

На правах рукописи



004603998

Балашов Александр Владимирович

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО  
СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТРИЧНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА В  
ДРОССЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ПРИ РАБОТЕ НА СМЕСЕВЫХ  
ХЛАДАГЕНТАХ

Специальность 05.04.03. Машины и аппараты, процессы  
холодильной и криогенной техники,  
систем кондиционирования  
и жизнеобеспечения.

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2010

10 ИЮН 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Московский энергетический институт (технический университет)».

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент  
Могорычный Владимир Иванович

Официальные оппоненты доктор технических наук  
Шевич Юрий Артемьевич

кандидат технических наук  
Мутовин Юрий Григорьевич

Ведущая организация ОАО «НПО Гелиймаш».

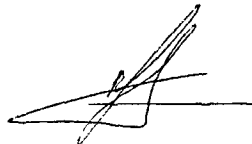
Защита диссертации состоится «25» июня 2010 года в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д. 212.157.04 при ГОУ ВПО «Московский энергетический институт (технический университет)» по адресу: Москва, Красноказарменная ул., 17, корп. Т, каф. ИТФ, Т-206.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского энергетического института (технического университета).

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д.14. Ученый совет МЭИ (ТУ).

Автореферат разослан «24» мая 2010 года.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212.157.04  
к. ф.-м. н. доцент



В.И. Мика

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Расширение области применения дроссельных регенеративных систем (ДРС) (охлаждение датчиков и ВТСП-устройств, криомедицина, низкотемпературная закалка легированных сталей и т.д.) выдвигает задачи повышения их эффективности.

Работы, начатые в 70-х годах прошлого века В.М. Бродяским и А.К. Грезиним, открыли новый этап в развитии ДРС, связанный с использованием многокомпонентных рабочих тел (МРТ) в качестве хладагента. Было показано, что применение МРТ позволяет значительно улучшить энергетические и массогабаритные характеристики криогенных дроссельных систем, а также заметно снизить их стоимость. Количество компонентов смеси зависит от ряда факторов и обычно увеличивается с понижением температурного уровня охлаждения. Так, например, рабочее тело на азотный температурный уровень может состоять из шести компонентов. Это обстоятельство существенно осложняет расчет всех элементов дроссельной системы и прежде всего рекуперативного теплообменника.

В рекуперативном теплообменнике дроссельной системы при работе на смесевом хладагенте в каналах прямого и обратного потоков происходит конденсация и кипение компонентов смеси, соответственно. В настоящее время отсутствует методика расчета рекуперативных теплообменников при работе на смесевых хладагентах даже для относительно простых и наиболее часто применяющихся в ДРС теплообменников типа «труба в трубе». Это справедливо и в отношении определения гидравлического сопротивления теплообменников. Указанные обстоятельства серьезно осложняют разработку и создание низкотемпературных систем, работающих на МРТ.

Из опыта создания и эксплуатации систем на смесях известно, что одна из главных проблем при использовании МРТ это высокие гидравлические потери в рекуперативном теплообменнике. Решением данной проблемы

может быть переход к новому типу компактных теплообменников с низкими гидравлическими сопротивлениями. К таким теплообменникам относятся теплообменники матричного типа (МТ).

Таким образом, изучение особенностей работы МТ в составе ДРС при работе на смесях и разработка инженерных методик расчёта процессов теплопередачи и гидравлического сопротивления является важным и необходимым условием для разработки и совершенствования дроссельных систем. Это обуславливает актуальность данной работы.

Цель и задачи исследования. Целью данного исследования является определение возможности и перспективы использования матричных теплообменников в составе ДРС на МРТ. Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- проведение экспериментальных исследований по изучению характеристик теплообмена и гидравлических сопротивлений матричного теплообменника, работающего в составе ДРС на современных хладагентах, как чистых, так и смесевых.

- разработка методики расчёта характеристик теплообмена и гидравлических сопротивлений в МТ, которые позволят проектировать теплообменники с оптимальными параметрами в условиях их работы в составе ДРС.

Научная новизна. Впервые получены новые экспериментальные данные для коэффициента гидравлического сопротивления и коэффициента теплопередачи МТ в широком диапазоне  $Re$  для различных перспективных хладагентов. В ходе экспериментов было исследовано 10 рабочих тел. Среди них: 5 чистых веществ и 5 смесевых хладагентов.

По результатам обработки экспериментальных данных предложены зависимости коэффициента гидравлического сопротивления ( $\xi$ ) и числа Нуссельта ( $Nu$ ) от числа Рейнольдса. Эти зависимости рекомендуются при выполнении расчетов МТ.

Впервые при исследовании матричного теплообменника при работе на смеси азот – фреон R125 обнаружена особенность достижения фазового равновесия, которая выражается в эндотермической реакции в канале прямого потока, что находит отражение в дополнительном охлаждении потока.

Практическая ценность. Полученные экспериментальные данные и предложенные зависимости могут быть использованы при проектировании дроссельных систем на современных хладагентах.

Апробация работы. Основные результаты данной работы докладывались на трёх международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (2008, 2009, 2010 г), а так же на научном семинаре кафедры низких температур (МЭИ, 2010 г.).

Публикации. Материалы по теме диссертационной работы изложены в 8 печатных трудах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, приложения и списка используемой литературы и содержит 127 страниц печатного машинописного текста, в том числе 109 стр. основного текста, 13 стр. приложений. Список использованной литературы включает 58 наименований.

Автор выносит на защиту:

- результаты экспериментального исследования характеристик гидравлики и теплообмена МТ в составе ДРС при работе на перспективных хладагентах.

- расчётные зависимости, позволяющие провести расчёт рекуперативного теплообменника матричного типа с круглой перфорацией, собранного со смещением.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе описана принципиальная конструкция матричных теплообменников, а также проведен анализ опубликованных работ, отражающих современный технический уровень развития. Показана история и предпосылки создания матричных теплообменников для их применения в различных низкотемпературных системах и установках, приведен ряд типовых конструкций для теплообменников, изготовленных из перфорированных пластин и сетки. На примере многочисленных разновидностей конструкций, отраженных в патентах и авторских свидетельствах, перечислены основные методы изготовления матричных теплообменников: механическое уплотнение, склеивание, диффузионная сварка, пайка.

Анализ существующих данных по исследованиям характеристик гидравлики и теплообмена матричных теплообменников показал, что в большинстве работ безразмерный коэффициент теплоотдачи представлен степенной функцией  $Nu = C \cdot Re^n$ . Характерный диапазон чисел  $Re$  от 10 до 3000, ниже значений, характерных для рекуперативных теплообменников ДРС. При исследованиях коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi$  перфорированных пластин матричного теплообменника большинство авторов выделяет две зоны. Зону автомодельного течения, в которой  $\xi$  не зависит от  $Re$  и является постоянной величиной, и зону, в которой коэффициент гидравлического сопротивления описывается зависимостью вида  $\xi = A \cdot Re^{-k}$ .

Однако все приведенные на основании опытных данных эмпирические корреляции для расчёта характеристик теплообмена и гидравлики получены при работе на газовых потоках чистых веществ. Обычно в качестве рабочего тела использовался азот или атмосферный воздух при температурах, близких к температуре окружающей среды.

В этой же главе рассмотрены основные положения, касающиеся дроссельных систем. Описаны процессы термодинамического цикла Джоуля-Томпсона, который лежит в основе ДРС. Приведены данные, показывающие эффективность применения многокомпонентных рабочих тел, в сравнении с чистыми хладагентами. Также отмечено, что высокие гидравлические сопротивления в каналах трубчатых теплообменных аппаратов, наиболее часто использующихся в современных ДРС, существенно снижают эффективность системы.

Поэтому, применение компактных матричных теплообменников, характеризующихся низкими гидравлическими сопротивлениями, позволит улучшить энергетические и другие характеристики дроссельных установок.

Во второй главе приведено подробное описание экспериментального стенда и методики обработки результатов.

Экспериментальный стенд состоит из нескольких частей.

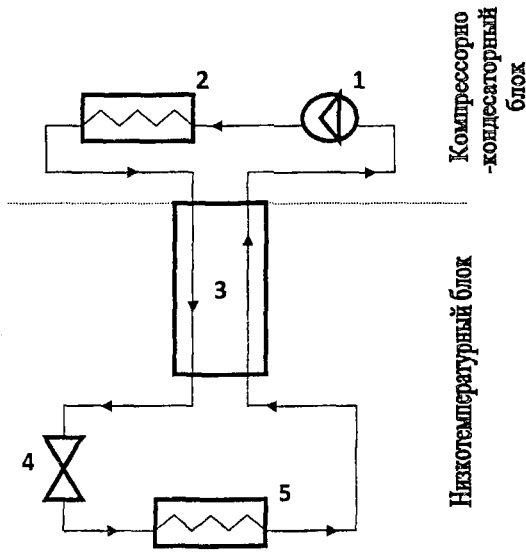


Рис.1. Принципиальная схема ДРС.

- 1- компрессор; 2- конденсатор;
- 3- рекуперативный теплообменник;
- 4- дроссель; 5- испаритель.

Основной его частью является дроссельная система, в составе которой и исследовался матричный теплообменник (рис.1). Рабочее тело сжимается в компрессоре и затем охлаждается в конденсаторе, который имеет водяное охлаждение. В рекуперативном теплообменнике происходит процесс предварительного охлаждения прямого потока перед его дросселированием. Следует отметить, что сам теплообменник является теплообменником рекуперативного типа (потоки отделены друг от друга теплопроводящей стенкой), однако в литературе его часто называют «регенеративным», имея в виду роль такого теплообменника в системе. Дроссель ДРС – игольчатый, регулируемый. Поток хладагента высокого давления направлен «на иглу». Ручка регулирования вынесена в тёплую зону, для возможности перехода от одного стационарного режима к другому, в процессе эксперимента. После дросселирования и подвода тепла к хладагенту в испарителе (в экспериментах для имитации тепловой нагрузки используется электрический нагреватель мощностью до 100 Вт.), поток низкого давления поступает в каналы обратного потока теплообменника и далее, на всасывание в компрессор.

Компрессорно-конденсаторный блок экспериментального стенда выполнен на отдельной раме. Низкотемпературная часть ДРС располагается в криостате, который откачивается до остаточного давления около  $10^{-2}$  мм рт. ст. с помощью форвакуумного насоса.

С помощью автоматизированной системы сбора данных измерялись следующие параметры:

- температура на входах/выходах теплообменника;
- абсолютное давление на входах/выходах теплообменника;
- падение давления по прямому и обратному потокам МТ;
- уровень вакуума в криостате.

Также в процессе экспериментов определялся массовый расход хладагента в системе. Для этого был изготовлен и установлен на линию всасывания перед компрессором расходомер.



Исследуемый теплообменник матричного типа выполнен из перфорированных пластин (ПП). Перфорация отверстиями, сборка со смещением. Проставка формирует два и три чередующихся канала, для прямого и обратного потоков, соответственно (рис. 3). Материал перфорированной пластины и проставки – алюминий марки АД-1.

Снижение осевой теплопроводности в такой конструкции достигается благодаря технология изготовления слоисто-композиционного материала металл-стекло. Основные параметры пластины: диаметр отверстия – 0,8мм; шаг перфорации – 1,6 мм; толщина ПП – 0,5 мм; толщина проставки – 0,5 мм; компактность ПП –  $4157 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ; пористость ПП – 0,157; размеры – 38x48 мм.

Количество пластин в теплообменнике – 35 штук.

Внешний вид перфорированной пластины и теплообменника приведен на рис 4.

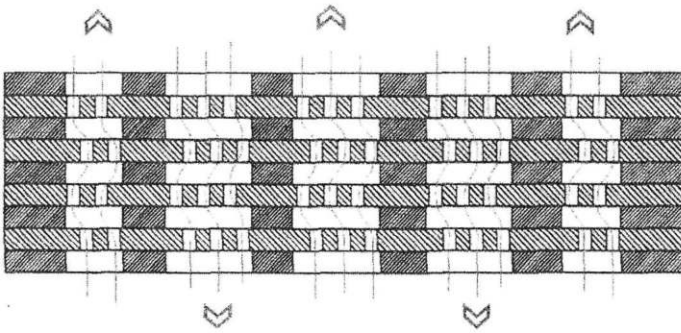


Рис. 3. Сборка со смещением.

В методике проведения эксперимента и обработки полученных данных описана полная последовательность проведения экспериментальных исследований, которая включает: подготовку стенда к эксперименту, процедуру подготовки и заправки рабочего тела (отдельно рассмотрена методика заправки смесового хладагента), достижения стационарного режима и опроса датчиков.

Согласно предложенной методике обработки полученных первичных данных, для каждого стационарного режима работы ДРС, рассчитывается число Рейнольдса, коэффициент гидравлического сопротивления и коэффициент теплопередачи.

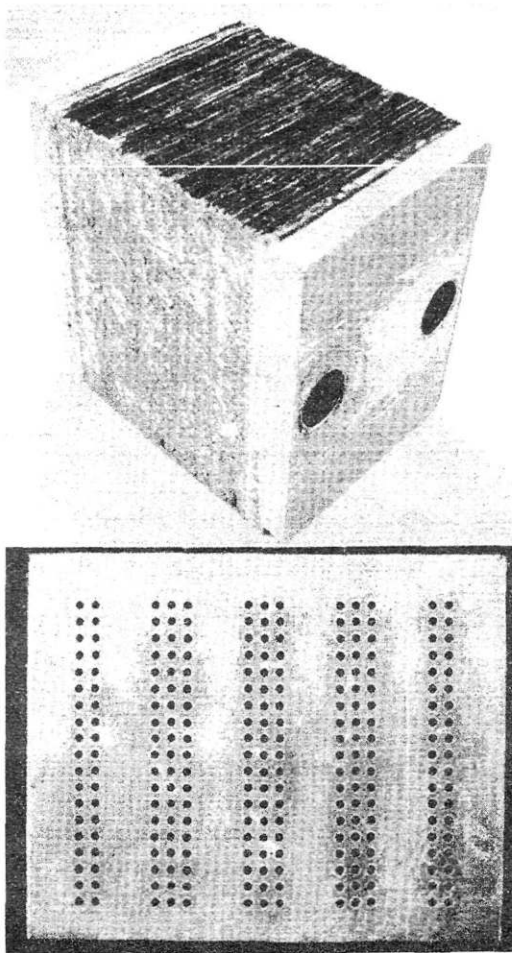


Рис. 4. Матричный теплообменник.

( $4000 < Re < 9000$ ), в которой коэффициент сопротивления очень слабо зависит от  $Re$  и зону, ( $250 < Re < 4000$ ) в которой  $\xi$  можно аппроксимировать степенной функцией.

Экспериментальные данные однозначно указывают, что зависимости, полученные для чистых газов, в полной мере могут быть применимы для газовых смесей, а также для оценки гидравлического сопротивления МТ при течении парожидкостного потока с кипением или конденсацией.

Полученная аппроксимация описывается следующими соотношениями:

$$\xi = 11.54 \cdot Re^{-0.24},$$

для  $250 < Re < 4000$

$$\xi = 1.57.$$

для  $4000 < Re < 9000$

Все полученные экспериментальные данные для коэффициента гидравлического сопротивления для одиночной перфорированной пластины зависимости представлены на рис.4.

В этой же главе рассмотрены эксперименты по изучению особенностей теплопередачи в МТ. Показано, что как для чистых хладагентов, так и для газовых смесей для расчёта теплопередачи может быть использована следующая зависимость:

$$Nu = 0,0012 \cdot Re^{1.2} \cdot Pr^{0.3}.$$

Зависимость справедлива для  $Re=1500 \div 9000$ .

На рис. 5, в качестве примера, приведены экспериментальные данные и расчётная линия для коэффициента теплопередачи МТ, при использовании бинарной газовой смеси этилен – R23.

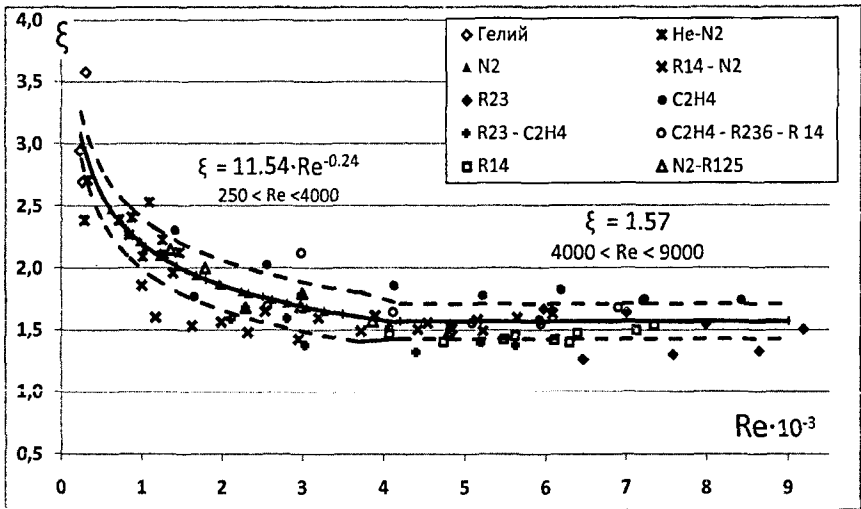


Рис. 4. Коэффициент сопротивления одиночной ГПП матричного теплообменника и результаты расчетов по рекомендуемой аппроксимационной зависимости.

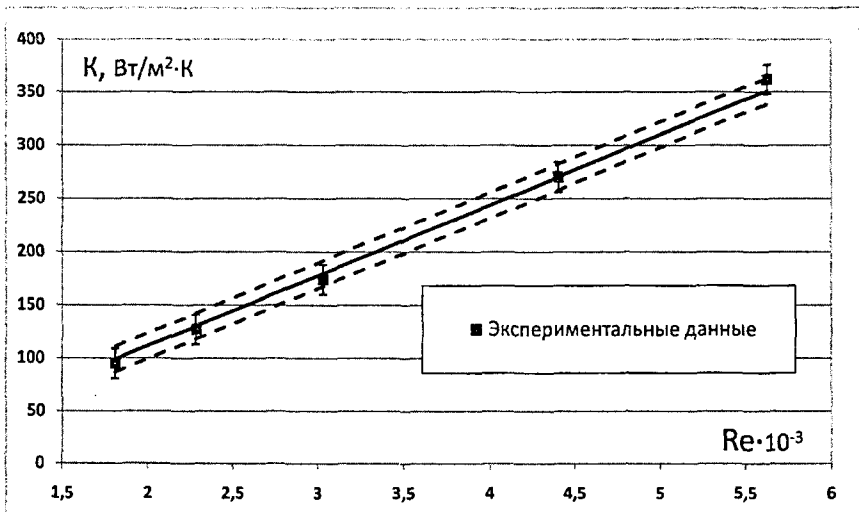


Рис. 5. Коэффициент теплопередачи МТ для бинарной смеси этилен – R23. Экспериментальные данные и расчёт.

При изучении теплообмена в парожидкостных потоках многокомпонентных хладагентов обнаружен ряд особенностей. Так, для бинарной смеси фреона R125 и азота экспериментальные данные резко расходятся с результатами расчетов.

В результате обработки и анализа всех полученных данных по исследованию теплообмена в парожидкостных потоках, сделано предположение, что низкие скорости хладагента между пластинами, в совокупности со сложной геометрией МТ, способствуют накоплению жидкой фазы в каналах, обогащенной высококипящим компонентом смеси. В этом случае вероятна сложная картина течения в которой поток газа, обогащенный низкокипящим компонентом, не находится в фазовом равновесии с потоком жидкости, обогащенным высококипящим компонентом. В результате между ними могут осуществляться реакции смешения с выделением или поглощением тепла, что отражается на результатах экспериментов. Например, расчётным путём показано, что при смешении чистых азота и фреона R125, при параметрах (температуре и давлении), близких к средним значениям по теплообменнику, осуществляется эндотермическая реакция. В результате, температура потока после смешения понижается на 16 град.

Для проверки этого предположения было проведено отдельное экспериментальное исследование на аналогичной смеси, для дроссельной системы с теплообменником типа «труба в трубе». В таком теплообменнике исключается накопление жидкой фазы, а режим течения парожидкостного потока можно отнести к дисперсному. Средние скорости смеси в трубе были увеличены до 4 м/с. Экспериментальные результаты этого исследования хорошо согласуются с результатами расчета цикла с использованием различных уравнений состояния, что косвенно подтверждает справедливость высказанного выше предположения.

Четвёртая глава посвящена оценке погрешностей экспериментальных результатов. Определены основные приведенные погрешности измерительных приборов и датчиков. Проведены расчёты по оценке полной погрешности всех прямых и косвенных измерений.

Максимальная погрешность измерения температуры составила  $\pm 0,3\%$ , давление потока высокого давления измерялось с точностью  $\pm 2,5\%$ , для измерения давления обратного потока максимальная погрешность  $\pm 6\%$ .

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований впервые были получены новые экспериментальные данные по характеристикам теплообмена и гидродинамики МТ в составе ДРС при работе на современных хладагентах. Исследования, проведенные для пяти чистых рабочих тел (гелий, азот, этилен, R14, R23) и пять смесевых хладагентов (гелий – азот, азот – R14, этилен – R23, азот – R125, этилен – R14 – R236fa), подтвердили низкие гидравлические сопротивления МТ. Все эти вещества озонобезопасные и экологически чистые. Они могут применяться как отдельные, независимые хладагенты, так и в качестве компонентов многокомпонентных рабочих тел на различные температурные уровни охлаждения.
2. Полученные результаты исследований теплопередачи и гидравлического сопротивления МТ систематизированы, обобщены и представлены в виде аппроксимационных зависимостей вида  $\xi(\text{Re})$  и  $\text{Nu}(\text{Re})$ . Эти зависимости могут быть использованы для расчёта рекуперативных теплообменников матричного типа с круглой перфорацией, собранных со смещением.
3. Экспериментально было показано, что соотношения, используемые для расчета теплопередачи и гидравлического сопротивления МТ, полученные для чистых газов, в полной мере применимы и для газовых

смесей. При этом компоненты смеси могут существенно отличаться по своим нормальным температурам кипения и молекулярному весу.

4. Гидравлическое сопротивление парожидкостных потоков МРТ в матричных теплообменниках хорошо описывается обобщенной зависимостью, полученной для чистых газов и газовых смесей.

5. В процессе исследования теплообмена в парожидкостных потоках обнаружен ряд особенностей в установлении фазового равновесия в матричном теплообменнике. Так, при низких скоростях в канале теплообменника (средняя скорость потока между пластинами  $\approx 0,1$  м/с) создаются условия для накопления жидкой фазы и раздельного течения двухфазного потока. При этом, жидкость, обогащенная высококипящим компонентом смеси не находится в фазовом равновесии с газовым потоком, обогащенным низкокипящим компонентом. В результате, между фазами могут происходить экзо- и эндотермические реакции.

6. Экспериментально показано, что при увеличении скорости потока и изменении геометрии канала в теплообменнике, например в теплообменниках типа «труба в трубе», описанные эффекты практически не наблюдаются.

Полученные результаты могут применяться при анализе работы дроссельных систем, а также при проектировании матричных и других типов теплообменников со схожей геометрией (пластинчатых и пластинчато-ребристых) для работы на многокомпонентных рабочих телах.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Балашов А.В. Установка на  $-70/-100$  °С для низкотемпературной закалки легированных сталей // Тезисы докладов 23-й Международной молодежной конференции. М.: МАТИ, 2007. Т.1. С. 46-47.

2. Балашов А.В. Использование элементов матричных теплообменников в установках газификации сжиженного кислорода // Тезисы докладов 14-й международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М.: Изд. дом МЭИ, 2008. Т. 3. С. 27-28.
3. Некоторые подходы при выборе стеклянных прослоек для соединения металлических пластин / О.А. Барабанова, В.И. Могорычный, А.В. Балашов и др. // Материалы и оборудование для производства паяных конструкций. Материалы семинара. М.: ЦРДЗ, 2008. Ч. 2. С. 30-37.
4. Исследование оксидной пленки алюминиевого сплава АД-1 для процессов сварки и пайки теплообменной техники / О.А. Барабанова, В.И. Могорычный, А.В. Балашов и др. // ПАЙКА-2009. Вопросы высокотемпературной и низкотемпературной пайки. Материалы семинара. М.: ЦРДЗ, 2009. Ч.2. С.16-22.
5. Быстрозакаленные материалы и покрытия / О.А. Барабанова, В.И. Могорычный, А.В. Балашов и др. // Тр. 8-й Всероссийской научно-технической конференции. М.: МАТИ, 2009. С. 306-319.
6. Балашов А.В. Матричные теплообменники для дроссельных рекуперативных систем // Тезисы докладов 15-й международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М.: Изд. дом МЭИ, 2009. Т. 3. С. 70-71.
7. Балашов А.В. Экспериментальные исследования матричного теплообменника в составе дроссельной регенеративной системы // Тезисы докладов 16-й международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М.: Изд. дом МЭИ, 2010. Т. 3. С. 101-102.
8. Балашов А. В., Могорычный В. И. Экспериментальное исследование гидравлических характеристик матричного теплообменника // Вестник МЭИ, 2010. №2. С. 38-41.

Подписано в печать 19.05.10 Зак. 128 Тир. 100 П.л. 1,25  
 Полиграфический центр МЭИ(ТУ)  
 Красноказарменная ул., д.13

*Айсуей сөзбүчөсү сөзүмүзү - 9 ч 12.*