

ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЖИДКОСТНО-ПАРОВОГО ЭЖЕКТОРА В ВАКУУМНОМ РЕЖИМЕ И ИХ ТЕХНИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

С.О. Шарпов, аспирант,
Сумский государственный университет, Сумы

Стаття має ознайомчо-інформативний характер і присвячена вивченню робочого процесу рідинно-парового ежектора, який працює в режимі вакуумування. Автор наводить опис принципової схеми експериментального стенда та вимірювальних приладів, а також мету і методику проведення експерименту.

Ключові слова: *рідинно-паровий ежектор, вакуумний режим роботи, робочий процес, експериментальний стенд, вимірювання температури.*

Статья имеет ознакомительно-информативный характер и посвящена изучению рабочего процесса жидкостно-парового эжектора, работающего в режиме вакуумирования. Автор приводит описание принципиальной схемы экспериментального стенда и применяемых измерительных приборов, а также цель и методику проведения эксперимента.

Ключевые слова: *жидкостно-паровой эжектор, вакуумный режим работы, рабочий процесс, экспериментальный стенд, измерения температуры.*

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в условиях непрерывного роста цен на энергоносители, критического состояния износа оборудования предприятий Украины, работающих с вакуумными установками, а также высокого уровня энергозатратности экономики Украины в целом актуальным вопросом является разработка энергоэффективной установки вакуумирования на базе жидкостно-парового эжектора и решение проблемы по энергосбережению и экологической чистоте промышленных вакуумных агрегатов нового поколения [1].

Существующие работы, посвященные экспериментальному исследованию струйных аппаратов, имеют ряд существенных недостатков и не дают общей картины, позволяющей получить наиболее полное представление о процессах, протекающих в рабочей полости и их особенностей при работе в вакуумном режиме. Все авторы рассматривают только определенные узкие диапазоны работы струйных аппаратов и учитывают лишь некоторые определяющие факторы.

Авторы первых работ [2-4], и в частности К. Клене, проведя исследования водо-воздушных струйных аппаратов, в качестве расчетных режимов определяет те, на которых входное давление газа зависит от противодействия смеси на выходе из аппарата. Авторы более поздних работ [5-9] более детально исследуют процессы, проходящие в камере смешения и на основании полученных ими экспериментальных данных приводят эмпирические зависимости для определения ее оптимальных размеров. После рассмотрения режимов работы струйных аппаратов с точки зрения термодинамики авторы работ [10-13] приводят вывод уравнений эжекции с учетом образования в выходном сечении камеры смешения однородной термодинамически и механически равновесной газожидкостной смеси. Авторы работ [14-17], проведя экспериментальные исследования по истечению вскипающей жидкости из расширяющихся сопел оптимальной геометрической формы, впервые сформулировали теплофизическую модель кипения и кинетики парообразования и

разработали численный метод расчета осредненных параметров потока вскипающей жидкости.

Проанализировав все вышеизложенные данные по экспериментальным исследованиям, автор ставит следующие задачи дальнейших исследований:

1. Создание экспериментального стенда по исследованию жидкостно-парового эжектора, работающего в режиме вакуумирования.
2. Экспериментальные исследования особенностей рабочего процесса жидкостно-парового эжектора, работающего в вакуумном режиме с целью уточнения математической модели.
3. Экспериментальные исследования зависимости расходных и энергетических показателей жидкостно-парового эжектора, работающего в вакуумном режиме от геометрических и режимных параметров.
4. Анализ факторов, влияющих на достижимые показатели эффективности жидкостно-парового эжектора, работающего в вакуумном режиме.
5. Уточнение и дальнейшая доработка математической модели рабочего процесса жидкостно-парового эжектора, работающего в вакуумном режиме.
6. Проверка правильности полученных научных результатов путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных.

СХЕМА И ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА

В лаборатории кафедры технической теплофизики СумГУ сконструирован экспериментальный стенд для исследования характеристик жидкостно-парового эжектора вакуумной установки, принципиальная схема и фотографии которого приведены на рис. 1 и 2.

Экспериментальная установка для исследований жидкостно-парового эжектора в вакуумном режиме (рис. 1) состоит непосредственно из эжектора 1, двух греющих емкостей 2 и 18 для нагрева рабочей жидкости и вспомогательных коммуникаций, трубопроводов и арматуры.

В качестве рабочих жидкостей для активного и пассивного потоков эжектора используется проточная вода.

При испытаниях жидкостно-парового эжектора в вакуумном режиме рабочая жидкость активного потока берется из емкостей 8 и 14, куда наполняется из общей сети, находящейся непосредственно в помещении испытательного бокса и с помощью насосов 9 и 10 подается в греющую емкость 2. Запорные вентили 4 и 12 служат для прекращения подачи рабочей жидкости в греющую емкость после ее наполнения. Уровень жидкости в греющей емкости контролируется вентилем 5. Затем рабочая жидкость нагревается блоком ТЭНов 7 до необходимого значения температуры. Давление в емкости контролируется манометром, показывающим 6. Предохранительный клапан 3 служит для аварийного сброса давления в случае превышения допустимого значения. Сброс в дренаж осуществляется с помощью вентилей 15.

После нагрева и достижения необходимого значения давления рабочая жидкость, находящаяся в состоянии насыщения, через теплообменник типа «труба в трубе» 17 подается на сопло эжектора. Регулирование расхода жидкости осуществляется вентилем 16. Охлаждающая вода для теплообменника типа «труба в трубе» берется из емкостей 8 и 14, куда поступает из общей сети. Циркуляция воды через теплообменник осуществляется с помощью насосов 9 и 10. Вентили запорной арматуры 11 и 12 служат для открытия или закрытия подачи охлаждающей воды на насосы. Регулирование подачи охлаждающей воды осуществляется с помощью регулировочного вентилей 13.

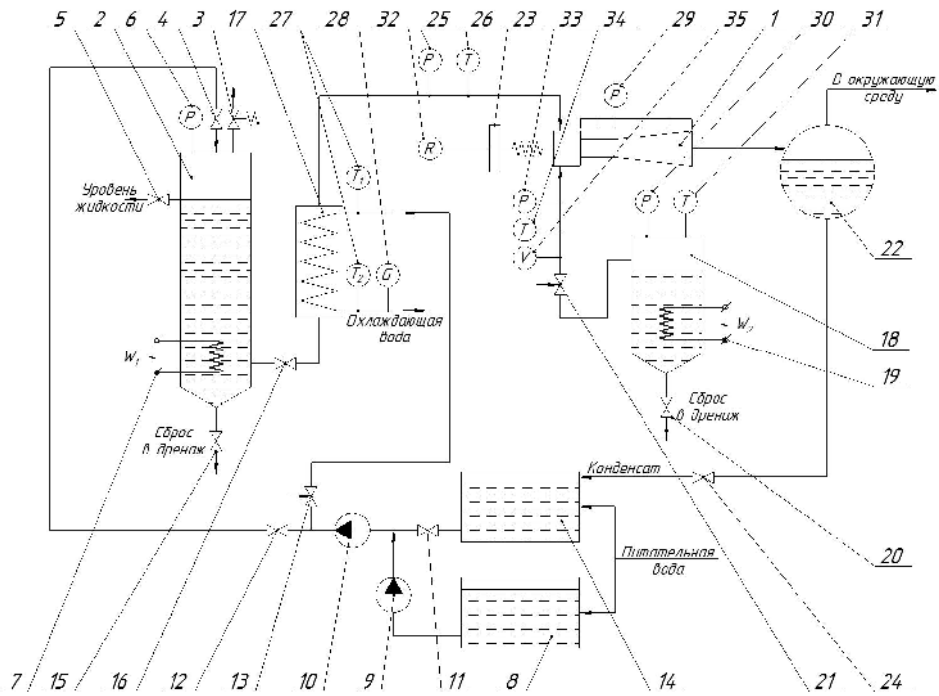


Рисунок 1 – Принципиальная схема экспериментального стенда для исследования характеристик жидкостно-парового эжектора вакуумного агрегата:

1 – жидкостно-паровой эжектор; 2, 18 – греющая емкость; 3 – предохранительный клапан; 4, 5, 11, 12, 15, 20, 24 – вентиль запорный; 6, 25, 29, 30 – манометр образцовый; 7, 19 – блок ТЭНов; 8, 14 – емкость для воды; 9, 10 – насос; 13, 16, 21 – вентиль регулировочный; 17 – теплообменник типа «труба в трубе»; 22 – сепаратор; 23 – весы цифровые; 26, 27, 31, 34 – цифровой мультиметр; 28 – расходомер массовый; 33 – вакуумметр образцовый; 35 – счетчик объемного расхода;

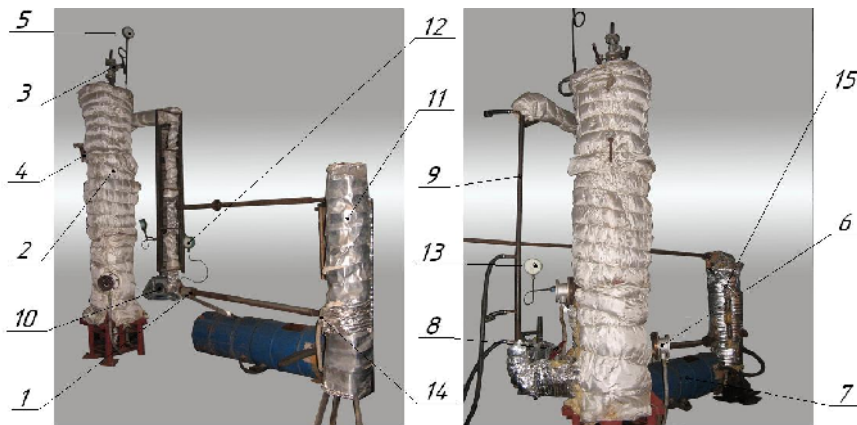


Рисунок 2 – Фотографии экспериментального стенда:

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 цифровые; 11 – сепаратор

При прохождении рабочей жидкости через теплообменник типа «труба в трубе» 17 происходит ее охлаждение, обеспечивая требуемую величину недогрева. Давление ее при этом не изменяется. На участке от греющей емкости до сопла контролируются следующие параметры: давление перед входом в сопло эжектора манометром образцовым 25, температура перед входом в сопло эжектора термпарой с цифровым мультиметром 26, температура охлаждающей воды на входе и на выходе из теплообменника двумя цифровыми мультиметрами 27, массовый расход охлаждающей воды при прохождении ее через теплообменник расходомером массовым 28.

Пассивный поток представляет собой пар, производимый из воды, которая берется из греющей емкости 18, где предварительно нагревается блоком ТЭНов 19 до необходимого значения температуры. Давление в греющей емкости 18 контролируется манометром образцовым 30. Температура в греющей емкости 18 контролируется термпарой с цифровым мультиметром 31. Сброс в дренаж осуществляется с помощью вентиля 20.

Затем пар подается в эжектор. Регулирование его расхода осуществляется вентилем 21. На участке от греющей емкости 18 до штуцера подачи его в эжектор контролируются следующие параметры: величина вакуума перед входом в эжектор вакуумметром образцовым 33, температура перед входом в эжектора термпарой с цифровым мультиметром 34 и объемный расход счетчиком объемного расхода 35.

После прохождения через эжектор смешанный поток попадает в сепаратор 22, где разделяется на паровую и жидкую фазы. Паровая фаза через трубопровод выбрасывается в окружающую среду, а жидкая фаза по трубопроводам сливается в емкость 14, из которой насосом откачивается для наполнения греющих емкостей 2 и 18 или охлаждения рабочей жидкости в теплообменнике 17. Вентиль запорной арматуры 24 служит для открытия или закрытия слива жидкой фазы из сепаратора.

При прохождении потока через эжектор выполняется измерение давления и величины вакуума в пяти характерных сечениях. Замер давления и величины вакуума осуществляется манометрами образцовыми и вакуумметрами образцовыми 29.

При исследовании параметров рабочей струи пара для измерения импульса (силы реакции) использовались цифровые весы 23.

Для измерения температур рабочих жидкостей, подаваемых на активное и пассивное сопла эжектора, и охлаждающей воды на входе и на выходе из теплообменника типа «труба в трубе» применяются цифровой мультиметр Mastech M-838 и термопара TP-01A, изображенные на рис. 3.



Рисунок 3 – Цифровой мультиметр Mastech M-838 и термопара TP-01A

Цифровой мультиметр Mastech M-838 представляет собой универсальный прибор, предназначенный для измерения целого ряда величин, таких как DC и AC напряжения, DC тока, сопротивления, диода, температуры, hFE и продолжительности издаваемого звука. Технические характеристики цифрового мультиметра Mastech M-838 приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Технические характеристики цифрового мультиметра Mastech M-838

Параметры	Значение параметра
Количество измерений	2
Постоянное напряжение	0,1 мВ ÷ 1000 В
Переменное напряжение	0,1 В ÷ 750 В
Постоянный ток	2 мА ÷ 10 А
Сопротивление	0,1 Ом ÷ 2 МОм
Входное сопротивление	1 МОм
Температура	-20 ÷ +1370 ⁰ С
Питание	9 В (типа NEDA 1604, крона ВЦ)
Габариты, мм	65x125x28
Вес, г (с батареей)	180

Термопара представляет собой термоэлемент, проводники которого изготавливаются из двух различных материалов. В данном случае использовался хромель-копелевый тип термопары. При проведении исследования термопара чувствительным концом присоединяется к стенке трубы в непосредственном месте измерения температуры. Нижний предел диапазона измеряемых температур составляет -200⁰С, верхний предел диапазона измеряемых температур составляет 600⁰С. Погрешность измерений составляет 0,75% ± 2,5⁰С.

Для сравнения величины измеряемой температуры и оценки погрешности показаний термопары использовался терморезистор прямого подогрева с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления ММТ-4, изображенный на рис. 4.

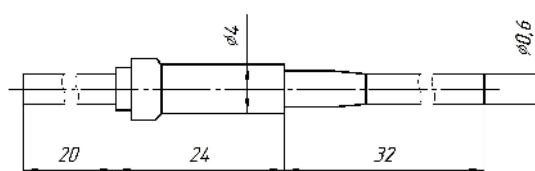


Рисунок 4 – Терморезистор ММТ-4

Данный тип терморезисторов предназначен для работы в цепях постоянного, пульсирующего и переменного тока частотой до 400 Гц в импульсных режимах, для измерения и регулирования температуры, а также для температурной компенсации элементов электрической цепи с положительным температурным коэффициентом сопротивления. Диапазон номинальных сопротивлений терморезистора ММТ-4 составляет 1·10³-220·10³, максимальная мощность рассеяния 560 мВт, температурный коэффициент сопротивления -(2,4-5,0) % /⁰С, коэффициент температурной чувствительности 2060-4300 К.

Терморезистор представляет собой резистор, выполненный из металлической проволоки или пленки и имеющий известную зависимость электрического сопротивления от температуры.

Максимальная погрешность измерения расходов по данным тарировочных испытаний составляла 3%. Предельная погрешность измерения температуры хромель-копелевыми термопарами в комплекте с мультиметром класса 0,4 не превышает 1⁰C. Для измерения статических давлений и значений вакуума используются образцовые манометры и вакуумметры класса 0,4.

Для решения поставленных в статье задач на экспериментальном стенде будут проводиться следующие исследования:

1. При истечении из сопла метастабильно перегретой жидкости, выявлении характера формирования рабочей струи пара и особенностей ее геометрии при известных и постоянных параметрах окружающей среды в лаборатории (давление и температура) и заданной величине давления в греющей емкости для нагрева рабочей жидкости, которая подается на активное сопло:

а) будут измеряться величины давления и температуры рабочей жидкости на входе в активное сопло эжектора, давления в горле активного сопла эжектора, силы реакции струи в интервале давлений в греющей емкости для нагрева рабочей жидкости, которая подается в активное сопло $P_{ем1} = 15,55-25,0$ бар и различных недогревах рабочей жидкости;

б) будут измеряться значения температуры на входе и на выходе охлаждающей воды, проходящей через теплообменник типа «труба в трубе», а также величина массового расхода охлаждающей воды, проходящей через теплообменник в интервале давлений в греющей емкости для нагрева рабочей жидкости, которая подается в активное сопло $P_{ем1} = 15,55-25,0$ бар и различных недогревах рабочей жидкости.

2. Для определения коэффициента эжекции жидкостно-парового эжектора при известных и постоянных параметрах окружающей среды в лаборатории (давление и температура) и заданных величинах давления в греющей емкости для нагрева рабочей жидкости, которая подается в активное сопло и в греющей емкости для нагрева рабочей жидкости, которая подается в пассивное сопло:

а) будут измеряться те же величины, что и в п. 1а, и величины давления и температуры рабочей жидкости на входе в пассивное сопло эжектора, а также объемный расход пара, подаваемого на пассивное сопло эжектора в интервале давлений в греющей емкости для нагрева рабочей жидкости, которая подается в активное сопло $P_{ем1} = 15,55-25,0$ бар, в интервале давлений в греющей емкости для нагрева рабочей жидкости, которая подается в пассивное сопло $P_{ем2} = 0,1-1,0$ бар и различных недогревах рабочей жидкости;

б) будут измеряться те же величины, что и в п. 1б;

в) будут измеряться значения давлений и величины вакуума в пяти характерных сечениях жидкостно-парового эжектора.

ВЫВОДЫ

В результате исследований на экспериментальном стенде предполагается получить результаты, которые позволят сформулировать особенности рабочего процесса жидкостно-парового эжектора, работающего в вакуумном режиме и по полученным результатам уточнить математическую модель.

SUMMARY

OBJECTIVES OF EXPERIMENTAL RESEARCH WORK THE LIQUID-STEAM-JET EJECTOR IN THE VACUUM MODE AND THE TECHNICAL CONTENT

*S.O. Sharapov,
Sumy State University, Sumy*

The article has a familiarization-informative nature and is devoted to studying the working process of liquid-vapor ejector, which operates in vacuum. The author describes the concept of the experimental stand and the instrumentation, the purpose and methodology of the experiment.

Key words: *liquid-vapor ejector, vacuum mode, workflow, experimental stand, temperature measurement.*

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Возобновляемая энергетика Украины-2010. Справочник. – К.: Fuel Alternative, 2009. – 256 с.
2. Pfleiderer C. Zur Berechnung der Wasserstrahl-zuftpumpen // Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure. – 1914. – Bd. 58, №24. – S. 965-973.
3. Klene K. G. Untersuchungen an Wasserstrahl – Luftpumpen // Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure. – 1935. – Bd. 79, №3. – S. 77-78.
4. Аронс Г. А. Струйные аппараты. – М.: Госэнергоиздат, 1948. – 139 с.
5. Соколов Е. Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер.– М.: Энергия, 1970. – 287 с.
6. Берман Л. Д. Расчетные зависимости для водоструйных эжекторов / Л.Д. Берман, Г. И. Ефимочкин // Теплоэнергетика. – 1964. - №7. – С. 44-48.
7. Шпитов А. Б., Спиридонов Е. К. О предельных режимах работы жидкостно-газового эжектора // Исследование силовых установок и шасси транспортных и тяговых машин: Тематический сб. науч. тр. – Челябинск: ЧГТУ, 1991. – С. 129-134.
8. Копьев С. Ф. Вспомогательное оборудование машинных цехов электростанций. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1954. – 296 с.
9. Канингэм Р. Ж. Сжатие газа с помощью жидкостноструйного насоса // Тр. Американского общества инженеров-механиков. Сер. Д. Теоретические основы инженерных расчетов. – 1974. – №3. – С. 112-118.
10. Шидловский В. П. К расчету газожидкостного эжектора // Изв. АН СССР. ОТН. – 1954. – №10. – С. 119-123.
11. Васильев Ю. Н. Теория двухфазного газожидкостного эжектора с цилиндрической камерой смешения // Лопаточные машины и струйные аппараты. – М.: Машиностроение, 1971. – Вып. 5. – С. 175-261.
12. Дейч М. Е. Влияние некоторых геометрических и газодинамических параметров ступени эжектора с изобарным начальным участком смешения на эффективность ее работы / М. Е. Дейч, А.В. Робожев, А.А. Кох // Труды МЭИ. – 1955. -Вып. 23. – С. 103-120.
13. Шапиро Я. Г. Экспериментальное исследование жидкостного эжектора // Присоединение дополнительной массы в струйных аппаратах: Тр. МАИ; Вып. 97. – М.: Оборонгиз, 1958. – С. 191-236.
14. Марченко В. Н. Струйная термокомпрессорная установка: назначение, принцип действия, термодинамическая модель и результаты расчетных исследований рабочего процесса / В. Н. Марченко, Н.А. Жиленко // Вісник Сумського державного університету. – 2004. – №13(72). – С. 50-60.
15. Марченко В. Н. Экспериментальное исследование процесса формирования рабочей струи пара в термокомпрессоре / В. Н. Марченко, С.Н. Куценко, Н.А. Жиленко // Вісник Сумського державного університету. – 2005. – №12(84). – С. 48-57.
16. Марченко В. Н. Парообразование в адиабатных ускоряющихся потоках вскипающей жидкости / В. Н. Марченко, М.Г. Прокопов // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2007. – №3(9). – С. 94-99.
17. Марченко В. Н. Расчет парообразования в ускоряющихся потоках вскипающей жидкости / В. Н. Марченко, М.Г. Прокопов // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2007. – №4(10). – С. 98-105.

Поступила в редакцию 11 февраля 2011 г.