

В.М. Арсеньев, канд. техн. наук,
С.О. Шарапов,
М.Г. Прокопов
Сумський державний університет

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЖИДКОСТНО-ПАРОВОГО ЭЖЕКТОРА, РАБОТАЮЩЕГО В РЕЖИМЕ ВАКУУМИРОВАНИЯ

Наведено результати математичного моделювання робочого процесу рідинно-парового ежектора, який працює в режимі вакуумування. Враховано теплофізичну модель процесу, в якій закладено метастабільність середовища, критичні режими, дрібнення рідинної фази та релаксаційний характер пароутворення. Модель отримано на основі експериментальних даних по дослідженню сопла, про структуру потоку, розподіл тиску, витрати, реактивному імпульсі струменя і матеріалів непрямого вимірювання параметрів течії. Апробовано чисельний метод розрахунку осереднених параметрів парокропельного потоку і показників ефективності агрегата.

The results of mathematical simulation of the liquid-vapor ejector, operating in the vacuum. Considered the thermophysical model of the process, which laid the metastability of the environment, critical modes, the fragmentation of the liquid phase and the relaxing nature of vaporization derived from experimental data for the Exploration of the nozzle on the flow structure, the distribution of pressure, flow, jet pulse jet and material indirect measurement of the flow parameters. Tested a numerical method for calculating the averaged parameters of the steam-drop flux and performance unit.

Условные обозначения: d, z — диаметр и продольная координата, м; F — площадь сечения, m^2 ; Δ — шероховатость стенки, мкм; R — радиус, реактивный импульс, м; H, t, T — температура $^{\circ}C, K$; p — давление, Па; v — удельный объем, m^3/kg ; τ — время, с; w — средняя скорость потока, м/с; u — внутренняя энергия, Дж/кг; h — энтальпия, Дж/кг; m, \dot{m} — масса, массовый расход, кг, кг/с; a — диаметр капли, м; V — объем, m^3 ; μ — коэффициент динамической вязкости, коэффициент расхода, Па·с; λ — коэффициент теплопроводности; x — массовое паросодержание; β — объемное паросодержание; $\mathcal{E} = (p/p_0)$ — относительное давление; $\bar{z} = (z/d_f)$ — безразмерная координата; $\gamma = (w/w_f)$ — относительная скорость; $f = (F/F_f)$ — относительная площадь; ξ — коэффициент гидравлического трения, M — число Маха.

Индексы: f — расходное сечение; v — сечение инверсии; c — сечение стабилизации распределения; a — выходное сечение, сечение отрыва потока от стенки; κ — конус сопла; n — пар; $ж$ — жидкость; o — параметры торможения; s — состояние насыщения, изэнтропный процесс; $*$ — критическое сечение, характерная величина; s_0 — состояние насыщения при температуре t_0 ; (\cdot) — состояние насыщенной жидкости.

Введение

В настоящее время струйные аппараты, работающие в режиме вакуумирования, имеют ограниченное применение в машиностроении, металлургии и других отраслях техники и народного хозяйства из-за их недостаточной изученности в теоретическом плане.

В работе [1] описаны теоретические основы процесса истечения двухфазных сред при различных режимах и

условиях, при наличии фазовых превращений и без них. В работах [2–5] приведены практические и экспериментальные методы исследования течения потока вскипающей жидкости в расширяющемся канале сопла путем деления его на отдельные характерные участки (критические сечения). Описана теплофизическая модель пузырькового кипения в начальном участке структурной инверсии, основанная на реализации преимущественно динамической схемы парообразования, которая позволила согласовать теоретические представления с материалами экспериментальных исследований и апробировать численный метод расчета осредненных параметров в сечении перехода двухфазного пузырькового потока к потоку парокропельной мелкодисперсной структуры. Недостатками перечисленных выше работ является рассмотрение процесса истечения самоиспаряющейся жидкости лишь в расширяющемся канале сопла.

В данной статье рассматривается рабочий процесс течения двухфазной среды во всем жидкостно-паровом эжекторе, который работает в режиме вакуумирования, с целью создания математической модели и построения численного метода расчета аппарата с последующей оценкой его эффективности.

Математическая модель и ее описание

Предлагаемая математическая модель рабочего процесса жидкостно-парового эжектора, работающего в режиме вакуумирования, численно описывается в виде системы уравнений сохранения массы, количества движения, энергии, состояния среды и производства энтропии, в интегральном виде, а также зависимостями по кинетике парообразования, характеристикам дробления и полидис-

персного розподілення жидкої фази, и критическим режимам. Для составления системы уравнений и численного расчета жидкостно-парового эжектора применяются следующие допущения:

1. Течение одномерное с исчезающе малой скоростью проскальзывания фаз.

2. Величина диссипативных потерь в осредненном одномерном потоке определяется трением в пограничном слое и степенью завершенности релаксационного фазового перехода на рассматриваемом участке течения вдоль продольной координаты z .

3. Полидисперсное статистическое распределение частиц по размерам в любом сечении потока подчиняется уравнению Розина-Рамлера [6] нормально-логарифмическим соотношением, характер которого не изменяется в процессе течения.

4. В дозвуковой волне, проходящей через мелкодисперсный двухфазный поток, успевает завершиться только обмен количеством движения, а тепло- и массообмен «заморожены».

5. В двухфазном потоке мелкодисперсной структуры, сформированном за счет истечения вскипающей, близкой к насыщению жидкости, в условиях роста давления и температуры пара не наблюдается появления скачков уплотнения — конденсации протекают на имеющихся многочисленных центрах — дискретных частицах недогретой жидкости.

6. Кинетика релаксационного фазового перехода характеризуется выполнением термодинамического баланса (I закон термодинамики) системы частиц i -ой группы распределения

$$d(m_i \cdot u_{жс}(t_{жсi})) = h_n(t_n, p) \cdot dm_i$$

и уравнения теплоотдачи

$$(h_n(t_n, p) - h_{жс}(t_{жсi})) \cdot dm_i = \alpha_i \cdot \pi \cdot a_i^2 \cdot (t_n - t_{жсi}) \cdot w^{-1}(z) \cdot dz.$$

7. Высокий уровень скорости обмена количеством движения в мелкодисперсном парокапельном потоке предопределяет крайне малую продолжительность релаксации паровой фазы.

8. Жидкая фаза считается несжимаемой и ее параметры зависят только от температуры частиц i -го размера.

Течение смешиваемых двухфазных потоков влажного пара в проточной части по своей природе является турбулентным, характеризуется мелкодисперсной парокапельной структурой, термической метастабильностью жидкой фазы и интенсивными тепло- и массообменными процессами. Для расчета осредненных параметров по длине тракта и суммарных характеристик компрессора применяется система уравнений одномерного адиабатного движения в квазиравновесном термодинамическом приближении для выделенных границ рассматриваемого участка течения:

$$\sum_{вх} \dot{m}_i = \sum_{вых} \dot{m}_j,$$

$$\sum_{вх} (\dot{m}w + pF) = \sum_{i} (\dot{m}w + pF) + \sum_{j} (\dot{m}w + pF) + \int_{(F)} pdF + I_{diss},$$

$$\sum_{вх} \dot{m}_i h_{oi} = \sum_{вых} \dot{m}_j h_{oj},$$

$$v(t(p), t_{жс}) = v_{жс}(t_{жс}) + \chi \cdot (v''(t(p)) - v_{жс}(t_{жс})),$$

$$\dot{S}_H = \sum_{вых} \dot{m}_j \cdot s_j - \sum_{вх} \dot{m}_i \cdot s_i.$$

Диссипация энергии в потоке, обусловленная потерями в пограничном слое и метастабильностью состояний фаз, учитывается скоростными коэффициентами φ_{ij} проточных частей и расчетом перегрева (переохлаждения) $\Delta t_{жс}$ жидкости в спектре распределения частиц.

Предельный режим течения на входе в камеру смешения характеризуется равенством статических давлений ($p_2 = p_0$) и скоростей ($w_2 = w_0$) в рабочем и инжектируемом потоках влажного пара с различным массовым паросодержанием: $x_2 = x_0$. При этом всегда $w_n \leq w_0$ и $p_n \leq p_0$.

Невозможность применения для расчета двухфазных течений известной теории газодинамических функций [7] требует разработки для замыкания системы уравнений дополнительных условий по кинетике тепло- и массообменных процессов.

Для моделирования течения в камере переменного сечения используется эмпирический метод, предложенный в работе [8] и основанный на линейной зависимости статического давления от площади сечения.

Определение основных параметров поточного процесса проводится методом итераций: поиск значения давления $p_3 = p_0$, которое удовлетворяет условиям протекания процессов в камере смешения и диффузоре при заданных условиях соответственно для сечений (a) и (c). Таким образом рассчитывается поле возможных режимов работы компрессора при различных значениях $M_3 = (w_3/a_3)$ и определяется оптимальное значение относительной скорости M_3 , соответствующее максимальной величине коэффициента инжекции i .

Экспериментальная установка и ее описание

Для исследования жидкостно-парового эжектора вакуумной установки сконструирован экспериментальный стенд, показанный на рисунке 1.

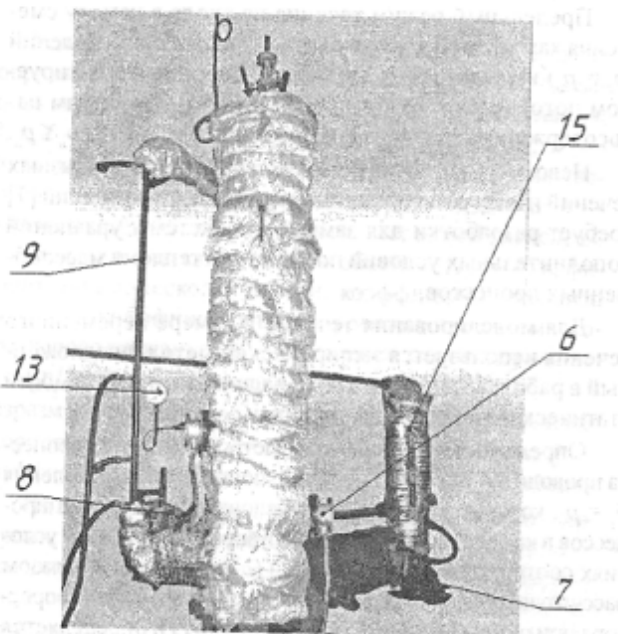
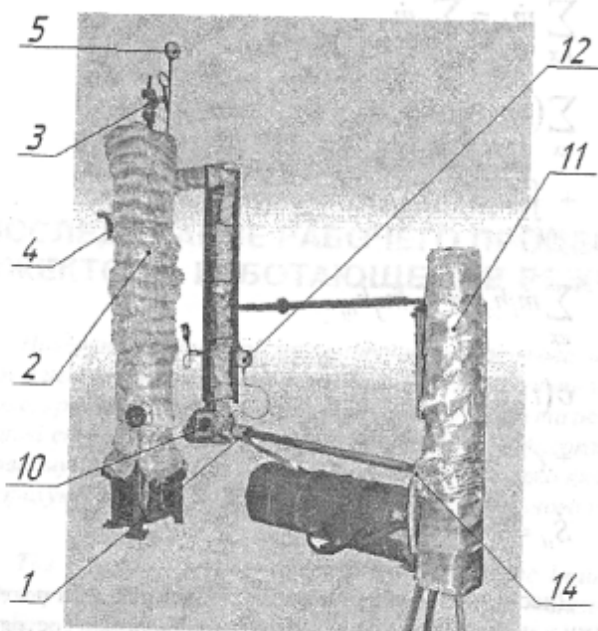


Рис. 1. Фотографії експериментального стенда: а — вид со сторони ежектора, б — вид со сторони теплообменника типа «труба в трубе»; 1 — жидкостно-паровой эжектор, 2, 15 — греющая емкость, 3, 4 — вентиль запорный, 5, 12, 13 — манометр образцовый, 6, 14 — блок ТЭНов, 7 — емкости для воды, 8 — вентиль регулировочный, 9 — теплообменник типа «труба в трубе», 10 — весы электронные, 11 — сепаратор.

Экспериментальный стенд предназначен для исследования элементов рабочего процесса и характеристик жидкостно-парового эжектора при давлении подачи P_0 воды до 25 бар и температуре t_0 до 200 °С.

Экспериментальная установка состоит из эжектора 1, двух греющих емкостей 2 и 15 для нагрева воды и подачи ее на активное и пассивное сопла эжектора и вспомогательных коммуникаций, трубопроводов и арматуры.

В качестве рабочей среды для нагрева и подачи в активное сопло эжектора используется проточная вода, которая берется из общей сети, находящейся в помещении испытательного бокса и подается в греющую емкость 2 насосами. В качестве рабочей среды для подачи в пассивное сопло эжектора также используется проточная вода, которая берется из общей сети, находящейся в помещении испытательного бокса и нагревается в емкости 15.

Результаты численного моделирования

По результатам математического моделирования строим графические зависимости достижимых показателей от давления в приемной камере, таких как коэффициент инжекции, степень перепроизводства пара и эксергетический к.п.д. эжектора. Результаты численного моделирования представлены на рисунках 2 и 3.

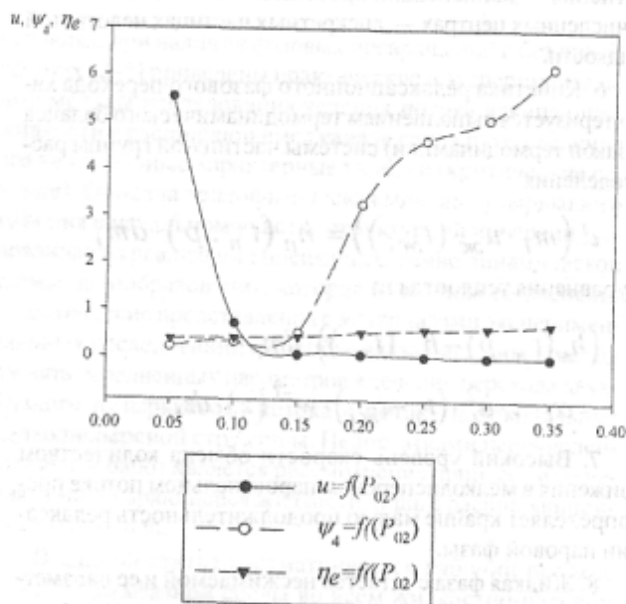


Рис. 2. Зависимость достижимых параметров эжектора от давления в приемной камере ($p_s = p_{02}$): $d_s = 10$ мм, $\alpha_s = 8^\circ$, $\mu_0 = 0,97$, $\Delta t_{жв} = 5$ °С, $x_{02} = 1$, $p_s = 1,0$ МПа.

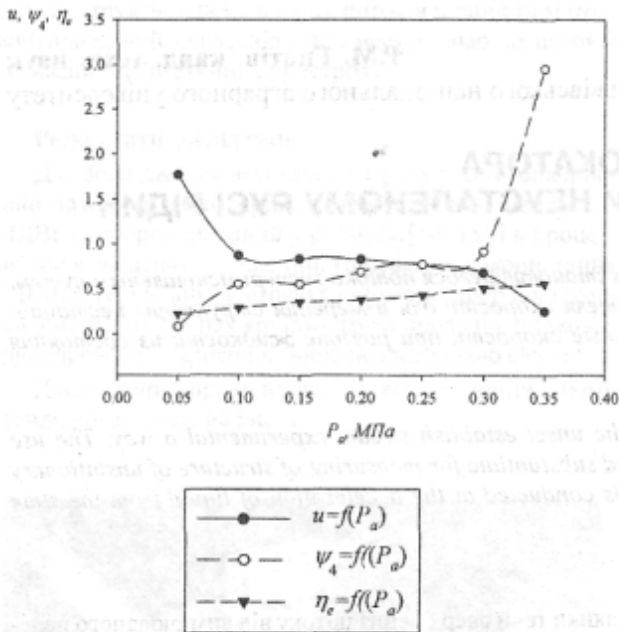


Рис. 3. Зависимость достижимых параметров эжектора от давления на срезе сопла ($p_{02} > p_s = p_2$); $p_{01} = 2,5$ МПа, $t_{01} = 200$ °С.

Выводы

На основании результатов расчета следует, что составленная математическая модель учитывает термическую метастабильность двухфазного потока, характерный низкий уровень массового коэффициента инжекции, состояние потоков на входе в смесительную камеру и ее геометрическую форму. Степень завершенности обменных процессов в каналах проточных частей является фактором, определяющим эффективность рабочего процесса жидкостно-парового эжектора.

Литература

1. Дейч, М.Е., Филиппов, Г.А. Газодинамика двухфазных сред. — М.: Энергоиздат, 1981. — 472 с.
2. Марченко, В.Н., Жиленко, Н.А. Струйная термокомпрессорная установка: назначение, принцип действия, термодинамическая модель и результаты расчетных исследований рабочего процесса // Вісник Сумського державного університету. — 2004. — № 13 (72). — С. 50—60.
3. Марченко, В.Н., Куценко, С.Н., Жиленко, Н.А. Экспериментальное исследование процесса формирования рабочей струи пара в термокомпрессоре // Вісник Сумського державного університету. — 2005. — № 12 (84). — С. 48—57.
4. Марченко, В.Н. Прокопов, М.Г. Парообразование в адиабатных ускоряющихся потоках вскипающей жидкости // Компрессорное и энергетическое машиностроение. — 2007. — № 3 (9). — С. 94—99.
5. Марченко, В.Н. Прокопов, М.Г. Расчет парообразования в ускоряющихся потоках вскипающей жидкости // Компрессорное и энергетическое машиностроение. — 2007. — № 4 (10). — С. 98—105.
6. Вскипающие адиабатные потоки // В.А. Зысин, Г.А. Баранов, Б.А. Барилевич, Т.Н. Парфенов. — М.: Атомиздат, 1976. — 152 с.
7. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1969. — 824 с.
8. Циклаури Г.В., Данилин В.С., Селезнев Л.И. Адиабатные двухфазные течения. — М.: Атомиздат, 1973. — 448 с.

Надійшла 16.06.2010 р.