

ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА ВИТКОВ НА ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСАЦИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

В. Ю. Кравец

Кандидат технических наук, доцент*
 Контактный тел.: 066-780-99-50
 E-mail: kravetz_kpi@ukr.net

Е. С. Алексеик

Аспирант*
 *Кафедра атомных электростанций и инженерной теплофизики
 Теплоэнергетический факультет
 Национальный технический университет Украины
 «Киевский политехнический институт»
 пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056
 Контактный тел.: 063-261-79-59
 E-mail: alexeik_kpi@ukr.net

Приведено огляд з дослідження впливу кількості витків та кута нахилу на теплопередаючі характеристики пульсаційної теплової труби. Описана експериментальна установка для дослідження цих впливів. Приведена методика проведення експерименту та обробки даних. Представлені результати досліджень

Ключові слова: пульсаційна теплова труба, кількість витків, термічний опір

Дан обзор по исследованию влияния количества витков и угла наклона на теплопередающие характеристики пульсационной тепловой трубы. Описана экспериментальная установка для исследования этих влияний. Приведена методика проведения эксперимента и обработки данных. Представлены результаты исследований

Ключевые слова: пульсационная тепловая труба, количество витков, термическое сопротивление

This article represents an overview of investigation of effect of number of turns and inclination angle on heat-transfer behavior of oscillating heat pipe. Experimental setup for investigation of this effect, a routine of experiment and data handling are described. The results of investigation are presented

Key words: oscillating heat pipe, number of turns, thermal resistance

1. Введение

Миниатюризация и одновременное увеличение мощности и расширение функциональности основных элементов радиоэлектронных устройств и компьютерной техники привело к значительному возрастанию плотностей тепловых потоков, которые необходимо отводить от них. Решение этой задачи требует использования высокоэффективных систем охлаждения, в качестве элементов которых уже не одно десятилетие используются тепловые трубы (ТТ). Одним из новых и перспективных видов тепловых труб являются пульсационные тепловые трубы (ПТТ). Их конструкция значительно проще конструкции обычных тепловых труб за счет отсутствия капиллярно-пористой структуры, при этом ПТТ имеет все преимущества обычной ТТ, а её теплопередающие характеристики не хуже, а в некоторых случаях даже лучше, чем у обычных ТТ. Однако, несмотря на все преимущества ПТТ, в данный момент отсутствуют рекомендации касательно проектирования и изготовления как их самих, так и теплопередающих устройств на их основе. Это связано

со сложностью физических процессов и явлений, сопровождающих работу данного вида тепловых труб, и требующих детальных исследований.

Таким образом, исследование теплопередающих характеристик и физических процессов, имеющих место при работе ПТТ, является актуальной задачей, решение которой позволит повысить эффективность систем охлаждения элементов радиоэлектронной и компьютерной техники и одновременно выработать рекомендации по их проектированию и изготовлению.

2. Обзор проблемы

Принцип, лежащий в основе работы пульсационных тепловых труб, изобретенных японским исследователем Акаши [1], был впервые запатентован советскими учеными Смирновым Г.Ф. и Савченковым Г.А. в 1971 году [2]. В общем случае она представляет собой металлический герметичный, вакуумированный, выгнутый в виде змеевика капилляр, частично заполнен-

ный теплоносителем. Движение паровых и жидкостных снарядов теплоносителя, сформировавшихся под действием капиллярных сил, имеет пульсирующий автоколебательный характер и поддерживается взаимосвязанными колебаниями паросодержания и давления. Теплопередача в ПТТ происходит за счет испарения и конденсации теплоносителя, а также переноса теплоты жидкостными снарядами, циркулирующими между зонами нагрева и конденсации.

На теплопередающие характеристики ПТТ влияет значительное количество факторов. Одним из них является количество витков. Результаты исследований влияния данного фактора на теплопередающие характеристики ПТТ представлены в [3 - 5]. При работе ПТТ в горизонтальном положении (угол наклона 0°) увеличение количества витков при одинаковой средней температуре зоны нагрева приводит к уменьшению термического сопротивления [3], а при угле наклона 90° (вертикальное положение с нагревом снизу) – к увеличению максимального передаваемого теплового потока [4]. Авторы [3] объясняют это увеличением несбалансированного давления между зонами нагрева и конденсации с увеличением количества витков.

Также в [3, 4] рассматривается вопрос критического количества витков, т.е. минимального количества витков, при котором ПТТ может работать в горизонтальном положении. Однако данные об этом параметре в указанных источниках значительно отличаются. В [5] были получены результаты противоположные результатам [3], что возможно вызвано использованием различных теплоносителей в [5] и [3]. Также авторы [5] пришли к выводу, что существует некоторое оптимальное количество витков, при котором ПТТ обладает наилучшими теплопередающими характеристиками. В [6] это объясняется зависимостью эффективной теплопроводности ПТТ от перепада давлений между зонами нагрева и конденсации, который будет уменьшаться с увеличением количества витков при остальных постоянных величинах, что в результате приведет к ухудшению работы ПТТ.

Поэтому существует некоторое оптимальное количество витков, при превышении которого теплопередающие характеристики ПТТ ухудшаются. Также в [6] влияние количества витков на работу ПТТ объясняется уменьшением возможности существования больших паровых снарядов, блокирующих зону нагрева, с увеличением количества витков. Однако следует заметить, что это не является исчерпывающим объяснением, а лишь предположением авторов [6].

Поскольку объем представленных в литературе данных касательно влияния количества витков на теплопередающие характеристики ПТТ достаточно мал, а данные противоречивы, то необходимо более детальное экспериментальное изучение этого вопроса, а также проверка предположений, изложенных в [3, 4, 6].

Еще одним важным фактором, влияющим на теплопередающие характеристики ПТТ, является ориентация трубы относительно сил гравитации. Например, в ряде исследований [3, 4, 7, 8] отмечается, что переход от угла наклона 90° к 0° значительно сни-

жает теплопередающие характеристики ПТТ вплоть до прекращения пульсаций и работы устройства. В [4, 9] это объясняется значительным влиянием сил гравитации на движение теплоносителя в ПТТ. При работе в горизонтальном положении оно отсутствует, и движение должно обеспечиваться только силами давления.

Еще одно объяснение состоит в том, что благодаря наличию снарядов с разными формами менисков, в ПТТ существуют направления движения теплоносителя с наименьшим сопротивлением, в которых и происходит это движение при запуске ПТТ. Но при горизонтальном размещении трубы ввиду отсутствия действия силы гравитации снаряды с различными менисками отсутствуют, следовательно, направления с меньшим сопротивлением также отсутствуют, что усложняет запуск ПТТ [6]. На основании вышесказанного авторы [6] делают выводы, что работа ПТТ в горизонтальном положении может зависеть от количества витков, определяющего количество степеней свободы и неоднородностей в ПТТ, а также от теплоподвода, определяющего внутреннее рабочее давление. Предположение [6] было экспериментально подтверждено в [10]. В [11] зависимость теплопередающих характеристик от угла наклона объясняется его влиянием на касательное напряжение между паровыми снарядами и пленкой жидкости на стенках ПТТ.

Однако, в исследованиях [12, 13] ПТТ были нечувствительны к действию сил гравитации. Можно предположить, что причиной этого является большое количество витков или применение в качестве теплоносителя FC-72 и FC-75 [12] (ни в одной из других вышеупомянутых работ такие жидкости не использовались). Существуют также данные, подтверждающие возможность работы ПТТ против сил гравитации (угол наклона -90°) [14, 15]. Однако и в этом случае угол наклона влияет на их теплопередающие характеристики. В отличие от большинства исследований, угол наклона практически не влиял на характеристики ПТТ с присоединенным сифоном, описанной в [16]. Благодаря чему косвенно можно сделать выводы, что на работу ПТТ в разных положениях влияет баланс давления и распределение жидкости в трубе, т.к. наличие сифона оказывает значительное влияние на эти параметры. Также можно предположить, что многovitковые ПТТ менее чувствительны к влиянию сил гравитации, потому что каждый следующий виток действует как буфер давления для предыдущего.

Таким образом в общем случае ПТТ работает при любой ориентации в поле массовых сил. Однако чаще всего её теплопередающие характеристики ухудшаются при углах наклона от 0° до -90° включительно и при малых углах наклона.

Поэтому следует уделить внимание исследованиям причин такого влияния, разработке методов минимизации влияния сил гравитации на работу ПТТ и вопросами их запуска при неблагоприятных углах наклона.

Целью данной работы является определение влияния количества витков и угла наклона на термическое сопротивление ПТТ, а также на разность температур между зонами нагрева и конденсации.

3. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

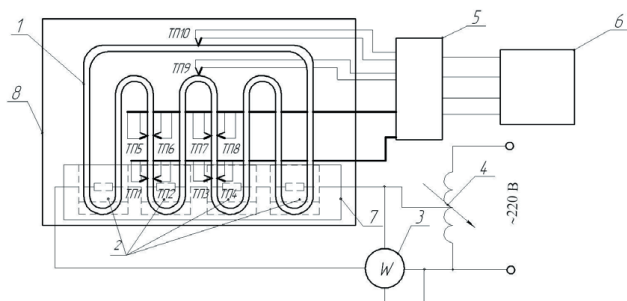


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – ПТТ; 2 – электронагреватель; 3 – ваттметр; 4 – лабораторный автотрансформатор; 5 – аналого-цифровой преобразователь; 6 – персональный компьютер; 7 – теплоизоляция; 8 – бокс; ТП1-ТП10 – термопары

Внутренний диаметр исследуемой замкнутой стеклянной ПТТ 1 (рис. 1) составлял 2,8 мм. Количество витков – 4, 7 и 9. Высота витков составляла 200 мм, а расстояние между ними – 10 мм. Трубы заправлялись водой и этанолом с коэффициентом заправки (КЗ) $50 \pm 5\%$. Увеличение количества витков достигалось за счет присоединения к ПТТ дополнительных секций с помощью вакуумной трубки.

ПТТ 1 закреплялась на штативе (см. рис. 2) таким образом, чтобы её можно было установить как в горизонтальное, так и в вертикальное (с нагревом снизу) положение. Теплота к зоне нагрева подводилась с помощью электронагревателя 2 (рис. 1), представляющего собой спираль из нихромовой проволоки, навитую непосредственно на исследуемую трубу. Питание нагревателя осуществлялось от электросети переменного тока 220 В через лабораторный автотрансформатор 4 (ЛАТР), с помощью которого регулировалась подводимая к ПТТ мощность, измеряемая ваттметром 3. Максимальная мощность нагревателя составляла 200 Вт. Для уменьшения теплотерь на зону нагрева, высота которой была равна 30 мм, наносился слой теплоизоляции 7 из базальтового волокна. Неизолированная часть трубы охлаждалась окружающим воздухом за счет естественной конвекции. Температура охлаждающего воздуха контролировалась с помощью ртутного термометра (на рис. 1 не показан). На внешнюю поверхность стенок ПТТ было установлено десять медь-константановых термопар ТП1-ТП10. Термопары ТП1-ТП4 были установлены в зоне нагрева, остальные – в зоне конденсации. Корольки термопар фиксировались на стенках ПТТ при помощи клея и дополнительно закреплялись клейкой термостойчивой изоляционной лентой. Все термопары соединялись с аналого-цифровым преобразователем 5 (АЦП), содержащим компенсатор холодных спаев термопар. Данные с АЦП 5 подавались на персональный компьютер 6 (ПК), который позволял наблюдать за изменениями температурного поля ПТТ в реальном времени и сохранять результаты измерений в табличном виде. Для уменьшения влияния факторов окружающей среды на работу ПТТ и результаты эксперимента штатив с ПТТ 1 и установ-

ленными на неё нагревателем 2 и теплоизоляцией 7 размещался в боксе 8.



Рис. 2. Общий вид рабочего участка

4. Методика проведения эксперимента и обработки данных

В начале проведения эксперимента ПТТ устанавливалась в горизонтальное или вертикальное положение, после чего на нагреватель подавалась определенная начальная мощность. На ПК запускалось соответствующее программное обеспечение, позволяющее наблюдать за изменениями показаний термопар в реальном времени и производить их запись на протяжении всего эксперимента. При проведении опыта подводимая мощность увеличивалась с определенным фиксированным шагом. Увеличение мощности продолжалось до тех пор, пока разница температур между термопарами, установленными в зоне нагрева ПТТ, и термопарой ТП10, установленной в зоне конденсации на наибольшем расстоянии от зоны нагрева, не достигала $70-80^\circ\text{C}$. Выбор этой величины обусловлен тем, что при большей разности температур стенки ПТТ могли разрушиться. В начале и в конце эксперимента фиксировались показания ртутного термометра, измеряющего температуру охлаждающего воздуха.

По полученным данным строились графики зависимости температур от времени в каждой точке установки термопар для отдельно взятого витка. Далее для каждого значения плотности подведенного теплового потока рассчитывалась разность средних температур зоны нагрева и конденсации, которые определялись как среднее арифметическое показаний всех термопар, размещенных в каждой из этих зон при работе ПТТ в стационарном режиме. По полученным данным строились графики зависимости разности температур от плотности подведенного теплового потока. Плотность теплового потока определялась по выражению

$$q = \frac{Q}{S_{\text{вн}}}, \quad (1)$$

где Q – подведенная к ПТТ мощность, Вт;
 $S_{\text{вн}}$ – площадь внутренней поверхности всех витков зоны нагрева, м^2 .

Подведенная мощность определялась как разность показаний ваттметра и тепловых потерь, составлявших от 3% до 6%.

Также строились графики зависимости термического сопротивления ПТТ от плотности подведенного теплового потока. Термическое сопротивление определялось по формуле

$$R = \frac{\bar{T}_n - \bar{T}_k}{Q}, \tag{2}$$

где \bar{T}_n и \bar{T}_k - средние температуры зон нагрева и конденсации соответственно, К.

5. Результаты исследований

На рис. 3 представлен график зависимости температур от времени в точках установки термомпар на втором справа витке (см. рис. 3) 9-витковой ПТТ, заправленной водой, и работающей в горизонтальном положении.

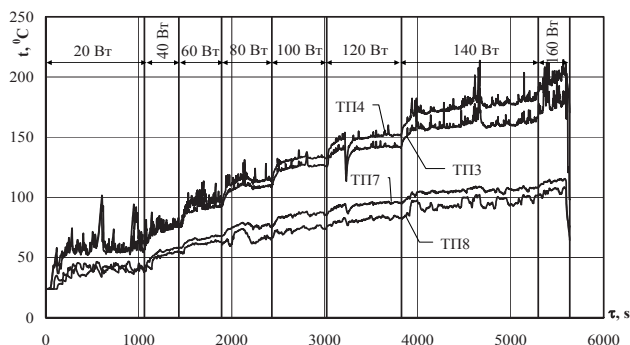


Рис. 3. График зависимости температуры от времени для одного витка 9-витковой ПТТ, заправленной водой, при работе в горизонтальном положении

Как видно на рис. 3, при наименьшей подведенной мощности амплитуда пульсаций, как в зоне нагрева, так и в зоне конденсации достаточно велика. Дальнейшее увеличение подводимой мощности приводит к уменьшению амплитуды пульсаций в зоне конденсации, причем, начиная с мощности 40 Вт, и до конца эксперимента величина амплитуды в этой зоне остается практически неизменной. Амплитуда пульсаций в зоне нагрева несколько выше, чем в зоне конденсации, и также уменьшается с увеличением подводимой мощности до определенного момента, а начиная с мощности 120 Вт, возрастает.

На рис. 4 показан график зависимости разности средних температур зон нагрева и конденсации от плотности подведенного теплового потока.

Как видно на рис. 4, для 7- и 9-витковых ПТТ при работе в любом положении с увеличением плотности теплового потока разность температур увеличивалась.

При этом значения разности температур для этих труб близки. Отличные от других труб результаты были получены для 4-витковой ПТТ, заправленной этанолом. Как видно на рис. 4 при малых плотностях подводимого теплового потока, пока в зоне нагрева еще не началось кипение, разность температур достаточно быстро растет. С активацией первых центров парообразования разность температур существенно

снижается. Дальнейшее увеличение плотности теплового потока приводит к росту ΔT , а форма кривой, описывающей данный процесс, и значения этой величины становятся близкими к таковым у других исследованных ПТТ.

Впервые данное явление было описано в [17]. Анализируя рис. 4, можно сделать вывод, что количество витков в исследованном диапазоне практически не влияет на разность температур между зонами нагрева и конденсации. Для 9-витковых ПТТ на разность температур не влияет также и ориентация трубы в пространстве, поскольку значения этой величины, а также формы кривых, описывающих её зависимость от плотности теплового потока при работе в горизонтальном и вертикальном положениях, близки.

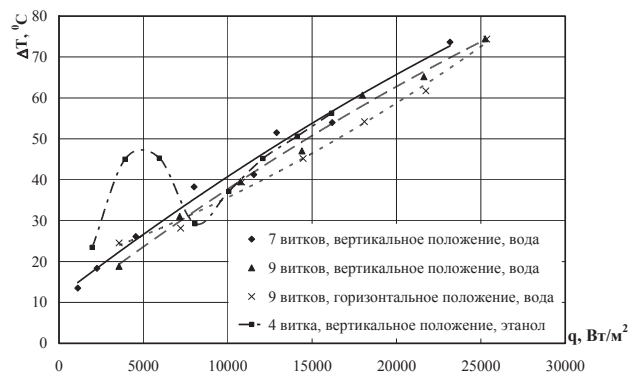


Рис. 4. Зависимость разности температур от плотности теплового потока

На рис. 5. представлен график зависимости термического сопротивления исследуемых ПТТ от плотности подведенного теплового потока, из которого видно, что с увеличением плотности подведенного теплового потока термическое сопротивление всех исследованных ПТТ при работе, как в вертикальном, так и в горизонтальном положениях уменьшается. Также термическое сопротивление снижается с увеличением количества витков.

Термические сопротивления 9-витковой ПТТ при работе в вертикальном и горизонтальном положениях почти одинаковы, следовательно, ориентация в пространстве не влияет на термическое сопротивление такой ПТТ, что противоречит результатам, полученным в [4].

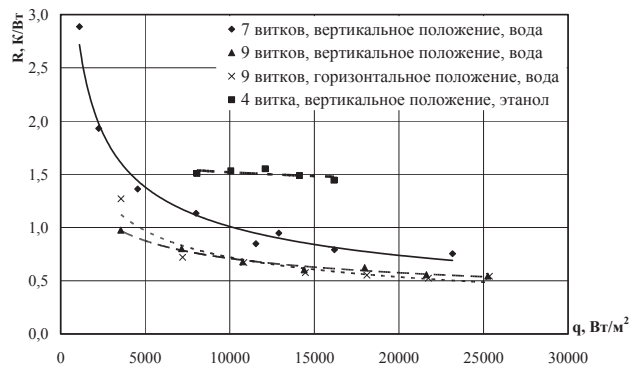


Рис. 5. Зависимость термического сопротивления ПТТ от плотности теплового потока

6. Выводы

1. Несмотря на значительное количество литературы, посвященной исследованиям работы ПТТ, такие вопросы как влияние количества витков на теплопередающие характеристики ПТТ и влияние сил гравитации на работу ПТТ требуют более детального изучения.

Это связано с недостаточным количеством данных по этим вопросам или противоречиями, существующими в имеющихся публикациях. Также в более глубоком изучении нуждаются причины этих влияний, объяснения которых в большинстве случаев являются лишь предположениями отдельных авторов и требуют подтверждения.

2. Проведенное исследование показало, что изменение количества витков в диапазоне от 7 до 9 не влияет на разность средних температур между зонами нагрева и конденсации ПТТ, заправленных водой.

3. Увеличение количества витков исследованных ПТТ приводило к уменьшению их термического сопротивления.

4. Ориентация в пространстве 9-витковых ПТТ, заправленных водой, не влияет на разность средних температур между зонами нагрева и конденсации и на термическое сопротивление при плотностях подведенного теплового потока до $2,5 \cdot 10^4$ Вт/м².

5. Исследование 4-витковой ПТТ дало возможность проследить момент начала активации центров парообразования в зоне нагрева трубы. Данный вопрос практически не освещен в литературе и требует более глубокого изучения.

6. Для уточнения полученных результатов следует расширить диапазон количества витков исследуемых ПТТ, исследовать трубы с различными теплоносителями и провести визуализацию их работы, с помощью которой можно будет попытаться определить причины влияния геометрических и режимных факторов на теплопередающие характеристики ПТТ.

Литература

1. Patent #4,921,041 U.S.A., F28D 15/02 Structure of a Heat Pipe / Akachi H.; Inventor: Hisateru Akachi, Assignee: Actronics Kabushiki Kaisha – Appl. No.: 207,318; Filed: Jun 15, 1988; Date of Patent: May 1, 1990. – 29 p.
2. Смирнов Г.Ф., Савченков Г.А. Пульсирующая тепловая труба. - Авт. свид. №504065 кл. F28D 15/00. С приоритетом от 30.IV.1-971г.
3. Charoensawan P. Thermal performance of horizontal closed-loop oscillating heat pipes [Текст] / P. Terdtoon // Applied Thermal Engineering. - 2008. – vol. 28, iss. 5-6. – P. 460-466.
4. Charoensawan P. Closed loop pulsating heat pipes. Part A: parametric experimental investigations [Текст] / S. Khandekar, M. Groll, P. Terdtoon // Applied Thermal Engineering, 2003 – vol. 23 - P. 2009–2020.
5. Rittidech S. Correlation to predict heat transfer characteristics of a closed-end oscillating heat pipe at normal operating condition [Текст] / P. Terdtoon, M. Murakami, P. Kamonpet, W. Jompakdee // Applied Thermal Engineering. - 2003. – vol. 23. - P. 497–510.
6. Khandekar S. Pulsating heat pipes: study on a two-phase loop [Текст] / M. Groll // 13th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry (THERMO), Budapest, Hungary, 2003.
7. Khandekar S. Thermofluid Dynamic Study of Flat-Plate Closed-Loop Pulsating Heat Pipes [Текст] / M. Shneider, P. Shafer, R. Kulenovic, M. Groll // Microscale Thermophysical Engineering. - 2002. – №6. – P. 303-317.
8. Khandekar S. Pulsating Heat Pipes: Thermo-fluidic Characteristics and Comparative Study with Single Phase Thermosyphon [Текст] / M. Groll, P. Charoensawan, P. Terdtoon // Proceedings of 12th International Heat Transfer Conference, Grenoble, France. - 2002. - vol. 4. - P. 459-464.
9. S. Khandekar, N. Dollinger, M. Groll. Understanding operational regimes of closed loop pulsating heat pipes: an experimental study [Текст] // Applied Thermal Engineering, 2003. – vol. 23. – P. 707-719.
10. Конев С.В. Экспериментальное исследование пульсирующей капиллярной тепловой трубы [Текст] / В.А Олехнович // VI Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators”, Minsk, Belarus, 2004.
11. T. Hudakorn Effect of Inclination angle on heat transfer characteristic of a closed-end oscillating heat pipe at critical state [Текст] / K. Booddachan, P. Chareonsawan, S. Waowaew, S. Rittidech // 1st International Seminar on Heat Pipes and Heat Recovery Systems, Monash University, Malaysia, 2004.
12. Lanchao Lin Thermal Management Research Studies. Volume 2: Experimental Investigation of Oscillating Heat Pipes for Actuator Cooling // Report. – AFRL-PR-WP-TR-2001-2042.
13. Yang H. Operational limit of closed loop pulsating heat pipes [Текст] / S. Khandekar, M. Groll // Applied Thermal Engineering. - 2008. – vol. 28. – P. 49-59.
14. Yang H. Performance characteristics of pulsating heat pipes as integral thermal spreaders [Текст] / S. Khandekar, M. Groll // International Journal of Thermal Sciences. - 2009. – №48. - P. 815–824.
15. Yang H. Operational characteristics of flat plate closed loop pulsating heat pipes [Текст] / S. Khandekar, M. Groll // 13th International Heat Pipe Conference, China. - 2004. - P. 283-289.
16. Кузнецов И.О. Экспериментальное исследование и математическое моделирование теплопередающих характеристик пульсационных тепловых труб [Текст] : дис.... канд. техн. наук: 05.14.06 / И.О.Кузнецов. – Одесса, 2006.
17. Кравец В.Ю. Исследование теплопередающих характеристик пульсационной тепловой трубы [Текст] // Тезисы докладов и сообщений. VI Минский международный форум по тепло- и массообмену. - Т. 2. - 2008. - С. 58-60.