

3. Кузьмин Б. А., Абраменко Ю. Е., Кудрявцев В. А. Технология металлов и конструкционные материалы. М. : Машиностроение, 1989.
4. Айзерман М. А. Классическая механика. М. : Наука, 1980.
5. Способ диагностики и оценки виброактивности станков, работающих с лезвийным инструментом : пат. 2332652 С1 Рос. Федерация : МПК G01M 7/00 / Филиппов Ю. А., Ручкин Л. В., Раменская Е. В. Оpubл. 27.08.2008, Бюл. № 24.
6. Углов А. Л., Ерофеев В. И., Смирнов А. Н. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации. М. : Наука, 2009.
7. Раменская Е. В. Анализ виброактивности металлорежущих станков // Вестник СибГАУ. Вып. 6. (13). 2006. С. 86–89.

E. V. Ramenskaya, Yu. A. Philippov, N. A. Amelchenko

## MECHANISM OF GENERATING AND DISTRIBUTION OF VIBRATION IN TECHNOLOGICAL MACHINES

*New results of the researches in the sphere of mechanics of technological processes of rocket and space products technology are presented, the mechanism of vibration appearance, on the basis of formation and distribution of chain reaction of oscillation process in technological machines, is considered.*

*Keywords: mechanism, vibration, technological process, modeling.*

© Раменская Е. В., Филиппов Ю. А., Амелченко Н. А., 2012

УДК 583.975 + 621.318.1

В. А. Семячков, А. Н. Рыбакова, В. С. Жигалов, В. Г. Мягков

## ТВЕРДОФАЗНЫЕ РЕАКЦИИ В ПЛЕНОЧНЫХ ДВУСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

*Исследованы фазовые превращения и магнитные свойства пленочных слоистых структур Fe/Pd и CoCr при термообработке. Показано, что в двухслойных пленках Fe/Pd, выращенных на подложках из MgO, в зависимости от толщинных соотношений железа и палладия и от температуры отжига в системе формируются две упорядоченные фазы –  $L1_0$ -FePd(001) и  $L1_2$ -FePd<sub>3</sub>(001). Исследования магнитных свойств фаз показали, что  $L1_0$ -фаза является высокоанизотропной, обладает перпендикулярной анизотропией и большой величиной коэрцитивной силы, а  $L1_2$ -фаза – магнитомягкая и имеет высокие значения намагниченности насыщения.*

*Показано, что в пленках системы CoCr появляется перпендикулярная анизотропия, которая вызвана уменьшением значения анизотропии формы и фактом текстурированности и расположения пленки гексагональной с-осью нормально плоскости пленки. Твердофазный синтез в системе CoCr приводит к образованию фазы твердого раствора хрома на базе гексагонального кобальта  $\epsilon$ -Co(Cr). Полученные результаты имеют как научное, так и прикладное значение.*

*Ключевые слова: твердофазный синтез, реакция, пленки, переходные металлы.*

Тонкие пленки являются материалами, с помощью которых можно найти решение многих задач современной наноэлектроники. Структурные и магнитные свойства тонких пленок FePd, упорядоченных по типу  $L1_0$ , исследуются в связи с их потенциальной пригодностью для высокоплотной магнитной записи информации и создания специальных магнито жестких сред [1; 2]. Упорядоченные FePd<sub>3</sub>-пленки в настоящее время изучены недостаточно и поэтому их исследование представляет научный и практический интерес. Система Co/Cr – это перспективный материал для использования в качестве сред с возможностью перпендикулярной записи информации и также еще не до конца изучена [3–5].

Получение этих пленочных систем методом твердофазного синтеза (ТФС) еще не производилось. В связи с этим в данной работе обращалось внимание на возможные механизмы и процессы, способствующие синтезу фаз в исследуемых системах, а также изучались магнитные и анизотропные свойства этих пленок [6; 7].

Идентификация фаз проводилась с использованием рентгеноструктурного анализа. Полученные результаты позволяют рекомендовать использование твердофазных межслойных химических взаимодействий для синтеза пленочных образцов с меньшими энергетическими и экономическими затратами [8].

Работа выполнена при финансовой поддержке АВИЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2011)», проект № 2.1.1/9193.

**Образцы и методика эксперимента.** Для получения образцов был использован новый способ изготовления пленок – твердофазный синтез. В качестве исходных образцов были изготовлены две серии пленок Fe(001)/Pd(001) на подложках из монокристаллического MgO(001) с атомным соотношением железа и палладия 1/1 и 1/3, а также образцы Co/Cr с атомным соотношением кобальта и хрома 1/1, 1/3 и 1/4 на подложках из кварцевого стекла. Двухслойные структуры изготавливались методом электронной бомбардировки тигельных испарителей с кольцевым катодом, в вакууме  $10^{-6}$  торр на установке вакуумного напыления УВН-2М-1. Для определения толщин слоев был использован рентгенофлуоресцентный анализ. В дальнейшем исходные образцы подвергались термическому отжигу в диапазоне от 300 до 700 °С с шагом в 50° и выдержкой при каждой температуре в течение 30 мин. В результате термообработки между слоями формировались последовательности фаз [9; 10].

После каждой ступени отжига и охлаждения до комнатной температуры в образцах измерялись первая константа магнитной анизотропии и намагниченность насыщения методом крутящих моментов с максимальным магнитным полем 18 кЭ, а также исследовались структурные и фазовые превращения. Идентификация образовавшихся фаз была проведена на дифрактометре ДРОН-4-07 (CuK $\alpha$ -излучение). Рентгенографические исследования эпитаксиальной ориентации фаз проводились на дифрактометре PANalytical X'Pert Pro с матричным твердотельным детектором PIXel. В пленках CoCr наряду с намагниченностью

насыщения определялись ориентации осей легкого намагничивания относительно плоскости пленки.

**Результаты исследования пленок системы Fe/Pd.** Получена зависимость первой константы анизотропии ( $K_1$ ) от температуры отжига для пленок с атомным соотношением Fe/Pd, равным 1/1 и 1/3 (рис. 1). Видно, что в образцах, при отжиге вплоть до 400 °С, практически отсутствуют изменения анизотропных свойств по отношению к исходным образцам. Однако отжиги при  $T > 400$  °С приводят к увеличению константы анизотропии в пленках с атомным соотношением 1/1 примерно на порядок и к частичному исчезновению анизотропии в пленках с соотношением 1/3. Такая модификация анизотропных свойств должна приводить к различным значениям коэрцитивности ( $H_C$ ). Как показали дополнительные исследования магнитостатических свойств, коэрцитивная сила в первом случае выросла и составляет ~1 кЭ, в другом случае пленки становятся магнотмягкими и  $H_C$  составляет менее 1 Э (рис. 2).

Получены зависимости намагниченности насыщения ( $M_S$ ) для тех же образцов от температуры отжига ( $T$ ) (рис. 3), из которых видно, что для обеих структур относительная намагниченность насыщения увеличивается по мере увеличения  $T$ . Однако для пленки с атомным соотношением 1/3 это увеличение составило более чем 60 %. Легко предположить, что рост значений  $M_S$  связан с приростом магнитного момента за счет магнитной поляризации атомов палладия. При этом большее содержание палладия в образце приводит к большему увеличению намагниченности.

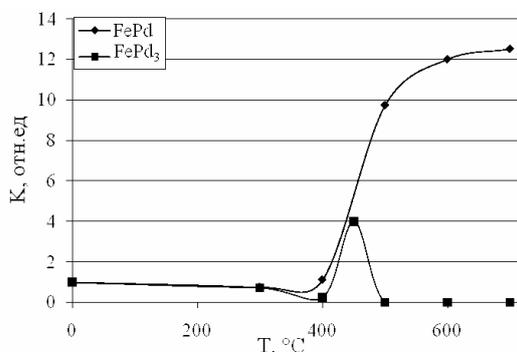


Рис. 1. Зависимость константы анизотропии от температуры отжига для образцов FePd и FePd $_3$

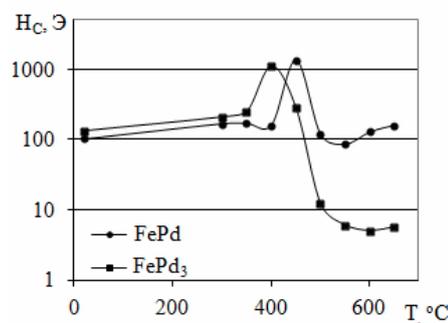


Рис. 2. Зависимость коэрцитивной силы от температуры отжига для образцов FePd и FePd $_3$

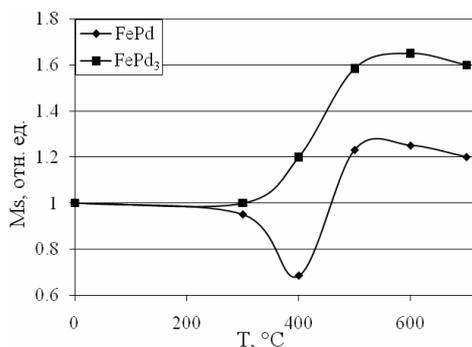


Рис. 3. Зависимость относительной намагниченности насыщения от температуры отжига для образцов FePd и FePd $_3$

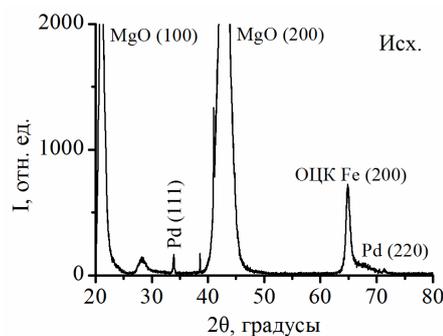


Рис. 4. Рентгенограмма исходного образца Fe/Pd

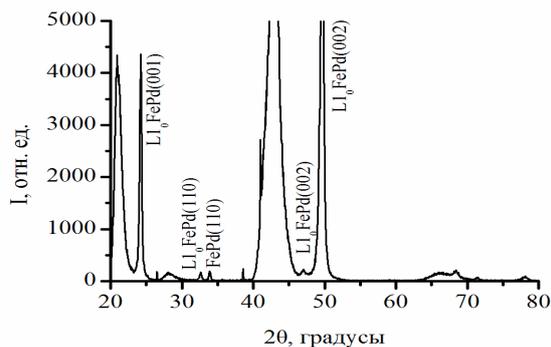


Рис. 5. Рентгенограмма с образца FePd, отожженного при температуре 600 °С

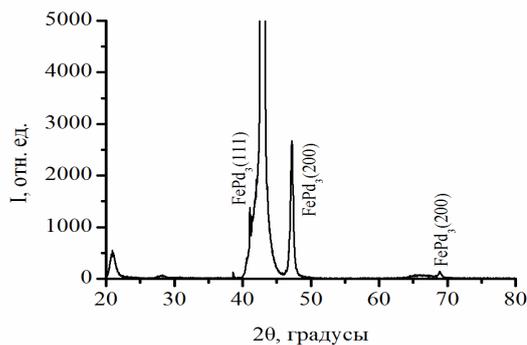


Рис. 6. Рентгенограмма образца FePd<sub>3</sub>, отожженного при температуре 600 °С

Изменения магнитных и анизотропных свойств связаны с фазовыми превращениями в двухслойных структурах Fe/Pd под воздействием отжига. Анализ рентгеновских измерений показал, что слои Fe и Pd в исходном состоянии растут на подложках MgO эпитаксиально (рис. 4). В процессе отжига на базе этих эпитаксиальных слоев формируются основные фазы L1<sub>0</sub>-FePd для пленки с соотношением атомов 1/1 при T = 400 °С (рис. 5) и L1<sub>2</sub>-FePd<sub>3</sub> для пленки с соотношением Fe/Pd = 1/3 при T = 550 °С (рис. 6). Первая фаза имеет тетрагональное искажение решетки, что и явилось причиной появления высокой анизотропии, вторая фаза имеет простую кубическую решетку без существенных анизотропных свойств. Следует отметить, что фазы формируются с высокой степенью упорядочения, о чем свидетельствует появление запрещенной плоскости (001).

**Результаты исследования пленок системы Co/Cr.** Получены графики зависимостей намагниченности насыщения от температуры отжига в образцах Co/Cr разного состава, из которых были определены температуры инициирования начала протекания твердофазных реакций и особенности процесса синтеза новых фаз (рис. 7).

Как видно, значения намагниченности меняются с повышением температуры отжига, при этом в зависимости от атомного соотношения кобальта и хрома в системе ход указанных зависимостей существенно разный. До T = 390 °С величина намагниченности соответствует исходным значениям, а при T > 400 °С наблюдается резкое уменьшение M<sub>S</sub>, что несомненно связано с началом твердофазной межслойной реакции. Следует отметить, что спад намагниченности тем больше, чем больше содержание хрома в системе. Уменьшение значения M<sub>S</sub> с необходимостью приводит к уменьшению величины поля плоскостной анизотропии формы (H<sub>→</sub> = 4πM<sub>S</sub>). Анизотропия формы способствует формированию оси легкого намагничивания (ОЛН) в плоскости пленки.

Представлены определенные с помощью анизометра направления легкой оси в пленках Co/Cr с разным концентрационным составом и отожженных при T ~ 500 °С (рис. 8). Как видно, при содержании хрома 25 ат. % ось легкого намагничивания лежит в плоскости пленки. Увеличение содержания хрома до 33 ат. %

способствует выходу вектора намагниченности из плоскости пленки на угол примерно в 45°. Содержание хрома в системе, равное 50 ат. %, способствует появлению перпендикулярной анизотропии, при этом угол выхода намагниченности близок к 90°. Для появления перпендикулярной магнитной анизотропии в пленочных образцах необходимо, чтобы механизмы, ответственные за перпендикулярную анизотропию, преобладали над механизмами, определяющими плоскостную анизотропию (H<sub>↓</sub> > H<sub>→</sub>). С уменьшением намагниченности плоскостная анизотропия (H<sub>→</sub>) уменьшается, а для определения механизмов, ответственных за появление H<sub>↓</sub>, были проведены рентгеноструктурные исследования [11].

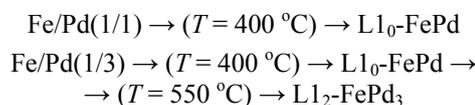
Рентгеноструктурные исследования были проведены на пленках с содержанием хрома 50 ат. % в зависимости от температуры отжига (рис. 9). Пленки с таким содержанием реагентов, отожженные при температуре более 450 °С, имели текстурированную структуру с преобладающим рефлексом ε-Co(Cr)(002), который стал причиной появления перпендикулярной анизотропии.

Анализ рентгеновских спектров позволяет обратить внимание на две особенности.

1. Температурная обработка приводит к формированию фазы, обладающей гексагональной плотной упаковкой, подобной кристаллографии элементарного кобальта. В таблице приведены сравнительные значения кристаллографических рефлексов ε-Co и вновь синтезированной фазы Co-Cr.

2. В процессе твердофазного синтеза фаза Co(Cr) растет с высокой степенью текстурированности. Основным становится рефлекс (002), который и определяет кристаллографическую с-ось гексагональной упаковки. С увеличением температуры отжига степень текстурированности возрастает [11].

Таким образом, удалось установить последовательность фазовых превращений в зависимости от температуры термообработки двухслойных тонкопленочных структур Fe/Pd/MgO(001) с атомным соотношением веществ 1/1 и 1/3:



Соответствие параметров решетки  $\epsilon$ -Co и  $\epsilon$ -Co(Cr)

Фазы	$d(hkl)$	$d(hkl)$	$d(hkl)$	$d(hkl)$
$\epsilon$ -Co	2,18 (100)	2,06 (002)	1,92 (101)	1,49 (102)
$\epsilon$ -Co(Cr)	2,16 (100)	2,02 (002)	1,91 (101)	1,44 (102)

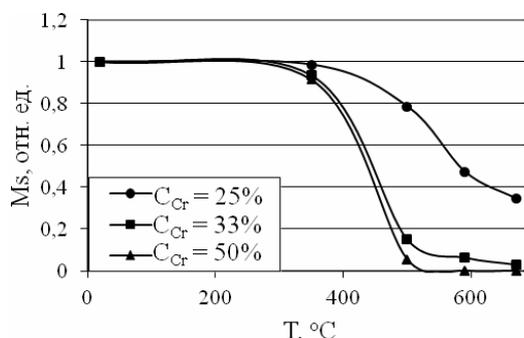


Рис. 7. Влияние температуры отжига  $T$  на намагниченность насыщения  $M_S$

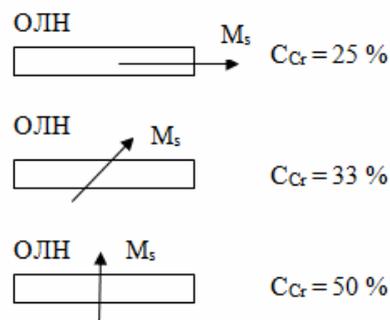


Рис. 8. Зависимость изменения направления анизотропии от концентрации хрома

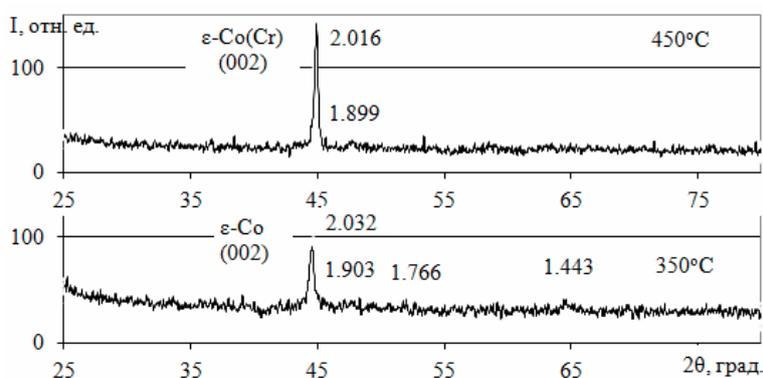


Рис. 9. Рентгеновские спектры в пленке Co(Cr) состава 50 ат. % в зависимости от температуры отжига

Термообработка образцов Fe/Pd при температуре более 400 °C приводит к увеличению константы анизотропии в пленках с атомным соотношением 1/1 практически в 12 раз и к полному исчезновению анизотропии в пленках с атомным соотношением 1/3. Использование высокоанизотропных пленок FePd в будущем позволит увеличить плотность записи информации на пластинах для магнитной записи данных.

Измерения намагниченности насыщения ( $M_S$ ) показали, что при температуре отжига 600 °C у пленок с атомным соотношением 1/1 зафиксирован рост намагниченности на атом железа примерно на 20 %. Для пленки с атомным соотношением Fe/Pd, равным 1/3, увеличение  $M_S$  составляет 60 % в сравнении с намагниченностью исходного образца.

Для пленок CoCr различных составов установлено следующее.

1. Температура инициирования твердофазных реакций ~400 °C.
2. Основной синтезированной фазой является твердый раствор хрома в  $\epsilon$ -Co.
3. Синтезированные пленки  $\epsilon$ -Co(Cr) состава 50 ат. % хрома обладают перпендикулярной магнитной анизотропией.

4. Причиной появления перпендикулярной анизотропии является уменьшение анизотропии формы (плоскостной анизотропии) и текстурированный рост пленки гексагональной  $c$ -осью нормально к плоскости пленки.

Полученные результаты представляют большой научный и прикладной интерес и нуждаются в дальнейшем исследовании.

#### Библиографические ссылки

1. Твердофазный синтез эпитаксиальных  $L1_0$ -FePd(001) тонких пленок: структурные превращения и магнитная анизотропия / В. Г. Мягков, В. С. Жигалов, Л. Е. Быкова и др. Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91. Вып. 9. С. 399–403.
2. Piramanayagam S. N. Perpendicular recording media for hard disk drives // J. of App. Physics. 2007. Vol. 102. № 1. P. 30.
3. Magnetization process in FePd thin films / O. Klein [et al.] // J. of App. Physics. 2001. Vol. 89. № 11. P. 6781–6783.
4. Казаков В. Г. Тонкие магнитные пленки // Соросовский журн. 1997. № 1. С.107–114.
5. Методы получения магнитных слоев и исследования их физических свойств : учеб. пособие /

В. С. Жигалов, С. Н. Варнаков, К. П. Полякова и др. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008.

6. Мягков В. Г., Жигалов В. С. Твердофазные реакции и фазовые превращения в слоистых наноструктурах. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2011.

7. Жигалов В. С., Мацынин А. А. Твердофазный синтез магнитных пленок // Решетневские чтения : материалы XII Междунар. науч.-практич. конф. Красноярск, 2008. С. 204–205.

8. Быкова Л. Е. Твердофазный синтез в двухслойных тонких металлических пленках, вызванный мартенситными превращениями в продуктах реакции : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Красноярск, 2004. С. 23.

9. Особенности твердофазного синтеза парамагнитной фазы и мартенситных превращений в тонких Ni/Fe(001)MgO(001)-пленках / В. Г. Мягков, В. С. Жигалов, Л. Е. Быкова и др. // Докл. РАН. 2006. Т. 410. № 5. С. 1–4.

10. Твердофазный синтез эпитаксиальных Co<sub>7</sub>Sm<sub>2</sub>(110) нанопленок: структурные и магнитные свойства / В. С. Жигалов, В. Г. Мягков, Л. Е. Быкова и др. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Вып. 6. С. 445–449.

11. Жигалов В. С., Мацынин А. А. Магнитные и фазовые превращения в пленках системы CoCr // Актуал. пробл. авиации и космонавтики : материалы науч.-практич. конф. студентов и молодых ученых. Красноярск, 2008.

V. A. Semyachkov, A. N. Rybakova, V. S. Zhigalov, V. G. Myagkov

### SOLIDPHASE REACTIONS IN FILM TWO-LAYERS STRUCTURES OF TRANSION METALS

*In this work the authors investigate phase transformations and magnetic properties of film layer-type structures Fe/Pd and CoCr, under heat treatment. The authors show that according to thickness ratio rating of iron vs palladium, generated on substrates from MgO, and according to annealing temperature, two ordered phases are formed in the system – L1<sub>0</sub>-FePd(001) and L1<sub>2</sub>-FePd<sub>3</sub>(001). Examinations of magnetic properties of the phases revealed that the L1<sub>0</sub>-phase is high anisotropic and possesses perpendicular anisotropy, and the L1<sub>2</sub>-phase is soft magnetic and has high values of saturation magnetization.*

*Along with it the authors show that in CoCr system films there appears a perpendicular anisotropy which is caused by reduction of value of anisotropy form and the fact of texture and film arrangements of hexagonal c-axis of normally to plane of the film. Solid phase synthesis in the system Co-Cr leads to formation of a phase of solid solution of chrome on base of hexagonal cobalt ε-Co(Cr). The obtained results have a scientific, as well as applied value.*

*Keywords: solid phase synthesis, reaction, film, transition metal.*

© Семячков В. А., Рыбакова А. Н., Жигалов В. С., Мягков В. Г., 2012

УДК 536.248.2 ; 532.574.2

А. В. Серяков, А. В. Конькин, В. К. Белоусов

### ПРИМЕНЕНИЕ СТРУЙНОГО ПАРОВОГО СОПЛА В ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ СРЕДНЕТЕМПЕРАТУРНОГО ДИАПАЗОНА

*Представлена часть комплексного расчетно-экспериментального исследования интенсификации теплопередающих характеристик тепловых труб среднего температурного диапазона.*

*При торцовом (аксиальном) направлении теплового потока на входе в тепловую трубу, характерном для коротких тепловых труб, появляется возможность использования струйного парового сопла, аналогичного соплу Лавалья и окруженного слоем капиллярно-пористой вставки вдоль всей длины тепловой трубы, что увеличивает скорость потока пара.*

*Ключевые слова: тепловые трубы среднего температурного диапазона, капиллярно-пористая вставка, капиллярные инжекторы пара, сопло Лавалья.*

Проблема интенсификации теплопередающих характеристик среднетемпературных тепловых труб (ТТ), применяемых для охлаждения теплонагруженных элементов электронной техники, в том числе внутри космического аппарата, в настоящее время исключительно актуальна. Теплопередача и эксплуатационная эффективность ТТ с капиллярно-пористыми вставками определяется замкнутым циркуляционным движением теплоносителя, претерпевающим фазовый пере-

ход «жидкость–пар» с поглощением тепла в зоне испарения капиллярно-пористой вставки, перенос паровой фазы по конфузорно-диффузорному паровому каналу, фазовый переход «пар–жидкость» с выделением тепла в зоне конденсации, и возврат жидкости по капиллярно-пористой вставке в зону испарения ТТ.

Для оценки предельных теплопередающих способностей и выбора теплоносителя для тепловых труб