

М.И. ПРОЦЕНКО, вед. инж., СумГУ, Сумы

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОТЫ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУЙНОЙ ТЕРМОКОМПРЕССИИ И ЕГО РАСЧЁТНАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрена схема экспериментального стенда термотрансформатора с использованием струйной термокомпрессии, который работает в режиме теплового насоса на рабочем веществе R134a. Представлены основные уравнения расчетной модели термотрансформатора и зависимости для определения показателей энергоэффективности. Приведены результаты численного исследования показателей энергоэффективности.

Ключевые слова: жидкостно-паровой струйный компрессор, термотрансформатор, режим теплового насоса.

Введение. На сегодняшний день в Украине важными являются проблемы стабильного энергосбережения всех сторон жизнедеятельности человека и общества, существенного повышения уровня энергетической эффективности, уменьшения влияния энергетики на окружающую среду. Данная проблематика вызывает большой интерес среди ученых, тем самым заставляя создавать все новые и новые энергосберегающие технологии и установки. В современном мире одним из перспективных направлений в области энергосбережения является применение *тепловых насосов*. Они являются достаточно эффективным и экологически чистым устройством для систем теплоснабжения, поскольку позволяют использовать возобновляемые источники энергии.

Анализ последних исследований. Основным показателем энергоэффективности термотрансформатора является коэффициент преобразования COP_{Σ} , представляющий сопоставление полезного эффекта и энергетических затрат на его реализацию. Коэффициент преобразования всегда больше единицы [1]. Для теплоиспользующих термотрансформаторов он составляет:

- с приводом от теплового двигателя – 1,2;
- парокompрессионных тепловых насосов – 1,5;
- абсорбционных тепловых насосов – 2,5 [2];
- струйно-термокомпрессорных модулей (СТК) – 3...3,5 [3, 4].

Как видно из работ *Петренка В.А.* [5], для пароежекторных холодильных машин COP_{Σ} составляет 0,5...0,8, что намного ниже, чем для термотрансформатора с использованием струйной термокомпрессии в режиме холодильной машины.

В работах *Шита Б.М.* [6, 7], *Kandil S.M.* [8, 9] рассмотрена схема теплового насоса с включением двухфазного эжектора на диоксиде углерода, COP составляет 3,5. Но в отличие от рассмотренных схем в данных работах, где в активное сопло эжектора после дроссельного устройства подается жидкостно-паровая смесь, то в нашем случае в активное сопло подается жидкость и дальше в сопле формируется мелкодисперсная жидкостно-паровая смесь [10 – 11]. Другое отличие заключается в том, что насыщенная жидкость в нашем случае по пограничной кривой дожимается насосом до необходимого давления, а в вышеуказанных работах насос не используется. В работах Шита Б. М. и Kandil S.M. предложены схемы и методика расчета тепловых насосов для углекислого газа. В данной статье рассматривается схема термотрансформатора для рабочих веществ HFC-типа, следовательно, неизвестно как изменится эффективность работы теплового насоса, если заменить углекислый газ на фреон.

Постановка задачи. Учитывая все вышеизложенное, в данной работе ставятся следующие задачи дальнейших исследований:

- создание экспериментального стенда термотрансформатора на базе СТК-модуля на рабочем веществе R134a;
- экспериментальные исследования зависимости энергетических характеристик термотрансформатора, работающего в теплонасосном и холодильном режимах, от режимных параметров, в частности температуры утилизируемой среды;
- экспериментальные исследования различных схемных решений термотрансформатора и их влияние на энергоэффективность установки;
- анализ влияния температуры кипения рабочего вещества на достижение необходимых значений коэффициента инжекции и коэффициента перепроизводства пара для максимально эффективного режима работы термотрансформатора.

Описание работы стенда. В лаборатории кафедры технической теплофизики Сумского государственного университета был создан опытный образец понижающего термотрансформатора на рабочем веществе R134a с применением струйной термокомпрессии на базе струйно-термокомпрессорного модуля, принципиальная схема которого представлена на рис. 1.

Экспериментальный стенд представляет собой комплекс, состоящий из сепаратора С, циркуляционного насоса Н, подогревателя жидкости П и жидкостно-парового струйного компрессора ЖПСК, которые объединены в циркуляционный контур и реализуют прямой цикл термотрансформатора. Обратный цикл реализуют сепаратор С, конденсатор КД, дроссельное устройство ДУ, испаритель И, а также ЖПСК.

Установка имеет закрытый контур, в котором циркулирует холодильный агент под давлением. Все соединения термотрансформатора выполнены

при помощи пайки медно-фосфорным припоем либо штуцерным соединением, в местах, где возможна замена элемента либо исследование его для других геометрических или режимных параметров.

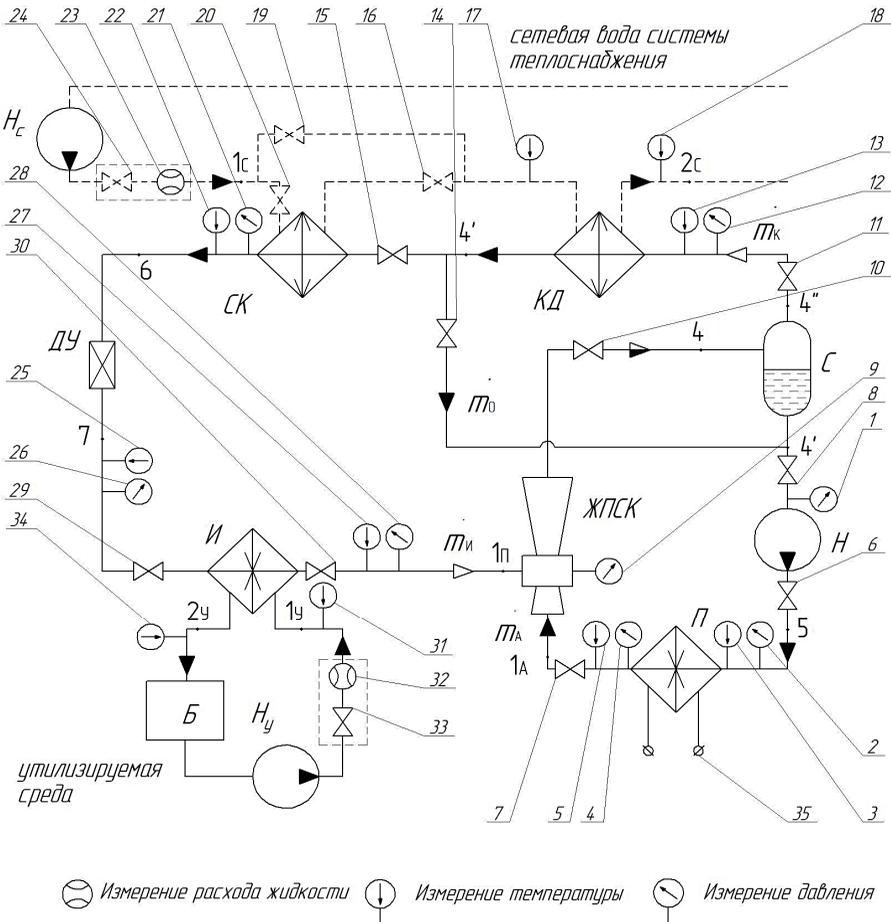


Рис. 1 – Схема экспериментального стенда:
 1, 2, 4, 9, 12, 21, 26, 28 – манометр; 3, 5, 13, 17, 18, 22, 25, 31, 34 – цифровой мультиметр; 6 – 8, 10, 11, 14 – 16, 19, 20, 24, 29, 30, 33 – вентиль; 23, 32 – счетчик расхода; 35 – комплект ТЭНов.

При испытаниях термотрансформатора рабочее вещество предварительно нагревается при помощи блока теплоэлектронагревателей (ТЭНов) 35 до необходимой начальной температуры 55°C в подогревателе П. При этом вентили 6 и 7 находятся в закрытом положении. Давление и температура на входе и выходе в подогреватель контролируются манометрами 2, 4 и термопа-

рами с цифровыми мультиметрами 3, 5 соответственно. После подогрева до необходимой температуры подключается циркуляционный насос Н, который подогретое рабочее вещество в жидком состоянии, распространяет по контуру СТК-модуля (в состав которого входит ЖПСК, С, Н и П). При этом открываются вентили 6, 7, 8, 10, а вентили 11, 14, 30 находятся в закрытом состоянии. После того как в контуре СТК-модуля установится необходимая температура, открываются вентили 11, 14, 30.

В сепараторе, после достижения требуемого давления конденсации p_K , которое там поддерживается на постоянном уровне при температуре насыщения $t_K(p_K)$, часть жидкости отбирается циркуляционным насосом. Насос, повышая давление жидкости до необходимого уровня $p_O > p_K$, подает ее в подогреватель, где происходит перегрев насыщенной жидкости.

Перегретая жидкость с температурой $T_O > T_K$ поступает в активное сопло ЖПСК (рис. 1). Контроль давления на участке С-Н-П-ЖПСК происходит при помощи манометров: 1 – на входе в насос, 2 – на выходе из него и соответственно на входе в подогреватель, 4 – на выходе из П, и, соответственно, этим манометром контролируется давление потока, поступающего в активное сопло ЖПСК, 9 – давление в критическом сечении активного сопла и 12 – давление в сепараторе. Перегрев в подогревателе определяется как разность показаний термопар цифровых мультиметров 3 и 5, установленных на входе и выходе из П.

Пар рабочего вещества из С при открытом вентиле 11 поступает в КД с массовым расходом \dot{m}_K . Далее предусмотрено два варианта схемного решения – с переохлаждением конденсата в субкулере СК и без переохлаждения.

Рассмотрим первый случай, когда в схеме присутствует СК. Как было сказано ранее, пар из С поступает в КД, где конденсируется при постоянной температуре до состояния насыщенной жидкости. За счет перепроизводства пара в ЖПСК часть конденсата с массовым расходом \dot{m}_O необходимо вернуть в сепаратор (через регулирующий вентиль 14) для поддержания постоянства расхода \dot{m}_A в жидкостном циркуляционном контуре. Конденсат после КД поступает в СК (при открытом вентиле 15), где охлаждается до температуры $t_{СК}$. Процесс охлаждения в СК и КД происходит за счет отбора теплоты сетевой водой системы теплоснабжения. Вода из сети отбирается сетевым насосом H_C и подается на СК, а затем по тому же контуру в КД. При этом вентили 16, 20 и 24 открыты, а закрыт 19 вентиль. В контуре сетевой воды системы теплоснабжения контролируются следующие параметры: расход жидкости счетчиком воды 23, температура охлаждающей воды на входе и выходе из КД двумя техническими жидкостными термометрами 17 и 18. На выходе из СК контролируется давление и температура переохлажденного конденсата, манометром 21 и термопарой цифрового мультиметра 22.

Проанализируем второй вариант – без переохлаждения конденсата.

Здесь сетевая вода системы теплоснабжения после насоса поступает сразу в конденсатор, где отбирает теплоту от рабочего вещества. При этом вентили 16 и 20 закрыты, а вентиль 19 открыт.

После СК жидкий холодильный агент поступает в дроссельное устройство. В качестве дроссельного устройства выбран терморегулирующий вентиль. В нем происходит падение давления до уровня кипения холодильного агента в испарителе, и при этом часть жидкости превращается в пар.

Холодильный агент поступает после ДУ в испаритель И пластинчатого типа с массовым расходом $\dot{m}_И$, где отбирает теплоту от утилизируемой среды. Утилизируемая среда из бака Б откачивается циркуляционным насосом $N_У$. Вода подается на вход в испаритель, где отдает свою теплоту рабочему веществу, которое за счет теплообмена начинает кипеть при температуре t_0 , за счет этого образуется пар низкого давления, формирующий пассивный поток для ЖПСК. После испарителя И утилизируемая среда поступает обратно в бак. При этом вентили 29, 30 и 33 открыты. В контуре утилизируемой среды контролируются следующие параметры: расход жидкости счетчиком воды 32, температура воды на входе и выходе из испарителя двумя техническими жидкостными термометрами 31 и 34. На выходе из испарителя контролируется давление и температура уже сформированного пассивного потока ЖПСК, манометром 28 и термопарой цифрового мультиметра 27.

Весь процесс продолжается до того момента времени, пока установка не выйдет на стационарный режим.

Программа исследований. Для решения поставленных задач будут проводиться следующие исследования:

Определение режимных и энергетических характеристик термотрансформатора (схема без субкулера), работающего в теплонасосном режиме, при разной температуре кипения холодильного агента, $t_0 = -5; -3; 0; +3; +5^\circ\text{C}$, учитывая изменения величины перегрева в подогревателе $\Delta t_{\Pi} = 2; 3; 4^\circ\text{C}$.

Определение режимных и энергетических характеристик термотрансформатора (схема с субкулером), работающего в теплонасосном режиме при разной температуре кипения холодильного агента, $t_0 = -5; -3; 0; +3; +5^\circ\text{C}$, учитывая изменения величины перегрева в подогревателе $\Delta t_{\Pi} = 2; 3; 4^\circ\text{C}$.

Математическая модель. В основу термодинамической модели рабочего процесса ЖПСК положены следующие уравнения в одномерном приближении [12]:

– уравнение состояния двухфазной среды, как выражение для удельного объема

$$v = v_{\text{ж}}(t_{\text{ж}}) + x \cdot [v_{\Pi}(t_{\Pi,p}) - v_{\text{ж}}(t_{\text{ж}})], \quad (1)$$

где $v_{\text{ж}}(t_{\text{ж}})$, $v_{\Pi}(t_{\Pi,p})$ – удельный объем жидкости и пара, соответственно, при указанной температуре; x – массовое паросодержание;

– уравнение сохранения массы,

$$d \left[\frac{w(z) \cdot F(z)}{\nu} \right] = 0, \quad (2)$$

где $w(z)$ – линейная скорость по продольной координате z ; $F(z)$ – площадь сечения по продольной координате;

– уравнение фазового перехода, характеризующее степень завершенности фазового перехода,

$$dx = \chi(z) \cdot \frac{\nu}{w(z)} dz, \quad (3)$$

где $\chi(z)$ – коэффициент по продольной координате;

– уравнение сохранения энергии (полной энтальпии),

$$d \left\{ h_{\text{ж}}(t_{\text{ж}}) + x \cdot [h_{\text{п}}(t_{\text{п,п}}) - h_{\text{ж}}(t_{\text{ж}})] + \frac{w^2(z)}{2} \right\} = 0, \quad (4)$$

где $h_{\text{ж}}(t_{\text{ж}})$, $h_{\text{п}}(t_{\text{п,п}})$ – удельная энтальпия жидкости и пара, соответственно, при указанной температуре;

– уравнение сохранения количества движения (механической энергии)

$$d [\dot{m}_1 \cdot w_1(z) - \dot{m}_2 \cdot w_2(z)] = -F(z) \cdot dp - \tau \cdot \Pi(z) \cdot dz, \quad (5)$$

где \dot{m}_1, \dot{m}_2 – массовые расходы в соответствующих точках; τ – касательное напряжение; $\Pi(z)$ – периметр сечения по продольной координате;

– уравнение производства энтропии,

$$d \left\{ s_{\text{ж}}(t_{\text{ж}}) + x \cdot [s_{\text{п}}(t_{\text{п,п}}) - s_{\text{ж}}(t_{\text{ж}})] \right\} > 0, \quad (6)$$

где $s_{\text{ж}}(t_{\text{ж}})$, $s_{\text{п}}(t_{\text{п,п}})$ – удельная энтропия жидкости и пара, соответственно, при указанной температуре.

Результаты моделирования. На основе вышеизложенных уравнений, а также на базе программного продукта для расчета СТК-модуля была разработана методика расчета термотрансформатора с использованием струйной термокомпрессии на рабочих веществах НФС-типа. В процессе численных исследований термотрансформатора были получены зависимости показателей энергоэффективности.

На рис. 2 представлены зависимости коэффициента инжекции и коэффициента перепроизводства пара. Как видно из графиков, коэффициент инжекции, который показывает, сколько килограмм жидкости подсасывается пассивным соплом на 1 кг жидкости, поступающей в испаритель из конденсатора, имеет максимальные значения $u = 0,05 \div 0,059$ на всех уровнях температуры конденсации в интервале температур кипения $t_0 = -15 \div 0^\circ\text{C}$. При этом коэффициент перепроизводства пара, который показывает во сколько раз массовый расход на выходе из активного сопла больше массового расхо-

да по пассивному потоку, составляет $\psi_4 = 1,14 \div 1,26$, что соответствует максимально эффективному режиму работы ЖПСК, а как следствие и термотрансформатора в целом.

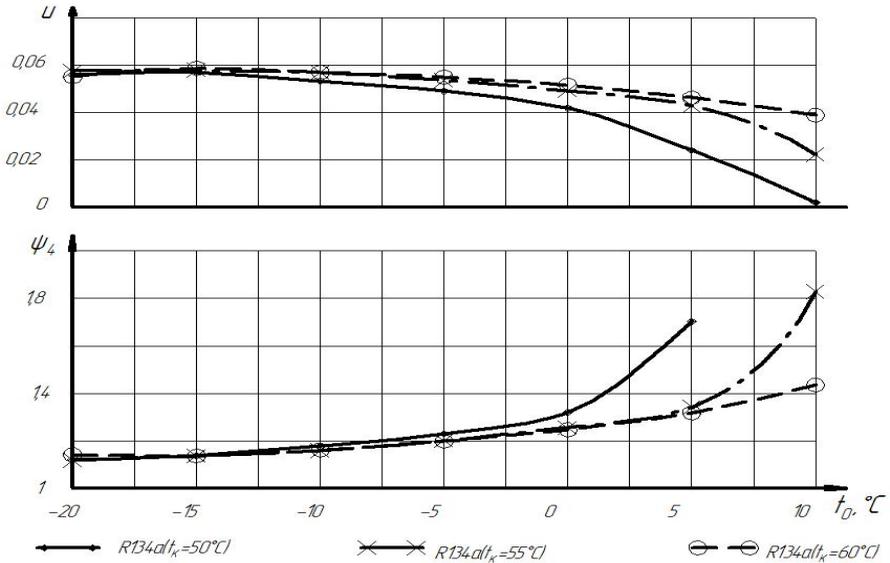


Рис. 2 – Зависимость коэффициента инжекции u и степени перепроизводства пара ψ_4 от температуры кипения холодильного агента t_0 при разных уровнях температуры конденсации t_K и перегреве в подогревателе $\Delta t_{II} = 2^\circ\text{C}$.

При уменьшении перепада температур до уровня $(t_K - t_0) \leq 50^\circ\text{C}$ снижается коэффициент инжекции, а коэффициент перепроизводства пара начинает увеличиваться; как следствие эффективность термотрансформатора понижается.

Выводы. В данной статье приведено описание экспериментального стенда и сформулированы задачи исследования термотрансформатора с использованием струйной термокомпрессии на рабочем веществе R134a. Результаты эксперимента позволят уточнить расчетную модель термотрансформатора на базе СТК-модуля в режиме теплового насоса и холодильной машины.

Максимально эффективный режим работы термотрансформатора со струйной термокомпрессией на рабочем веществе R134a соответствует температурам кипения $t_0 = -15 \div 0^\circ\text{C}$.

Список литературы: 1. Морозюк Т.В. Теория холодильных машин и тепловых насосов – Одесса: Студия «Негоциант», 2006. – 712с. 2. Морозюк Т.В. Водоаммиачные термотрансформаторы (тео-

рия, анализ, синтез, оптимизация): дис. ... докт. техн. наук: 05.14.05 / Татьяна Владиленовна Морозюк. – Одесса, ОНТУ, 2001. – 298 с. 3. Арсеньев В.М., Марченко В.Н., Прокопов М.Г., Проценко М.И. Применение струйной термокомпрессии в понижающих термотрансформаторах // Холодильна техніка і технологія. – 2009. – №5 (121). – С. 51 – 56. 4. Арсеньев В.М., Проценко М.И., Прокопов М.Г. Возможность применения струйно-парового эжектора в составе холодильной машины // Промислова гідравліка і пневматика. – 2011. – №2 (32). – С. 10 – 14. 5. Петренко В.А., Шестопалов К., Воловик А.С., Хуанг Б. Теоретическое и экспериментальное исследование эжекторной холодильной машины, работающей на хладагенте R245fa // Холодильні машини: матеріали 7 Міжнар. наук.-техн. конф., 14 – 16 вер. 2011 р.: тези доп. / ОДАХ. – Одеса: видавн. ОДАХ, 2011. – 221с. 6. Шит М.Л., Балануцэ А.П., Шит Б.М. Промышленная теплонасосная установка на диоксиде углерода с испарителями, работающими на различных температурных уровнях и при переменной нагрузке // Problemele Energeticii Regionale, N2, 2010, p.47 – 58. 7. Шит Б.М. Расчет двухфазного эжектора для теплового насоса на диоксиде углерода // Problemele Energeticii Regionale, 3(14), 2010, p. 62 – 70. 8. Kandil S.M. Analysis and optimization of a jet-pumped combined power/refrigeration cycle: dis. ... doctor of philosophy: 2006 / Sherif M. Kandil; university of Florida. – USA, 2006. 9. Kandil S.M., Analysis of two-phase supersonic flow in jet pumps / S.M. Kandil, W.E. Lear, S.A. Sherif // Proceedings of FEDSM2005 (2005 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting and Exhibition June 19 – 32, 2005 Houston, TX, USA, FEDSM2005-77476. 10. Марченко В.Н., Куценко С.Н., Жиленко Н.А. Экспериментальное исследование процесса формирования рабочей струи пара в термокомпрессоре // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2005. – № 12 (84). – С. 48 – 57. 11. Пат. 28398 Україна, МПК (2006) F25B 1/00. Парова термотрансформатора установка / В.М. Марченко, В.М. Арсеньев, К.О. Зубров. – № u200707799; опубл. 10.12.2007, Бюл. №20. 12. Арсеньев В.М., Ванев С.М., Прокопов М.Г., Проненко М.И., Мерзляков Ю.С. Струйная термотрансформаторная установка для систем теплоснабжения // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія гірничо-електромеханічна. – 2011. – Вип. 22(195). – с. 24 – 31.

Bibliography (transliterated): 1. Morozjuk, T. V. *Teorija holodil'nyh mashin i teplovyh nasosov*. Odessa: Studija «Negociant», 2006. Print. 2. Morozjuk, T. V. *Vodoammichnye termotransformatory (teorija, analiz, sintez, optimizacija)*. Dis. ... d-ra. tehn. Nauk. Odessa: ONTU, 2001. Print. 3. Arsen'ev, V. M., et al. "Primenenie strujnoj termokompressii v ponizhajushhij termotransformatorah." *Holodil'na tehnikija i tehnologija*. No. 5 (121). 2009. 51–56. Print. 4. Arsen'ev, V. M., M. I. Procenko and M. G. Prokopov. "Vozmozhnost' primeneniya strujno-parovogo jezhektora v sostave holodil'noj mashiny." *Promislova gidravlika i pnevmatika*. No. 2 (32). 2011. 10–14. Print. 5. Petrenko, V. A., et al. "Teoreticheskoe i jeksperimental'noe issledovanie jezhektornoj holodil'noj mashiny, rabotajushhej na hladagente R245fa." *Holodil'ni mashini: materialy 7 Mizhnar. nauk.-tehn. konf*. Odesa: Vidavn. ODAH, 2011. Print. 6. Shit, M. L., A. P. Balanucje and B. M. Shit. "Promyshlennaja teplonasosnaja ustanovka na dioksidi ugljeroda s ispariteljami, rabotajushhimi na razlichnyh temperaturnyh urovnjah i pri perezmennoj nagruzke." *Problemele Energeticii Regionale*. No. 2. 2010. 47–58. Print. 7. Shit, B. M. "Raschet dvuhfaznogo jezhektora dlja teplovygo nasosa na dioksidi ugljeroda." *Problemele Energeticii Regionale*. No. 3 (14). 2010. 62–70. Print. 8. Kandil, S. M. *Analysis and optimization of a jet-pumped combined power/refrigeration cycle*. Dis. ... doctor of philosophy. USA: University of Florida, 2006. Print. 9. Kandil, S. M., W. E. Lear and S. A. Sherif. *Analysis of two-phase supersonic flow in jet pumps*. *Proceedings of FEDSM2005*. 2005 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting and Exhibition. USA: Houston, TX, 2005. FEDSM2005-77476. Print. 10. Marchenko, V. H., S. N. Kucenko and H. A. Zhilenko. "Jeksperimental'noe issledovanie processa formirova-nija rabochej strui para v termokompressore." *Visnik Sums'kogo derzhavnogo universitetu. Ser.: Tehnichni nauki*. No. 12 (84). 2005. 48–57. Print. 11. Marchenko, V. M., V. M. Arsen'ev and K. O. Zubrov. *Parova termotransformatora ustanovka*. Ukraina, assignee. Patent 28398, MPK (2006) F25B 1/00. № u200707799. 10 December 2007. 12. Arsen'ev, V. M., et al. "Strujnaja termotransformatornaja ustanovka dlja sistem teplosnabzhenija." *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tehničnogo universitetu. Ser.: Gірничо-електромеханічна*. No. 22 (195). 2011. 24–31. Print.

Надійшла (received) 13.05.2014

А.Н. СЕМКО, д-р. техн. наук, проф., ДонНУ, Донецк;
Н.Н. ВЛАДЫКИНА, аспирант, ДонНУ, Донецк

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ

Работа посвящена моделированию электромагнитных и гидродинамических процессов, протекающих в лабораторной установке с кольцевым и цилиндрическим электродами с жидким оловом. Приводится физическая и математическая постановка задачи, алгоритм и методика численного решения двумерной осесимметричной задачи. Приведены результаты численного моделирования – распределение плотности тока, электромагнитной силы Лоренца, поле скорости движения расплава.

Ключевые слова: моделирование электровихревых течений, жидкий проводник, движение расплава, метод конечных элементов.

Введение. Среди разнообразных магнитогидродинамических эффектов особый интерес представляют, так называемые, *электровихревые течения* (ЭВТ) [1], которые возникают в результате взаимодействия неоднородного электрического тока плотностью \vec{j} с собственным магнитным полем \vec{B} .

Причиной возникновения ЭВТ является *сила Лоренца* $\vec{f}_e = [\vec{j}, \vec{B}]$, которая действует на жидкий проводник с током в магнитном поле. Отличительной особенностью ЭВТ является то, что они возбуждаются собственным магнитным полем, которое создается при протекании тока по жидкому проводнику.

Этот эффект наблюдается в целом ряде промышленных устройств: электродуговая сварка, электрометаллургический переплав (включая вакуумно-дуговые печи, электролизеры и индукционные канальные печи), выращивание кристаллов полупроводников, электрореактивные двигатели и т. д. [1]. Особое внимание при этом заслуживают электрические дуговые печи постоянного тока с подовым электродом, получившие в последнее время широкое распространение в металлургии. При работе этих печей возникают интенсивные ЭВТ, которые приводят к повышенному износу футеровки вблизи подового электрода.

В работах [2 – 4] исследовано ЭВТ расплава в осесимметричной электрометаллургической печи постоянного тока с подовым электродом. Получено поле объемных электромагнитных сил Лоренца, ротора этих сил, а также гидродинамическая картина движения расплава. Практическое применение результатов работы позволит оптимизировать работу печи и сократить расходы на выплавку металла.

В работе [5] экспериментально исследовано ЭВТ в полусферическом объеме. Лабораторная установка представляла собой медную полусферическую оболочку, заполненную расплавом металла, которая являлась одним