

Проведена оцінка інтенсивності процесів теплообміну при кипінні на капілярно-пористих структурах із різною довжиною волокон в умовах обмеженого об'єму. Визначено вплив висоти обмежувача об'єму над робочою поверхнею на інтенсивність кипіння на капілярно-пористих структурах. Проведено співставлення інтенсивності кипіння на капілярно-пористих структурах в умовах обмеженості робочого об'єму з інтенсивністю кипіння у великому об'ємі

Ключові слова: інтенсифікація тепловіддачі, довжина волокон, кипіння, капілярно-пориста структура, обмежений об'єм

Проведена оценка интенсивности процессов теплообмена при кипении на капиллярно-пористых структурах с разной длиной волокон в условиях ограниченного объема. Определено влияние высоты ограничителя объема над рабочей поверхностью на интенсивность кипения на капиллярно-пористых структурах. Проведено сопоставление интенсивности кипения на капиллярно-пористых структурах в условиях ограниченности рабочего объема с интенсивностью кипения в большом объеме

Ключевые слова: интенсификация теплоотдачи, длина волокон, кипение, капиллярно-пористая структура, ограниченный объем

УДК 536.24

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.39205

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ КАПИЛЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ В ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ

А. А. Баскова*

E-mail: sanj92@mail.ru

В. Ю. Кравец

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: kravetz_kpi@ukr.net

О. С. Алексеик

Ассистент*

E-mail: Helga-Gor@mail.ru

Н. Л. Лебедь

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: nata.lebeddom@gmail.com

*Кафедра атомных электростанций и инженерной теплофизики

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

1. Введение

В связи с широким распространением в различных устройствах электронной техники тепловых труб, как теплоотводящих элементов, и капиллярно-пористых структур (КПС) в качестве их наполнителей, вопрос оптимизации геометрических характеристик этих структур становится наиболее актуальным. Свойство КПС отводить от теплоотдающей поверхности большие тепловые потоки описываются несколькими моделями кипения. Однако наложение условий ограниченности объема рабочей жидкости на процесс кипения может негативно повлиять на значения критических тепловых потоков. Применение капиллярно-пористого покрытия позволит увеличить критическую тепловую нагрузку при отведении тепловых потоков. Организация теплоотвода в стесненных условиях у нагреваемой поверхности позволяет не только отводить большие тепловые потоки, но и улучшить массогабаритные показатели и эксплуатационные характеристики устройств.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

На сегодняшний день проведен ряд исследований процесса кипения в ограниченном объеме и на капиллярно-пористых структурах. Были предложены различные модели процесса кипения в ограниченном объеме. Процесс теплоотдачи от греющей поверхности к паровому пузырьку описан в [1]. Согласно представлениям авторов [2] наиболее интенсивны процессы теплообмена в микрообласти у основания парового пузыря, а теплоотдача существенно зависит от радиуса парового включения. Физическая модель и математическое описание процесса кипения в щелевом канале предложены авторами [3]. Экспериментальное исследование процессов кипения в стесненных условиях для хладонов в качестве теплоносителя представлены в работах [4, 5], а для воды – в [6, 7] и свидетельствуют о существенной интенсификации процессов кипения при ограничении рабочего объема (до десяти раз). Физическая модель кипения на капиллярно-пористой структуре представлена в [8–10]. Математическое описание процесса пред-

ложили [3, 11]. Исследование влияние диаметра волокон и их длины в капиллярно-пористой структуре проводилось авторами [12, 13]. Полученные данные свидетельствуют, что увеличение диаметра волокон приводит к снижению интенсивности теплоотдачи, а вот длина волокон не оказывает существенного влияния на процессы теплообмена при кипении в большом объеме. Влияния давления на интенсивность теплоотдачи при кипении на КПС представлено у авторов [13–15].

Таким образом, большинство исследований проводилось либо при кипении на КПС в условиях большого объема, либо при кипении в стесненных условиях, но на гладких поверхностях. Кипение в условиях ограниченного объема на капиллярно-пористых структурах является мало исследованным, как и влияние длины волокон капиллярно-пористой структуры на интенсивность теплоотдачи.

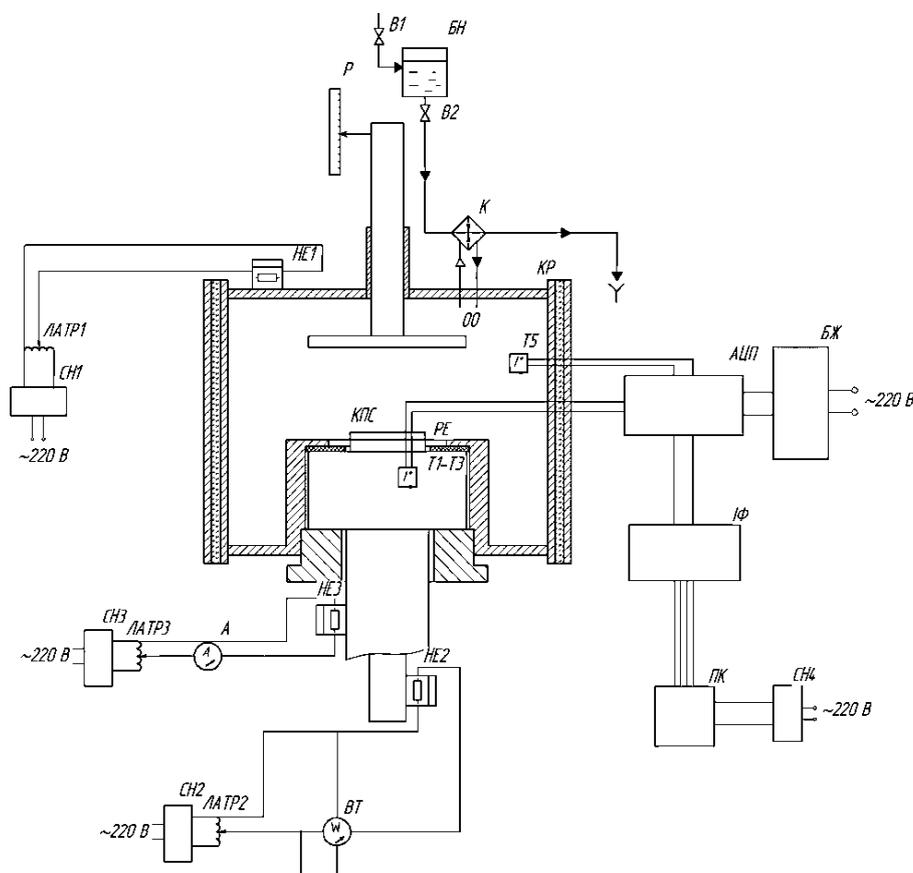


Рис. 1. Схема установки принципиальная: БН – бак напорный, К – конденсатор, КР – камера рабочая, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, БП – блок питания, ПК – компьютер, СН – стабилизатор напряжения, ИФ – интерфейс, ОО – ограничитель объема, Т – термопары, РЕ – рабочий элемент, НЕ – нагреватель электрический, ВТ – ваттметр, А – амперметр, ЛАТР – лабораторный автотрансформатор

3. Цели и задачи исследования

Целью работы является изучение влияния длины волокон капиллярно-пористой структуры на интенсивность теплоотдачи при кипении в стесненных условиях.

Для достижения этой цели необходимо было:

- изучить влияние условий стесненности на процесс кипения на КПС при фиксированном значении длины волокна;
- определить влияние длины волокна на интенсивность процесса кипения в ограниченном объеме.

4. Описание экспериментальной установки и рабочего элемента

Для проведения исследований была создана экспериментальная установка, представленная на рис. 1.

Основным её элементом является рабочая камера КР, заполненная рабочей жидкостью. На внешней поверхности камеры располагается нагреватель камеры НЕ1. Через дно камеры внутрь вводится рабочий элемент РЕ, состоящий из полый медной трубки с заглушкой, к которой крепится капиллярно-пористая структура.

Также внутри медной трубки рабочего элемента находится нагреватель и блок термопар Т1-Т3. Условия стесненности регулируются ограничителем объема ОО.

Более детально устройство рабочего элемента представлено в [16].

В работе были исследованы КПС толщиной 1 мм с пористостью 80 %, диаметром волокон 50 мкм и длиной волокон 3, 5, 7 мм для трех различных образцов соответственно.

Контроль температур рабочей жидкости и нагреваемой поверхности проводился термопарами, подключенными через аналого-цифровой преобразователь АЦП и интерфейс ИФ к компьютеру ПК (рис. 1).

5. Методика проведения исследований интенсивности теплоотдачи при кипении на капиллярно-пористой структуре

Перед началом работы проводилась предварительная дегазация камеры и КПС с целью устранения растворенных газов из рабочей жидкости и внутренних поверхностей камеры и КПС. После процесса дегазации нагреватель камеры отключался, и рабочая жидкость остывала. Расчетный объем создавался с помощью ограничителя объема в диапазоне от 2 мм до 40 мм. После этого включался внешний нагреватель камеры, и рабочая жидкость нагревалась до температуры насыщения.

Внешний нагреватель переводился в режим охранного для поддержания постоянной температуры насыщения. Затем подключался электрический нагреватель HE2 и на рабочий элемент подавалась фиксированная мощность. Замер показаний термопар проводился после достижения стационарного температурного режима.

6. Результаты исследований по определению влияния геометрических характеристик капиллярно-пористой структуры на интенсивность теплоотдачи при кипении в ограниченном объеме

В ходе обработки экспериментальных данных были получены зависимости коэффициентов теплоотдачи от плотности теплового потока при разных высотах водяного столба жидкости над рабочей поверхностью, которые представлены на рис. 2. Анализ экспериментальных данных показал, что наибольшая интенсивность процессов теплоотдачи наблюдается при кипении в большом объеме (рис. 2, а), когда паровая фаза свободно покидает капиллярно-пористую структуру. При этом наибольшие значения коэффициента теплоотдачи α наблюдаются при кипении на КПС с длиной волокна 3 мм. Увеличение длины волокон КПС приводило к снижению теплоотдачи (рис. 2, б, в). Так при плотности отводимого теплового потока $q = 3 \cdot 10^5$ Вт/м² для КПС с длиной волокна 3 мм $\alpha = 6 \cdot 10^4$ Вт/(м²К), для длины волокна 5 мм – $\alpha = 5 \cdot 10^4$ Вт/(м²К), а для 7 мм – $\alpha = 3,2 \cdot 10^4$ Вт/(м²К).

Экспериментально полученные зависимости при исследовании интенсивности теплоотдачи от высоты жидкостного объема над рабочей поверхностью представлены на рис. 3

В результате проведенных экспериментов обнаружен неоднозначный характер зависимости коэффициента теплоотдачи от высоты ограничителя объема над рабочей поверхностью. При небольших значениях плотности теплового потока, когда на поверхности КПС возникают отдельные паровые пузыри, влияние стесненности незначительно (рис. 3, $q = 100$ кВт/м²). Увеличение плотности теплового потока приводит к возникновению дополнительных центров парообразования и интенсификации теплоотдачи. В этом случае изменение расстояния между поверхностью КПС и ограничителем при постоянных значениях плотности теплового потока приводит к следующим изменениям коэффициента теплоотдачи: от 16 мм до 10 мм интенсивность теплоотдачи остается приблизительно постоянной с тенденцией на снижение, от 10 мм до 5 мм наблюдается её увеличение, а при уменьшении от 5 мм до 2 мм значения коэффициентов теплоотдачи снижаются.

Повышение интенсивности теплоотдачи при уменьшении высоты ограничителя обусловлено появлением дополнительных центров парообразования, увеличением частоты отрыва паровых пузырьков и их относительно свободной эвакуацией из капиллярно-пористой структуры, что приводит к уменьшению температуры рабочей поверхности.

Снижение интенсивности теплоотдачи при дальнейшем уменьшении высоты ограничителя объема над КПС можно пояснить следующим образом. Отрывные диаметры паровых пузырьков сопоставимы с расстояниями от ограничителя до поверхности, что приводит к возрастанию скорости движения паровой

фазы между ограничителем и КПС и, соответственно, к увеличению гидравлического сопротивления.

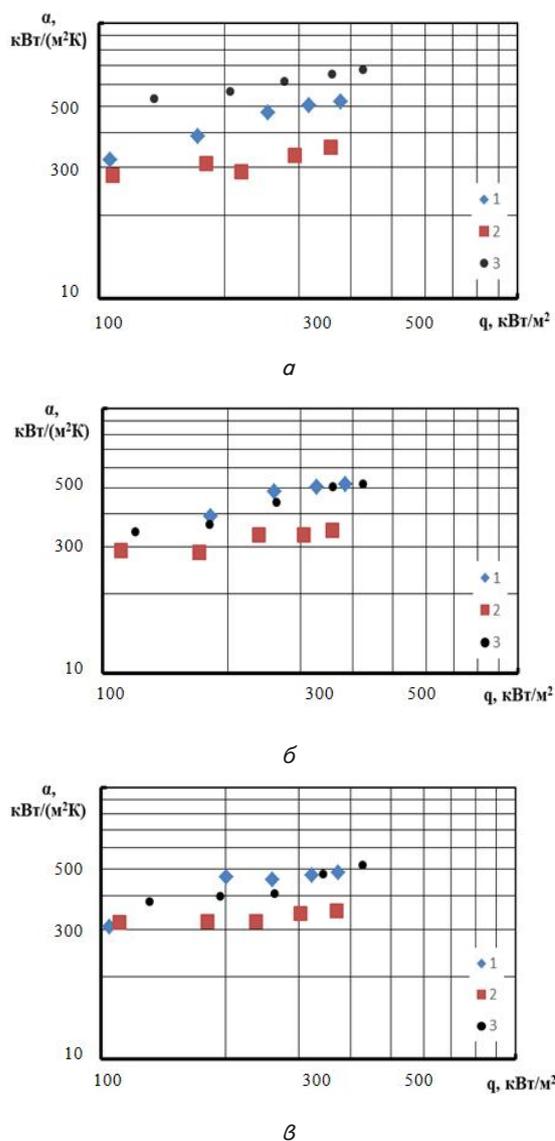


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока для различных длин волокон КПС и высоты ограничителя объема над рабочей поверхностью: а – кипение в большом объеме, б – высота ограничителя объема над рабочей поверхностью 5 мм, в – 2 мм; 1 – длина волокна КПС 5 мм, 2 – 7 мм, 3 – 3 мм

Данное предположение подтверждается визуальными наблюдениями: при снижении высоты ограничителя объема над рабочей поверхностью по мере повышения теплового потока отдельные паровые пузыри сливаются в паровые столбы и при высотах ограничителя объема над рабочей поверхностью в 2 и 5 мм данные паровые столбы сливаются в единую паровую полость, оттесняющую рабочую жидкость от поверхности. Вследствие этого температура рабочей поверхности возрастает и значения коэффициента α снижаются. Кроме того, часть подтекающей в КПС жидкости уносится паровой фазой, что также приводит к эффекту снижения интенсивности теплоотдачи.

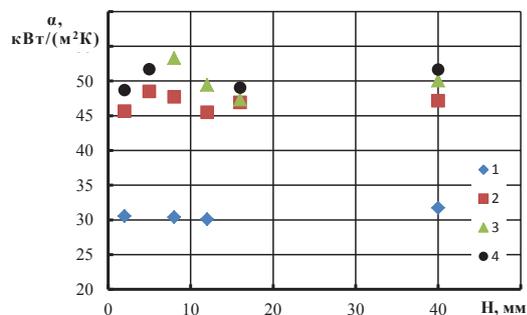


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от высоты ограничителя объема над КПС с длиной волокна 5 мм и плотности отводимого теплового потока: 1 – 100 кВт/м²; 2 – 257; 3 – 325; 4 – 380

Для анализа влияния длины волокон на интенсивность кипения на КПС были проведены эксперименты при одинаковых значениях плотности отводимого от рабочей поверхности теплового потока, но для разных образцов капиллярно-пористой структуры (рис. 4).

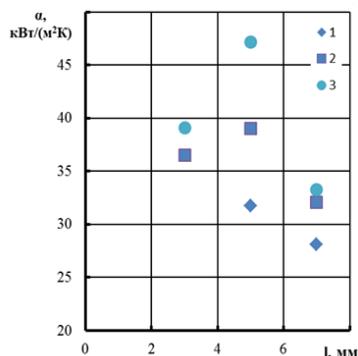


Рис. 4. Зависимость коэффициентов теплоотдачи от длины волокон КПС при постоянных значениях плотности теплового потока на греющей поверхности: 1 – $q=107$ кВт/м²; 2 – 181 кВт/м²; 3 – 246 кВт/м²

При длине волокон КПС 5 мм достигаются наибольшие значения коэффициентов теплоотдачи. Это можно объяснить геометрическими характеристиками данной капиллярно-пористой структуры. При такой длине волокон количество каналов большого диаметра, по которым осуществляется выход пара, является достаточным для обеспечения интенсивного теплоотвода. При этом количество каналов большого диаметра не настолько велико, как в КПС с длиной волокон 7 мм, когда пар при малых высотах ограничителя объема над рабочей поверхностью захватывает поступающую в капиллярно-пористую структуру жидкость и уносит её, что приводит к осушению КПС. Данное предположение подтверждается приведенным на рис. 5 графиком зависимости интенсивности теплоот-

дачи от длины волокон КПС для различных высот объема парового пространства над рабочей поверхностью.

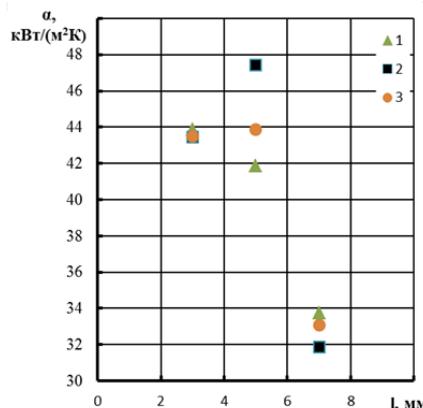


Рис. 5. Влияние длины волокон на интенсивность теплоотдачи при кипении при одинаковой высоте ограничителя объема: 1 – 12 мм; 2 – 5 мм; 3 – 2 мм

Из-за частичного осушения КПС при длине волокон 7 мм для малых высот ограничителя объема наблюдается наименьшая интенсивность теплоотдачи. В то же время при длине волокон 3 мм с меньшим количеством каналов пригодных для эвакуации паровой фазы значения коэффициентов теплоотдачи более высокие, чем для КПС с волокнами 7 мм, что обусловлено меньшим количеством отводимого пара и отсутствием запаривания рабочей поверхности. Но именно из-за меньшего объема отведенной паровой фазы коэффициент теплоотдачи от рабочей поверхности, покрытой КПС с длиной волокна 3 мм, имеет меньшие значения, чем коэффициент α для поверхности с КПС 5 мм, где объем эвакуированной паровой фазы оптимален для достижения наибольшей интенсивности теплоотдачи без запаривания поверхности.

7. Выводы

1. Экспериментально установлено, что с увеличением длины волокон от 5 мм до 7 мм снижается интенсивность теплоотдачи.
2. Наибольшее влияние условий стесненности на интенсивность теплоотдачи наблюдается для плотностей отводимого теплового потока до 200 кВт/м².
3. При уменьшении высоты ограничителя объема над рабочей поверхностью от 10 мм до 5 мм наблюдается интенсификация процессов теплоотдачи. Дальнейшее уменьшение высоты ограничителя объема над рабочей поверхностью, приводит к уменьшению интенсивности теплоотдачи за счет запаривания рабочей поверхности.
4. При длине волокон КПС равной 5 мм получены наибольшие значения коэффициента теплоотдачи.

Литература

1. Отчет украинского участника проекта «Development and creation of heat pipes on a basis metalfibrous capillary structures with improved thermophysic characteristics for temperature control systems of the perspective space vehicles» - Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича Национальной академии наук Украины за 2007 – 2008 год [Текст] : сб. науч. Трудов. / НАН Украины – Киев, 2007–2008. – 55 с.

2. Genske, P. Numerical simulation of heat transfer during growth of single vapor bubbles in nucleate boiling [Текст] / P. Genske, K. Stephan // International journal of thermal sciences. – 2006. – Vol. 45, Issue 3. – P. 299–309. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2004.07.008
3. Накоряков, В. Е. Теплообмен при фазовых переходах и химических превращениях в микроканальных системах [Текст] / В. Е. Накоряков, В. В. Кузнецов. – Новосибирск, 2010. – 167 с.
4. Григорьев, В. А. Теплообмен при кипении в вертикальных щелевых каналах [Текст] / В. А. Григорьев, Ю. И. Крохин, А. С. Куликов // Тр. МЭИ. Тепло- и массообменные процессы и аппараты. – 1972. – Вып. 141. – С. 58–68.
5. Аметистов, Е. В. Кипение криогенных жидкостей [Текст] / Е. В. Аметистов, В. В. Клименко, Ю. М. Павлов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 400 с.
6. Ishibashi, T. Saturated boiling heat transfer in narrow spaces [Text] / T. Ishibashi, H. Nishikawa // Journal Heat and Mass Transfer. – 1969. – Vol. 12, Issue 8. – P. 863–893.
7. Вишнев, И. П. Тепло- и массоперенос [Текст] / И. П. Вишнев, Я. Г. Винокур, В. А. Шапошников, В. В. Горохов // ИТМО АН БССР. – 1972. – Т. 2, Ч. 1. – С. 263–270.
8. Wojcik, T. M. Experimental investigation of boiling heat transfer hysteresis on sintered, metal – Fibrous, porous structures [Text] / T. M. Wojcik // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2009. – Vol. 33, Issue 3. – P. 397–404. doi: 10.1016/j.exptthermflusci.2008.10.011
9. Alam, M. S. Enhanced boiling of saturated water on copper coated heating tubes [Text] / M. S. Alam, L. Prasad, S. C. Gupta, V. K. Agarwal // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2008. – Vol. 47, Issue 1. – P. 159–167. doi: 10.1016/j.ccep.2007.07.021
10. Kim, J. H. Mechanism of nucleate boiling heat transfer enhancement from micro-porous surfaces in saturated FC – 72 [Text] / J. H. Kim, K. N. Rainey, S. M. You, J. V. Pak // Journal of Heat Transfer. – 2002. – Vol. 124, Issue 3. – P. 500–506. doi: 10.1115/1.1469548
11. Бутковский, А. А. Теплообмен при кипении воды и ацетона на поверхностях с металловолкнистыми капиллярно-пористыми покрытиями [Текст] : автореф. дис. канд. тех. наук : 01.01.14 / А. А. Бутковский. – Ин-т технической теплофизики АН УССР К., 1985. – 23 с.
12. Алексеик, О. С. Влияние характеристик пористой структуры на интенсивность кипения в тепловой трубе [Текст] / О. С. Алексеик // Энергетика и энергосбережение. – 2013. – № 6/5 – С. 29–31.
13. Овсянник, А. В. Теплообмен при кипении на развитых поверхностях в промышленных теплообменных аппаратах [Текст] : автореф. дис. канд. тех. наук : 05.14.04 / А. В. Овсянник. – УО «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого». М., 2004. – 43 с.
14. Nishikava, K. Effects of system pressure and surface roughness on nucleate boiling heat transfer [Text] / K. Nishikava, Y. Fujita, H. Ohta, S. Hidaka. – Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University, 1982. – P. 95–111.
15. You, S. M. Experiments on nucleate biling transfer with a highly-wetting dielectric fluid: effects of pressure, subcooling and dissolved gas content [Text] / S. M. You, T. W. Simon, A. Bar-Cohen // Cryogenic and Immersion Cooling of Optics and Electronic Equipment. – 1990. – Vol. 131. – P. 45–52.
16. Алексеик, О. С. Влияние стесненных условий на интенсивность теплоотдачи при кипении на пористой поверхности [Текст] / О. С. Алексеик, В. Ю. Кравец // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 4, № 8 (58) – С. 24–27. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/5725/5132>