

УДК 629.463.125

Д.К. Кулешов, И.Н. КрасновскийДонецкий национальный университет экономики и торговли им. М. Туган-Барановского
ул. Щорса, 31, г. Донецк, 83050**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДОМАШНЕГО ХОЛОДИЛЬНИКА, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО НАНОФЛЮИД R600A/TiO₂**

Рассмотрено практическое применение добавок наночастиц диоксида титана в домашнем холодильнике НОРД, работающем на изобутане. Проведены экспериментальные исследования энергопотребления холодильной машины на рабочем стенде с использованием компрессора ОК V 10-3-К. Показано, что добавка наночастиц TiO₂ снижает энергопотребление серийного холодильника-морозильника ДХ-271 010 D 256/255/465 N/ST2,0 A⁺ на 4,7% при концентрации наночастиц до 0.05%.

Ключевые слова: Энергопотребление – Нанохладагенты – Изобутан – Наночастицы TiO₂ – Домашний холодильник-морозильник

Д.К. Кулешов, І.Н. КрасновськийДонецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського,
вул. Щорса, 31, м. Донецьк, 83050**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДОМАШНЬОГО ХОЛОДИЛЬНИКА, ЯКИЙ ВИКОРИСТОВУЄ НАНОФЛЮИД R600A/TiO₂**

Розглянуто практичне застосування добавок наночастинок діоксиду титану в домашньому холодильнику НОРД, який працює на ізобутані. Проведено експериментальні дослідження енергоспоживання холодильної машини на робочому стенді з використанням компресора ОК V 10-3-К. Показано, що добавка наночастинок TiO₂ знижує енергоспоживання серийного холодильника-морозильника ДХ-271010 D 256/255/465 N/ST2,0 A⁺ на 4,7% при концентрації наночастинок до 0.05%.

Ключові слова: Енергоспоживання – Нанохладагенти – Ізобутан – Наночастки TiO₂ – Домашній холодильник-морозильник

DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/0453-8307.5/2014.28690>

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

I. ВВЕДЕНИЕ

Большой интерес к изучению поведения наночастиц во многом объясняется широким диапазоном приложений: от производства и конверсии энергии, транспорта нефти, холодильной техники и кондиционирования воздуха до электроники, текстильной промышленности и производства бумаги. Первая попытка использовать твердые частицы с высокой теплопроводностью для снижения термического сопротивления жидкостей с малым коэффициентом теплопроводности принадлежит еще Максвеллу. Практическая реализация этой идеи в инженерной практике показала, что взаимодействие микрочастиц с поверхностью теплообменной аппаратуры приводит к ее разрушению. Развитие современных технологий фабрикации наночастиц размером менее 50 нм позволяет обойти проблему разрушения поверхности и загрязнения узких каналов при течении теплоносителей. В ряде работ, опубликованных в литературе на протяжении последнего десятилетия, явление

аномального роста коэффициента теплопроводности в наночастицах было продемонстрировано для широкого спектра наночастиц (углеродные нанотрубки, Al₂O₃, Cu, TiO₂ и др.) в различных теплоносителях. Несмотря на то, что в литературе предложены разнообразные физические механизмы и модели, которые объясняют повышение коэффициента теплопроводности, сейчас отсутствует единая точка зрения на процессы переноса теплоты в наночастицах, когда сохраняются линейные соотношения для коэффициентов переноса, в опытах зафиксировано 40% повышение коэффициента теплопроводности. Как показали расчеты, увеличение коэффициента теплопроводности хладагента на 20% за счет добавок наночастиц ведет к увеличению холодильного коэффициента почти на 10%. Это обстоятельство вызывает большой научный интерес к поиску оптимальных композиций наночастиц в хладагентах IV поколения, сочетающих высокую энергетическую эффективность с низким потенциалом глобального потепления

В статье обсуждаются принципиальные возможности применения нанофлюидов для улучшения эксплуатационных характеристик серийного домашнего холодильника НОРД.

II. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Термин нанофлюид был впервые введен Choi [1], который обнаружил аномальное возрастание теплопроводности в жидкостях с добавками наночастиц. Последние годы наблюдается экспоненциальный рост работ, в которых рассматриваются различные аспекты синтеза, стабильности, измерений теплопроводности, вязкости, процессов конвективного теплообмена и кипения. Коммерческое применение нанофлюидов находится на этапе разработок. Наибольшие ожидания связаны с разработкой систем охлаждения в различных областях.

Исследованиям вязкости и теплопроводности нанофлюидов посвящена обзорная работа [2]. В статье [3] дан подробный анализ широкого круга существующих и перспективных будущих приложений нанофлюидов, в особенности, в системах охлаждения. Сопоставление различных рабочих жидкостей и теплоносителей с добавками наночастиц с точки зрения увеличения коэффициентов теплопроводности и теплопередачи приведено в обзоре [4]. Возможные направления создания нанофлюидов с оптимальной вязкостью [5] и ультравысокой теплопроводностью [6] являются предметом интенсивных исследований многих исследовательских групп. Реальные приложения наночастиц в холодильных системах должны учитывать наличие смазочных масел в циркуляционном контуре, что искажает картину термодинамического и фазового поведения нанохладагентов. Анализ влияния наночастиц на характеристики реальных холодильных систем проведен группой проф. Saidur [7].

В работах Vi с соавторами [8,9] исследовано влияние наночастиц в основных хладагентах, которые применяются в домашних холодильниках. Авторы привели оптимистичную оценку уменьшения энергопотребления на 21,2%. Iwo с сотр. [10] проанализировали замену хладагента R-134a и полиэфирного масла на природный углеводородный хладагент с минеральным маслом. Они показали, что добавка наночастиц Al_2O_3 ведет к улучшению характеристик теплопередачи и смазки. Peng с сотр. [11] провели сопоставление характеристик теплопередачи для хладагента R113 с маслом VG68 в присутствии алмазных наночастиц и получили улучшенные характеристики теплопередачи для нанохладагента Henderson и др. [12] исследовали теплопередачу в горизонтальной трубе для системы R134a – синтетическое масло. Авторы показали, что добавка наночастиц CuO увеличивает коэффициент теплопередачи более чем на 100% по сравнению с основной парой масло – хладагент. В работе [13] исследовали добавку в виде наночастиц двуокиси титана для домашнего

холодильника, работающего на R600a. При этом потребление электроэнергии сократилось на 9,6% по сравнению с базовой моделью.

В большинстве публикаций отмечается позитивное влияние наночастиц на теплофизические свойства теплоносителей, рабочих тел и интенсивность теплообмена в аппаратах холодильного оборудования. Однако большинство опубликованных по рассматриваемой тематике исследований носят фрагментарный характер и посвящены отдельным аспектам изучения свойств нанофлюидов, теплообмена и их возможного применения в практике холодильного машиностроения. Трудности формирования состава нанохладагентов приводят к тому, что результаты различных авторов не согласуются между собой. Эти обстоятельства тормозят процесс внедрения нанотехнологий в холодильном машиностроении и делают актуальными исследования по выбору нанохладагентов, снижающих энергопотребление холодильных машин.

Цель данной работы заключается в экспериментальной проверке влияния наночастиц диоксида титана на повышение энергетической эффективности домашнего холодильника, использующего в качестве природного хладагента – изобутан (R600a).

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- провести лабораторные испытания энергетических и эксплуатационных характеристик серийного домашнего холодильника-морозильника, работающего на изобутане (R600a) с добавкой наночастиц TiO_2 ;
- оценить перспективность добавок наночастиц диоксида титана на энергосбережение холодильных систем, работающих на изобутане.

III. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

Хладагент R600a/ TiO_2 был подготовлен на основе техники приготовления устойчивых наножидкостей, рекомендованных в литературе. Наночастицы были смешаны с хладагентом, а затем смесь выдерживали в ультразвуковом генераторе, чтобы добиться полного растворения наночастиц в изобутане. Заявленная чистота R600a, используемого в испытаниях, была не ниже 99,5%. Наночастицы TiO_2 были со средним диаметром частиц около 50 нм и массовой чистотой около 99,5%. Массы наночастиц были измерены на весах AND GR-300 с погрешностью, не превышающей 5·10⁻⁷ кг. Оптимальной стабильностью обладали смеси R600a/ TiO_2 с концентрацией наночастиц TiO_2 ниже 0,05%. Эта концентрация была использована для сопоставления со стандартным образцом холодильника-морозильника на изобутане.

Качество холодильной установки оценивали по энергопотреблению. Испытания нанохладагента R600a/ TiO_2 проводили в исследовательском испытательном Центре Украинского научно-исследовательского проектно-конструкторского института бытового машиностроения на серийно

выпускаемом образце домашнего холодильника – морозильника ДХ-271 010 D 256/255/465 N/ST2,0 A⁺ с компрессором ОК V 10-3-K. В качестве смазочных масел рассматривали два варианта: 1) масло ХМН 9 (АЗМОЛ) без добавок наночастиц; 2) масло ХМН 9 (АЗМОЛ) с добавками 0,01% и 0,05% наночастиц оксида титана.

Общие требования проведения испытаний соответствовали стандарту ISO 1502/2009. Температура окружающей среды для холодильников классов SN, N, ST и T при проведении испытаний по энергопотреблению поддерживали на уровне $298 \pm 0,5$ К. Холодильник был установлен на платформе при постоянной комнатной температуре. Комнатная температура контролировалась двумя независимыми нагревателями и системой вентиляции. Скорость потока воздуха в испытательной камере была не более 0,25 м/с. Потребляемую мощность бытового холодильника измеряли с помощью цифрового ваттметра с точностью 1,5 %.

Для домашнего холодильника проводили эксперименты по измерениям потребленной электрической энергии и мощности замораживания. Потребление энергии бытового холодильника измеряли после того, как он непрерывно проработал не менее суток и вышел на рабочий режим. При этом температура в холодильном отделении должна быть не выше +5 °С, а температура морозильного отделения – не выше -18°С. Производительность замораживания – это время изменения температуры охлаждаемого объекта с 25 ± 1 °С до -18 °С при заданных условиях испытаний.

Изначально эксперимент проводили на домашнем холодильнике на чистом изобутане. Эти измерения были взяты за основу. Затем эксперимент проводили с наночастицами TiO₂ в устойчивых концентрациях (0,01 и 0,05 %) и полученные данные сравнивали с данными, полученными на чистом изобутане. Количество хладагента, заправленного в систему, измеряли весовым методом с точностью ± 1 г.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Результаты испытаний продемонстрировали положительный эффект от применения наночастиц TiO₂ в бытовом холодильнике. Было зафиксировано снижение температуры испарения, что, в свою очередь приводит к снижению температур в камере хранения (рис.1) и замораживания продуктов (рис.2).

Снижение температуры было зафиксировано уже при концентрации наночастиц 0,01%, что связано с увеличением коэффициента теплопередачи со стороны хладагента в испарителе. На рисунке 3 представлено изменение мощности замораживания бытового холодильника. Очевидно, что скорость замораживания системы с нано-хладагентом выше, чем при использовании в качестве рабочего тела чистого изобутана, поскольку, вероятно, смесь R600a-TiO₂ имеет выше коэффициент теплоотдачи, по сравнению с чистым рабочим веществом, а

также улучшенные характеристики трения холодильного масла.

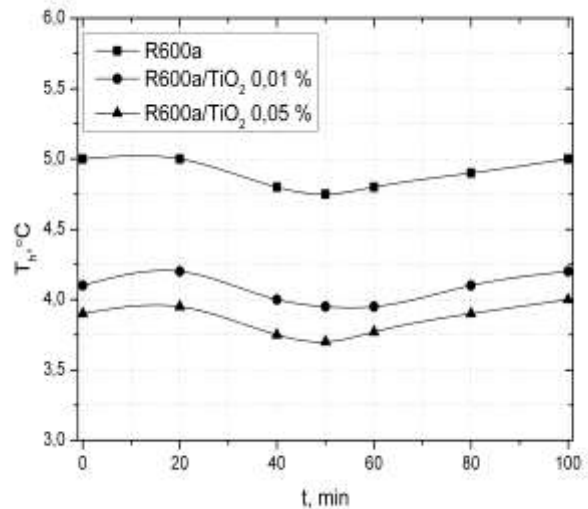


Рисунок 1 – Зависимость температуры в холодильной камере от времени работы холодильника

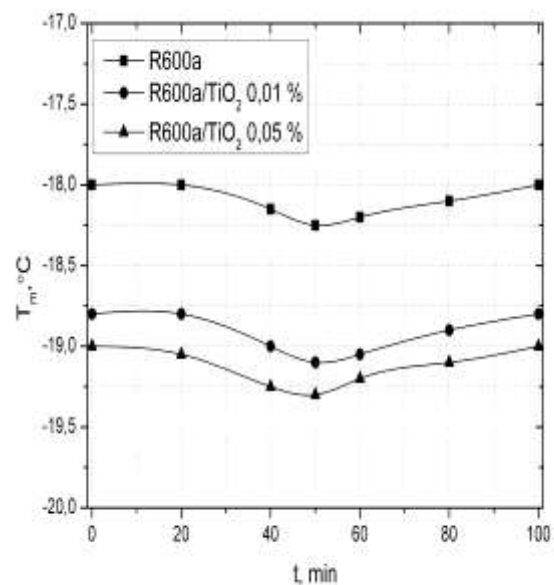


Рисунок 2 – Изменение температуры в морозильной камере в зависимости от времени работы холодильника

Было проанализировано влияние использования нанофлюида R600a/TiO₂ на потребляемую мощность холодильника (табл. 1). Эксперименты по определению потребляемой мощности проводили не менее 3-х раз при одних и тех же условиях с целью повышения точности полученных данных и исключения случайных погрешностей. Из таблицы 1 следует, что энергопотребление при применении смеси R600a/TiO₂ ниже, чем при использовании чистого изобутана.

Таблиця 1 – Экспериментальные данные, полученные при измерении потребляемой мощности домашнего холодильника-морозильника

Концентрация наночастиц, (%)	Потребляемая мощность, (кВт*ч/день)	Время работы компрессора, %	Экономия энергии, %
0	0,744	48,87	0
0,01	0,713	46,32	4,2
0,05	0,709	45,59	4,7

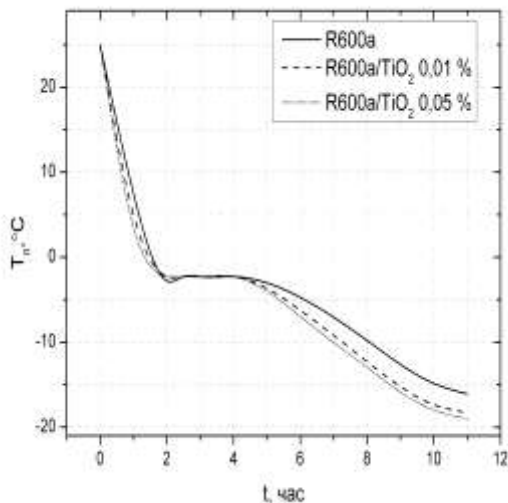


Рисунок 3 – Мощность замораживания при работе домашнего холодильника на чистом изобутане и с добавлением наночастиц TiO_2 .

Энергопотребление смеси R600a-TiO₂ при концентрации наночастиц 0,05 % составило 0,709 кВт*ч/день, что в свою очередь было ниже на 4,7% от номинального значения энергопотребления для чистого R600a. Также замечено снижение времени работы компрессора на 3,28% от номинального, при концентрации TiO₂ 0,05 %.

V. ВЫВОДЫ

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что использование нанохладагента R600a/TiO₂ приводит к повышению эффективности холодильных систем. Энергопотребление холодильника-морозильника ДХ-271 010 D 256/255/465 N/ST2,0 A+ с компрессором ОК V 10-3-К. составило 0,744 кВт ч/сутки, что отвечает индексу энергоэффективности EEI=41,84. По сравнению с системой, использующей чистый R600a в качестве рабочего тела, применение изобутана с добавлением наночастиц TiO₂ с концентрациями 0,01 и 0,05% приводит к понижению температур в холодильной и морозильной камерах, увеличению мощности замораживания, снижению энергопотребления на 5,2% (при концентрации R600a/TiO₂ 0,05%), а также к снижению суточного времени работы компрессора на 3,28% по сравнению с чистым R600a. Кроме того, добавление наночастиц приводит к улучшению цирку-

ляции масла в холодильной машине и, вероятнее всего, снижает трение в компрессоре.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Choi, U.S.** Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles [Text] / U. S. Choi // Dev. and App. of Non-Newtonian Flows – 1995. – Vol. 231. – P. 99-105.
2. **Murshed, S.M.S.** Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids [Text] / S.M.S. Murshed, K.C. Leong, C. Yang, // International Journal of Thermal Sciences. – 2008. – Vol. 47. – P. 560 – 568. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2007.05.004
3. **Saidur, R.**, A review on applications and challenges of nanofluids [Text] / R. Saidur, K.Y. Leong, H.A. Mohammad // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – Vol. 15. – P. 1646 – 1668. DOI:10.1016/j.rser.2010.11.035
4. **Yu.** Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements [Text] / Yu, Wenhua, France, M. David, Routbort, L. Jules and Choi, U. S. Stephen // Heat Transfer Engineering. – 2008. – Vol. 28, №3. – P. 432 – 460. DOI: 10.1080/01457630701850851
5. **Mahbubul, I. M.** Latest developments on the viscosity of nanofluids [Text] / I.M. Mahbubul, R. Saidur, M.A. Amalina // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – Vol. 55. – P. 874 – 885. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.10.021
6. **Wang, L.Q.** Toward nanofluids of ultra-high thermal conductivity [Text] / L.Q. Wang and Fan // Nanoscale Research Letters. – 2011. – Vol. 6. – P. 153. DOI:10.1186/1556-276X-6-153
7. **Saidur, R.** A review on the performance of nanoparticles suspended with refrigerants and lubricating oils in refrigeration systems [Text] / R. Saidur, S.N. Kazi, M.S. Hossain, M.M. Rahman, H.A. Mohammed // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – Vol. 15 – P. 310 – 323. DOI:10.1016/j.rser.2010.08.018
8. **Bi, S.** Application of nanoparticles in domestic refrigerators [Text] / S. Bi, L. Shi and L. Zhang // Appl. Therm. Eng. – 2008. – Vol. 28. – P. 1834-1843.
9. **Bi, S.** Performance study of a domestic refrigerator using R134a/mineral oil/nano-TiO₂ as working fluid [Text] / S. Bi, L. Shi and L. Zhang // Appl. Therm. Eng. – 2007. – ICR07-B2-346.
10. **Jwo.** Effect of nano lubricant on the performance of Hydrocarbon refrigerant system [Text] / Jwo et.al. // J. Vac. Sci. Techno. B – 2009. – Vol. 27, – № 3. – P. 1473-1477.
11. **Peng, H.** Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of refrigerant/oil mixture with diamond nano particles [Text] / H. Peng et.al. // Int. Jour. of Refrig. – 2010. – Vol. 33. – P. 347-358.
12. **Henderson.** Experimental analysis on the flow boiling heat transfer of R134a based nanofluids in a horizontal tube [Text] / Henderson et al. // IJHMT – 2010. – Vol. 53. – P. 944-951
13. **Shengshan, B.** Performance of a Domestic Refrigerator using TiO₂-R600a nano-refrigerant as working fluid [Text] / B. Shengshan // Int J of En. Cons. and Manag. – 2011. – Vol. 52. – P. 733-737.

D.K. Kuleshov, I.N. Krasnovskiy

Donetsk National University of Economy and Trade named after M. Tugan-Baranovsky,
31 Shchorsa str., Donetsk, 83050, Ukraine

EXPERIMENTAL STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF DOMESTIC REFRIGERATOR USING NANOFLYUID R600A/TiO₂

Practical application of TiO₂ nanoparticles doping for domestic refrigerator working with isobutene is considered. Experimental studies of energy consumption This work has demonstrated that nanoparticles can improve the performance of the refrigerator. The energy consumption test was conducted to compare the performance of the refrigerator with nano-refrigerant and pure refrigerant so as to provide the basic data for the application of the nanoparticles in the refrigeration system. It was demonstrated the nanoparticle doping reduces energy consumption of refrigerator ДХ-271 010 D 256/255/465 N/ST2,0 A⁺ about 4,7% at 0,05% nanoparticle concentration.

Keywords: Energy consumption – Nanorefrigerants – Isobutene – TiO₂ nanoparticles – Domestic refrigerator

REFERENCES

1. **Choi, U.S.** Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles [Text] / U. S. Choi // Dev. and App. of Non-Newtonian Flows – 1995. – Vol. 231. – P. 99-105.
2. **Murshed, S.M.S.** Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids [Text] / S.M.S. Murshed, K.C. Leong, C. Yang, // International Journal of Thermal Sciences. – 2008. – Vol. 47. – P. 560 – 568. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2007.05.004
3. **Saidur, R.** A review on applications and challenges of nanofluids [Text] / R. Saidur, K.Y. Leong, H.A. Mohammad // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – Vol. 15. – P. 1646 – 1668. DOI:10.1016/j.rser.2010.11.035
4. Yu. Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements [Text] / Yu, Wenhua, France, M. David, Routbort, L. Jules and Choi, U. S. Stephen // Heat Transfer Engineering. – 2008. – Vol. 28, №3. – P. 432 – 460. DOI: 10.1080/01457630701850851
5. **Mahbubul, I. M.** Latest developments on the viscosity of nanofluids [Text] / I.M. Mahbubul, R. Saidur, M.A. Amalina // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – Vol. 55. – P. 874 – 885. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.10.021
6. **Wang, L.Q.** Toward nanofluids of ultra-high thermal conductivity [Text] / L.Q. Wang and Fan // Nanoscale Research Letters. – 2011. – Vol. 6. – P. 153. DOI:10.1186/1556-276X-6-153
7. **Saidur, R.** A review on the performance of nanoparticles suspended with refrigerants and lubricating oils in refrigeration systems [Text] / R. Saidur, S.N. Kazi, M.S. Hossain, M.M. Rahman, H.A. Mohammed // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – Vol. 15 – P. 310 – 323. DOI:10.1016/j.rser.2010.08.018
8. **Bi, S.** Application of nanoparticles in domestic refrigerators [Text] / S. Bi, L. Shi and L. Zhang // Appl. Therm. Eng. – 2008. – Vol. 28. – P. 1834-1843.
9. **Bi, S.** Performance study of a domestic refrigerator using R134a/mineral oil/nano-TiO₂ as working fluid [Text] / S. Bi, L. Shi and L. Zhang // Appl. Therm. Eng. – 2007. – ICR07-B2-346.
10. **Jwo.** Effect of nano lubricant on the performance of Hydrocarbon refrigerant system [Text] / Jwo et.al. // J. Vac. Sci. Techno. B – 2009. – Vol. 27, – № 3. – P. 1473-1477.
11. **Peng, H.** Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of refrigerant/oil mixture with diamond nano particles [Text] / H. Peng et.al. // Int. Jour. of Refrig. – 2010. – Vol. 33. – P. 347-358.
12. **Henderson.** Experimental analysis on the flow boiling heat transfer of R134a based nanofluids in a horizontal tube [Text] / Henderson et al. // IJHMT – 2010. – Vol. 53. – P. 944-951
13. **Shengshan, B.** Performance of a Domestic Refrigerator using TiO₂-R600a nano-refrigerant as working fluid [Text] / B. Shengshan // Int J of En. Cons. and Manag. – 2011. – Vol. 52. – P. 733-737.

Отримана в редакції 19.09.2014, прийнята до друку 23.08.2014