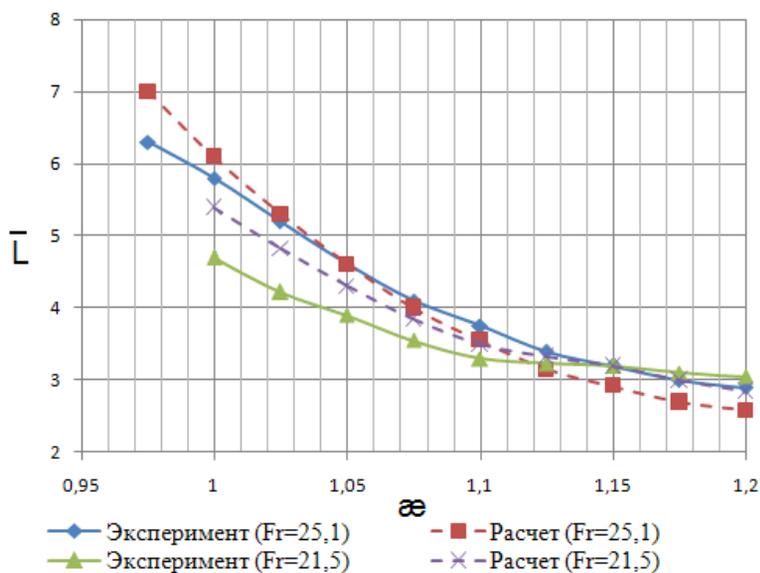


Рис. 4. Зависимость относительной длины каверны от числа кавитации, степень стеснения потока – 0,45

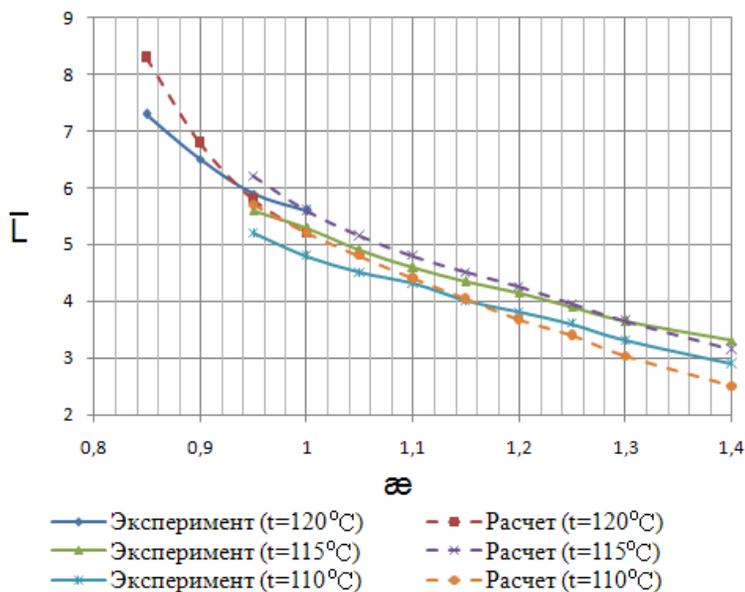


Рис. 5. Зависимость относительной длины каверны от числа кавитации, степень стеснения потока – 0,24; число Фруда – 13,6

Фруда показаны на рис. 5. Видно, что при постоянном значении коэффициента стеснения потока и числе Фруда увеличение температуры воды на входе в рабочий участок приводит к росту размеров каверны. С увеличением температуры связан рост давления насыщения в области кавитации и, следовательно, реализуются режимы кавитационного обтекания с малыми числами кавитации.

Выводы

Полученные расчетные зависимости хорошо согласуются с экспериментальными данными, что дает возможность дальнейшего использования представленной математической модели для анализа и совершенствования рабочих процессов в суперкавитационных испарителях. В статье найдены зависимости безразмерных критериев, характеризующих рабочие процессы, протекающие в суперкавитационных испарителях, которые могут быть использованы для определения их режимных и конструктивных параметров. Суперкавитационный метод является перспективным способом опреснения и требует дальнейшего изучения и развития.

Список литературы

- [1] *Ивченко В.М., Кулагин В.А., Немчин А.Ф.* Кавитационная технология: монография. Красноярск: Изд-во КГУ, 1990. 200 с.
- [2] *Кулагин В.А., Пьяных Т.А.* // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 1 (2011 5) 57–62
- [3] *Philip J.Z.* // International Conference on Multiphase Flow. 2004. № 152. P. 45–56.
- [4] *Мелинова Л.В.* Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2004. 17 с.

Definition Calculated Dependencies

Performance Supercavitating Evaporator

Vladimir A. Kulagin and Tatyana A. Pyanykh

Siberian Federal University

79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041 Russia

The paper presents the mathematical model of supercavitating evaporator. Calculated Dimensionless criteria that can be used to identify key operational and design parameters supercavitating evaporators.

Keywords: supercavitating evaporator, a mathematical model, homogeneous flow.
