

УДК 621.694.2

С. О. Шарпов✉, **В. М. Арсеньев**

Сумський державний університет, ул. Римського-Корсакова, 2, Сумы, 40007, Україна

✉e-mail: s.sharpov@kttf.sumdu.edu.ua

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОСТНО-ПАРОВОГО ЭЖЕКТОРА С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАМЕРОЙ СМЕШЕНИЯ

В статье описана математическая модель расчета геометрических и энергетических параметров жидкостно-парового эжектора с цилиндрической камерой смешения и приведены результаты численного моделирования течения двухфазной среды в такой камере смешения. Также поданы результаты экспериментального исследования плоскопараллельного жидкостно-парового эжектора с цилиндрической камерой смешения и проведено их сравнение с теоретическими данными. Выполнен анализ эксергетической эффективности применения эжектора с такой камерой смешения.

Ключевые слова: Жидкостно-паровой эжектор; Цилиндрическая камера смешения; Численное моделирование; Экспериментальное исследование; Эксергетическая эффективность.

С. О. Шарпов, В. М. Арсеньев

Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, Сумы, Україна

✉e-mail: s.sharpov@kttf.sumdu.edu.ua

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РІДИННО-ПАРОВОГО ЕЖЕКТОРА З ЦИЛІНДРИЧНОЮ КАМЕРОЮ ЗМІШУВАННЯ

У статті описано математичну модель розрахунку геометричних і енергетичних параметрів рідинно-парового ежектора з циліндричною камерою змішування та наведено результати чисельного моделювання течії двофазного середовища у такій камері змішування. Також подані результати експериментального дослідження плоскопараллельного рідинно-парового ежектора з циліндричною камерою змішування і проведено їх порівняння з теоретичними даними. Виконано аналіз ексергетичної ефективності застосування ежектора з такою камерою змішування.

Ключові слова: Рідинно-паровий ежектор; Циліндрична камера змішування; Числове моделювання; Експериментальне дослідження; Ексергетична ефективність.



This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

I. ВВЕДЕНИЕ

В связи со стремительным развитием промышленности, все более широкое распространение получают технологические процессы с использованием вакуума. Это дает возможность значительно повысить качество получаемых продуктов за счет уменьшения содержания в них вредных примесей в результате предохранения технологических систем от взаимодействия с атмосферой и увеличения степени полноты протекания процессов, а также позволяет разрабатывать и внедрять новые, более совершенные технологические процессы, неосуществимые в условиях атмосферного давления [1].

В большинстве случаев, вакуум получают за счет энергии рабочей струи потока. Применяемые на современном этапе вакуумные агрегаты, в состав которых входят пароструйные эжекторы, как правило, являются многоступенчатыми и имеют очень низкую эффективность, что в первую очередь определяется

потерями «на удар», которые возникают при смешивании сверхкритического активного и докритического пассивного потоков [2].

В данной ситуации весьма актуальным становится применение вакуумного агрегата на базе жидкостно-парового эжектора (ЖПЭ), рабочий процесс которого основан на принципе струйной термокомпрессии [3-6].

В статье рассматривается ЖПЭ с цилиндрической камерой смешения, описаны предельные режимы его работы, приведены результаты численного и экспериментального исследования его рабочего процесса, выполнена оценка эксергетической эффективности создания вакуума таким агрегатом.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ СМЕШЕНИЯ

В ЖПЭ камера смешения может быть цилиндрической формы или конической, с последующим ци-

линдрическим участком, который предназначен для выравнивания пульсаций давления после сужающейся конической части. Вид камеры смешения и ее геометрия зависят не только от параметров активного и пассивного потоков на входе, но и от параметров смешанного потока на выходе из нее.

С целью достижения максимальной эффективности процесса смешения, необходимо определить оптимальное положение сечения среза активного сопла относительно входного сечения камеры смешения. В ЖПЭ это осуществимо, т. к. в нем практически отсутствуют потери «на удар» и значения коэффициента инжекции находятся на уровне $0,01 \div 0,1$. При этом следует рассмотреть два предельных варианта инжекции (рисунок 1).

Первый предельный режим возникает, когда сечение среза сопла ($a-a$) совпадает с сечением (I_1-I_1) (рисунок 1, а). Он характеризуется равенством давлений активного потока на срезе сопла и пассивного потока на входе в камеру смешения (рисунок 1, а). При этом режиме течения присоединение массы пассивного потока в развивающемся турбулентном слое струи происходит изобарно.

Второй предельный режим имеет место при смешении сопла активного потока внутрь камеры смешения, тогда сечение среза сопла ($a-a$) совпадает с сечением (I_2-I_2) (рисунок 1, б). Он характеризуется равенством скоростей активного потока на срезе сопла и пассивного потока на входе в камеру смешения. При этом режиме течения присоединение массы пассивного потока осуществляется путем истечения через кольцевое сопло, образованное входным сечением камеры смешения и выходным срезом сопла.

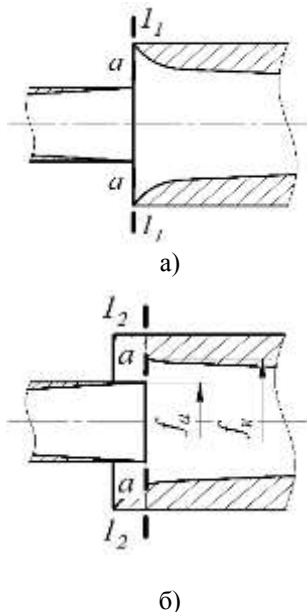


Рисунок 1 – Предельные варианты инжекции жидкостно-парового эжектора:

а) $p_a = p_{02}$, $\alpha_w = 0$, $v_n = v_{02}$;

б) $p_a = p_n < p_{02}$, $\alpha_w = 1$, $v_n > v_{02}$.

$a-a$ – сечение среза сопла активного потока,

I_1-I_1 – входное сечение (первый предельный режим),

I_2-I_2 – входное сечение (второй предельный режим)

Для расчета ЖПЭ с камерой смешения переменного сечения уравнения импульсов и сохранения массы записываются в следующем виде:

$$\begin{aligned} (1 + \alpha_w \cdot u) \cdot \left(\frac{w_a^2}{v_a} \right) + f_k \cdot p_1 = \\ = f_3 \cdot \left(\varphi_3^{-1} \cdot \frac{w_3^2}{v_3} + p_3 \right) + \int_{f_3}^{f_k} p df \end{aligned} \quad (1)$$

где $\alpha_w = \frac{w_2}{w_a}$; w_2 – скорость инжектируемого потока

во входном сечении камеры смешения; $f_k = \frac{F_k}{F_a}$ –

основной геометрический параметр во входном сечении камеры смешения; $f_3 = \frac{F_3}{F_a}$ – основной геометрический параметр на выходе из камеры смешения;

φ_3 – скоростной коэффициент камеры смешения.

$$\varphi_3 = \frac{1}{1 + \zeta_3},$$

где $\zeta_3 = \left(\frac{\xi}{2} \right) \cdot \left(\frac{z_3 - z_1}{D_{13}} \right)$; ξ – коэффициент гидравлического трения потоков в камере смешения;

D_{13} – диаметр эквивалентной цилиндрической камеры смешения.

Относительная площадь камеры смешения на входе f_k и на выходе f_3 определяется интегрированием уравнения (1):

$$\begin{aligned} f_k = \frac{10^{-5} \cdot w_a^2 + \frac{P_a - P_{02}}{P_2}}{v_a \cdot P_2} - \\ - \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{1-n} \right) - \frac{P_{02}}{P_2} \\ - \frac{f_3 \cdot \left(1 + \frac{M_3^2 \cdot k_3}{\varphi_3 \cdot \beta_3} \right) \cdot \frac{P_3}{P_2}}{2} + \\ + \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{1-n} \right) - \frac{P_{02}}{P_2} \\ + \frac{f_3 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{1-n} \right)}{2} \\ + \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{1-n} \right) - \frac{P_{02}}{P_2} \\ f_3 = \frac{(1+u) \cdot w_a \cdot w_3}{10^5 \cdot M_3^2 \cdot k_3 \cdot P_3 \cdot v_a} \end{aligned} \quad (2)$$

Для упрощения расчетов в формуле (2) слагаемые можно сгруппировать в отдельные комплексы:

$$A_{\kappa} = \frac{10^{-5} \cdot w_a^2}{v_a \cdot P_2} + \frac{P_a - P_{02}}{P_2},$$

$$B_{\kappa} = f_3 \cdot \left(1 + \frac{M_3^2 \cdot k_3}{\varphi_3 \cdot \beta_3} \right) \cdot \frac{P_3}{P_2},$$

$$C_{\kappa} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{1-n} \right).$$

Тогда уравнение (2) с учетом упрощений примет вид:

$$f_{\kappa} = \frac{A_{\kappa} - B_{\kappa} + f_3 \cdot C_{\kappa}}{C_{\kappa} - \frac{P_{02}}{P_2}}.$$

Для цилиндрической камеры смешения, в которой $f_{\kappa} = f_3$, выражение (2) упрощается ввиду изменения геометрии проточной части и будет выглядеть так:

$$f_{\kappa} = \frac{\frac{w_a^2}{v_a} + P_a - P_{02}}{10^5 \cdot P_3 \cdot \frac{1 + M_3^2 \cdot k_3}{\varphi_3 \cdot \beta_3} - P_{02}}$$

Для определения областей эффективного использования камер смешения различной геометрической формы необходимо сравнить их по величине предельного достигаемого вакуума пассивного потока при одинаковых геометрических параметрах. На рисунке 2 представлена зависимость глубины вакуума во входном сечении камеры смешения от начальных параметров рабочей жидкости активного потока.

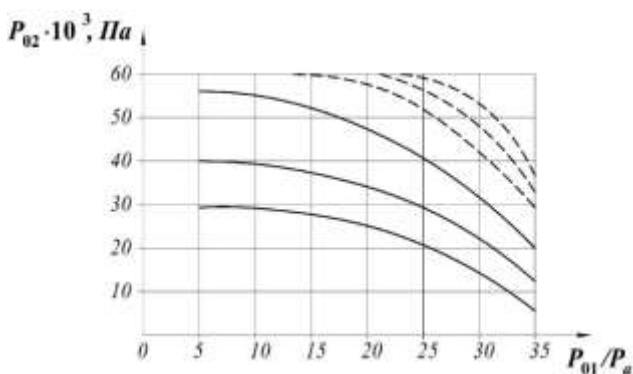


Рисунок 2 – Зависимость начального давления пассивного потока на входе в приемную камеру P_{02} от начальных параметров рабочей среды активного потока при $P_{01} = 4 \div 8$ бар:
 — — — коническая камера,
 - - - - - цилиндрическая камера

Из рисунка 2 видно, что в камерах смешения цилиндрической формы возможно создание ограниченного значения величины вакуума пассивного потока на входе в приемную камеру, а для достижения одинакового P_{02} в цилиндрических камерах, необходимы большие значения начальных параметров рабочей

жидкости активного потока. Также в цилиндрических камерах возможна реализация меньшей степени сжатия пассивного потока по отношению к коническим камерам (см. рисунок 3).

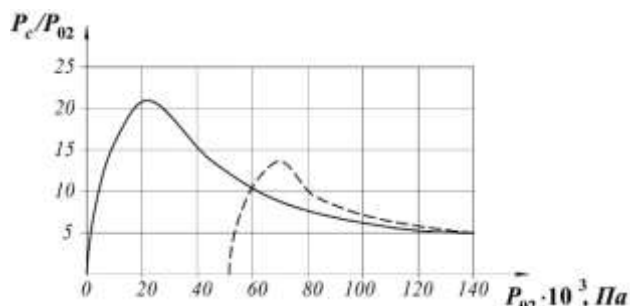


Рисунок 3 – Зависимость отношения давлений P_c/P_{02} от начального давления пассивного потока на входе в камеру смешения P_{02} :
 — — — коническая камера,
 - - - - - цилиндрическая камера

В зависимости от начального давления рабочей среды пассивного потока на входе в камеру смешения будут изменяться и другие его параметры, такие как паросодержание, а, следовательно, и достижимые параметры эффективности рабочего процесса ЖПЭ. Влияние начальной величины вакуума на входе в камеру смешения на параметры сжатого потока показаны на рисунке 4.

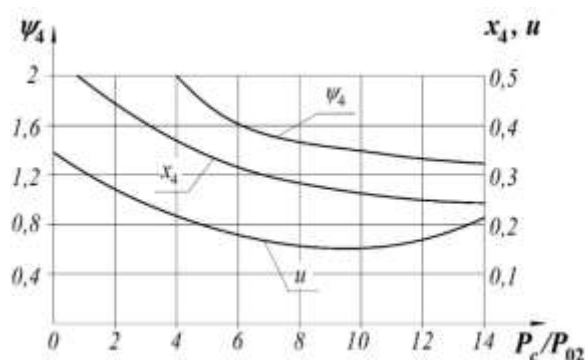


Рисунок 4 – Зависимость паросодержания x_4 , степени перепроизводства пара ψ_4 и коэффициента инжекции u от степени повышения давления пассивного потока в цилиндрической камере смешения ($P_{01} = 4 \div 8$ бар, $t_{01} = 120 \div 160^{\circ}C$, $P_4 = 1$ бар)

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальное исследование ЖПЭ с цилиндрической камерой смешения выполнялось на опытно-образце стенда, согласно поставленных целей и задач [7].

Для определения диапазона начальных параметров, при которых достигается максимальная эффективность были проведены исследования сопла активного потока при истечении рабочей жидкости в обла-

сти давлений, ниже атмосферного. В результате эксперимента была получена зависимость величины создаваемого вакуума во входном сечении камеры смешения от начальных параметров рабочей жидкости активного потока, представленная на рисунке 5.

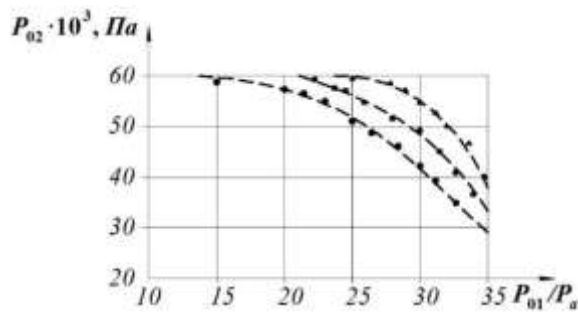


Рисунок 5 – Экспериментальная зависимость величины создаваемого вакуума во входном сечении камеры смешения P_{02} от начальных параметров рабочей жидкости активного потока: \bullet – $P_{01} = 4$ бар, \blacksquare – $P_{01} = 6$ бар, \blacktriangle – $P_{01} = 8$ бар

Как видно из рисунка 5, чем больше отношение давлений P_{01}/P_a , тем большую величину вакуума можно получить. Также была определена предельная величина вакуума, которую можно создать в камере смешения цилиндрической формы. Так, при начальных параметрах рабочей жидкости активного потока $P_{01} = 4\div 8$ бар и $t_{01} = 120\div 160^\circ\text{C}$, максимальная величина вакуума на входе в приемную камеру составила $P_{02} = 45\div 52$ кПа.

В ходе дальнейших экспериментальных исследований были получены зависимости паросодержания и степени перепроизводства пара на выходе из ЖПЭ, а также коэффициента инжекции, которые представлены на рисунке 6.

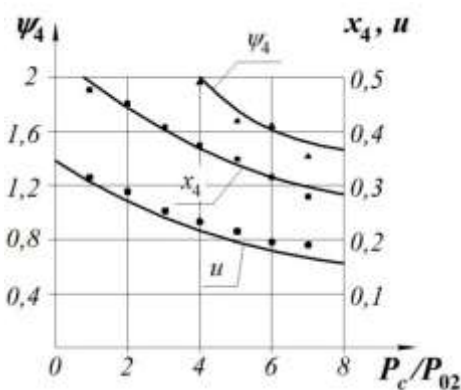


Рисунок 6 – Экспериментальная зависимость паросодержания x_4 , степени перепроизводства пара ψ_4 и коэффициента инжекции u от степени повышения давления пассивного потока в цилиндрической камере смешения ($P_{01} = 4\div 8$ бар, $t_{01} = 120\div 160^\circ\text{C}$, $P_a = 1$ бар)

Из рисунка 6 видно, что диапазон эффективной работы ЖПЭ с цилиндрической камерой смешения,

при указанных выше начальных параметрах P_{01} и t_{01} , находится в интервале $P_c/P_{02} = 4\div 6$.

IV. ЭКСЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЖИДКОСТНО-ПАРОВОГО ЭЖЕКТОРА С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАМЕРОЙ СМЕШЕНИЯ

Для оценки энергетической эффективности ЖПЭ с цилиндрической камерой смешения был использован эксергетический метод термодинамического анализа. Эксергетическая оценка степени совершенства энергопреобразований в исследуемой вакуумной системе базируется на современной терминологии и положениях, изложенных в работах научной школы Дж. Тсатсарониса [8-10].

Эксергетическая эффективность определяется как отношение эксергии потока продукта E_P к эксергии потока топлива E_F системы:

$$\varepsilon_{ex} = \frac{E_P}{E_F}$$

где E_P – эксергия потока продукта системы; E_F – эксергия потока топлива системы.

Для ЖПЭ в качестве эксергии потока продукта рассматривается разность эксергии насыщенного пара на выходе из сепаратора и эксергии пассивного потока на входе в ЖПЭ. В качестве эксергии потока топлива рассматривается разность эксергии активного потока на входе в ЖПЭ и эксергии жидкости на выходе из сепаратора.

Для вакуумного агрегата на базе ЖПЭ с цилиндрической камерой смешения в качестве эксергии потока продукта, так же, как и для ЖПЭ, рассматривается разность эксергии насыщенного пара на выходе из сепаратора и эксергии пассивного потока на входе в ЖПЭ. Эксергия потока топлива является суммой потребляемой мощности циркуляционного насоса и эксергии потока теплоносителя в теплообменнике-подогревателе.

В результате эксергетического анализа были получены значения достижимых показателей эффективности, приведенные на рисунке 7.

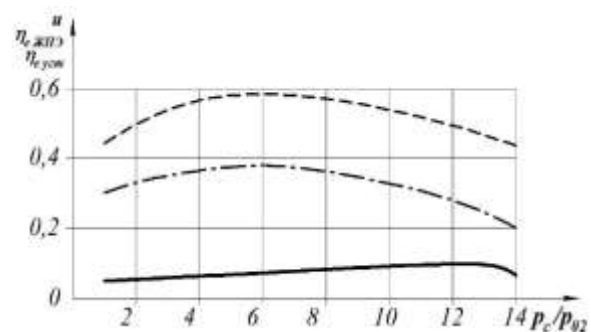


Рисунок 7 – Зависимость достижимых показателей эффективности ЖПЭ с цилиндрической камерой смешения от степени повышения давления пассивного потока ($P_{01} = 8$ бар, $P_a = P_{02} = 0,5$ бар):

— — — — коэффициент инжекции,
 - - - - - КПД жидкостно-парового эжектора,
 - - КПД вакуумного агрегата

ВЫВОДЫ

Проанализировав результаты численного и экспериментального исследования ЖПЭ, можно сделать вывод о том, что цилиндрические камеры смешения эффективны для создания незначительного разрежения пассивного потока на входе в приемную камеру ($P_c/P_{02} = 4 \div 6$), а использование конических камер дает возможность создавать перепады давлений на уровне $P_c/P_{02} = 15 \div 20$, что позволяет расширить области применения вакуумных агрегатов на базе ЖПЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Соколов Е.Я.** Струйные аппараты / Е.Я., Соколов, Н.М. Зингер. – М.: Энергоиздат, 1989. – 352 с.
2. **Арсеньев В.М.** Оценка энергетической эффективности жидкостно-парового эжектора, применяемого для создания вакуума в металлургии / В.М. Арсеньев, С.О. Шарапов, М.Г. Прокопов // Холодильна техніка і технологія. – 2011. – №5 (133). – С. 62-66.
3. **Марченко В.Н.** Перспективы применения и результаты численного моделирования струйной термокомпрессорной установки / В. Н. Марченко, Н. А. Жиленко, С. Н. Куденко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2005. – № 1. – С. 36-40.
4. **Марченко В.Н.** Струйная термокомпрессорная установка (СТК): назначение, принцип действия, термодинамическая модель и результаты расчетных ис-

следований параметров рабочего процесса / В.Н. Марченко, Н.А. Жиленко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2004. – № 13 (72). – С. 50-60.

5. **Marchenko V.N.** Principle of stream thermocompression: conception of energetic efficiency and prospect of realization is in small heat energetic / V.N. Marchenko, V.A. Osipov, M.G. Prokopov, S.O. Sharapov // «MOTROL. Motoryzacja i energetyka rolnictwa». – Simferopol-Lublin, 2009. – Volume 11 A. – S. 70-76.
6. **Sharapov S.** The use of liquid-vapor ejector in vacuum systems / S. Sharapov, V. Arsenyev, M. Protsenko // Science et technique du froid – Refrigeration science and technology. – France / Slovakia, 2013. – Vol. 4.
7. **Шарапов С.О.** Задачи экспериментальных исследований рабочего процесса жидкостно-парового эжектора в вакуумном режиме и их техническое содержание / С.О. Шарапов // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2011. – № 1. – С. 51-57.
8. **Тсатсаронис Дж.** Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергообразующей системы. – Одесса: ООО «Студия Негоциант», 2002. – 152 с.
9. **Морозюк Т.В.** Теория холодильных машин и тепловых насосов. – Одесса: Студия «Негоциант», 2006. – 712 с.
10. **Арсеньев В.М.** Теплонасосна технологія енергозбереження / В.М. Арсеньев // . – Суми : СумДУ, 2011. – 283 с.

Отримана в редакції 03.12.2015, прийнята до друку 03.03.2016

S. O. Sharapov, V. M. Arsenyev

Sumy State University, 2 Rymsky-Korsakov str., Sumy, Ukraine

✉e-mail: s.sharapov@kttf.sumdu.edu.ua

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LIQUID-VAPOR EJECTOR WITH CYLINDRICAL MIXING CHAMBER

The article describes the mathematical model for calculating the geometric and power parameters of liquid-vapor ejector with a cylindrical mixing chamber and the results of numerical simulation of two-phase medium in a mixing chamber. Also the results of an experimental study of a plane-parallel liquid-vapor ejector with a cylindrical mixing chamber are submitted and compared with theoretical data. The analysis of the exergetic efficiency of the ejector with the mixing chamber is carried out.

Keywords: Liquid-vapor ejector; Cylindrical mixing chamber; Numerical modeling; Experimental investigation; Exergetic efficiency.

REFERENCES

1. **Sokolov, E. Ya., Zinger, N. M.** (1989). Struynie apparaty [Inkjet machines], Moscow, 352 p. (in Russian)
2. **Arsenyev, V. M., Sharapov, S. O., Prokopov, M. G.** (2011). Ocenka energeticheskoi effektivnosti zhidkostno-parovogo egektora, primeniaemogo dlia sozdania vakuumu v metallurgii [Energy efficiency value of the liquid-vapor ejector used to create vacuum in the metalurgical engineering]. *Refrigeration engineering and technology*, No. 5 (133), 62-66 (in Russian)
3. **Marchenko, V. N., Zhilenko, N. A., Kucenko, S. N.** (2005). Perspektivy primeneniya I rezultaty chislennogo

modelirovaniya struynoy termokompressornoy ustanovki [Perspectives of application and results of jet thermocompression unit numerical modeling]. *Visnyk of Sumy State University: Technical Sciences Series*, No. 1, 36-40 (in Russian)

4. **Marchenko, V. N., Zhilenko, N. A.** (2004). Struinaia termokompressornaia ustanovka (STK): naznachenie, princip deistvia, matematicheskaiia model' i rezultaty rascheta rabochego protsessa [Stream thermocompression unit (STC): purpose, principle, thermodynamic model and the calculation results of working process]. *Visnyk of Sumy State University: Technical Sciences Series*, 13 (72): 50-60 (in Russian)

5. **Marchenko, V. N., Osipov, V. A., Prokopov, M. G., Sharapov, S. O.** (2009). Principle of stream thermocompression: conception of energetic efficiency and prospect of realization is in small heat energetic. «*MOTROL. Motoryzacja i energetyka rolnictwa*», Simferopol-Lublin, Vol. 11 A, 70-76.
6. **Sharapov, S., Arsenyev, V., Protsenko, M.** (2013). The use of liquid-vapor ejector in vacuum systems. Science et technique du froid. *Refrigeration science and technology*, France/Slovakia, Vol. 4.
7. **Sharapov, S. O.** (2011). Zadachi eksperimentalnykh issledovaniy rabocheho processa zhidkostno-parovogo ejectora v vakuumnom rezhime raboty i ikh tekhnicheskoe sodержanie [Objectives of experimental research work the liquid-steam-jet ejector and its technical content], *Visnyk of Sumy State University: Technical Sciences Series*, No. 1, 51-57 (in Russian).
8. **Tsatsaronis, J.** (2002). Vzaimodeistvie termodinamiki i ekonomiki dlia minimizatsii stoimosti energopreobrazuiuschei sistemy [The interaction of thermodynamics and economics in order to minimize the cost of energy conversion systems]. Odessa, 152 p. (in Russian).
9. **Morozyuk, T. V.** (2006). Teoria kholodilnikh mashin i teplovikh nasosov [The theory of chillers and heat pumps]. Odessa, 712 p. (in Russian)
10. **Arsenyev, V. M.** (2011). Teplonasosna tekhnologia energozberezheniia [Energy-saving heat pump technology]. Sumy, Sumy State University, 283 p. (in Ukrainian).

Received 03 December 2015

Approved 03 March 2016

Available in Internet 29 April 2016