

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

применяют параметр качества жидкостей, определяемый согласно выражению

$$\Psi = \frac{\rho \cdot r \cdot \sigma}{\mu},$$

где  $\Psi$  – параметр качества теплоносителей, Вт/см<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность теплоносителей, кг/м<sup>3</sup>;  $r$  – удельная теплота испарения, кДж/кг;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

Получены температурные зависимости параметра качества  $\Psi$  ряда теплоносителей, приемлемых для применения в тепловых трубах среднетемпературного диапазона (рис. 1).

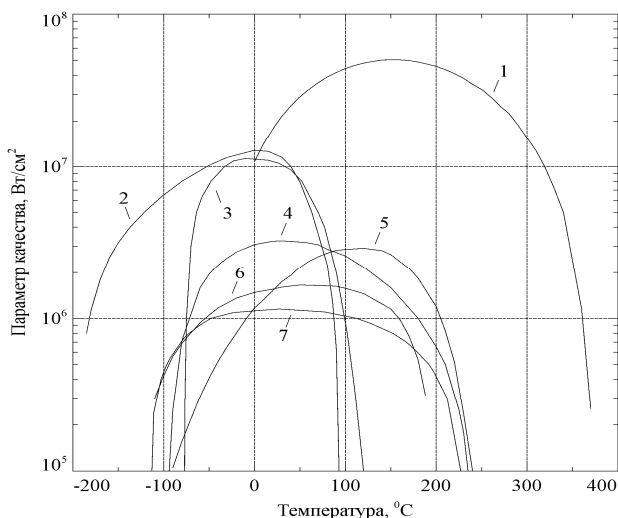


Рис. 1. Параметр качества жидких рабочих тел,  $\Psi$ , Вт/см<sup>2</sup>: 1 – вода H<sub>2</sub>O; 2 – пропилен C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>; 3 – аммиак NH<sub>3</sub>; 4 – ацетон C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O; 5 – этиловый спирт C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH; 6 – диэтиловый эфир C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O; 7 – метиловый спирт CH<sub>3</sub>OH

Расчет параметров  $\Psi$  проводился по имеющимся в литературе теплофизическим данным, с использованием степенной интерполяции. Видно, что температурный диапазон применения теплоносителей узок и в основном не превышает 300 °С.

В качестве основного теплоносителя выбран диэтиловый эфир C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O, температура кипения  $T_B$  которого при атмосферном давлении равна 35,4 °С, температура замерзания  $T_F = -116,2$  °С и критические параметры  $T_K = 193,4$  °С,  $P_K = 3,61$  МПа.

Успешный опыт использования диэтилового эфира в качестве рабочего тела для камер Вильсона [1], с длительным нахождением жидкой фазы при температуре 140 °С, показывает его термостойкость и возможность применения в качестве теплоносителя для тепловых труб.

При торцовом направлении теплового потока на входе в тепловую трубу, характерном для коротких ТТ, предпочтительным конструктивным решением является выполненный из металлического капиллярно-пористого материала плоский испаритель, плотно прилегающий к плоской нижней крышке и снабженный инжектирующими паровыми каналами.

Рассмотрим схему ТТ с плоским испарителем, конфузorno-диффузорным паровым каналом и турбулизатором (рис. 2) [2–6]. Длина тепловых труб 100 мм, диаметр 20 мм.

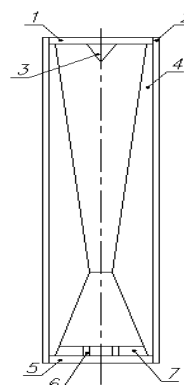


Рис. 2. Схема тепловой трубы:

- 1 – верхняя крышка; 2 – цилиндрическая обечайка ТТ;
- 3 – конический турбулизатор; 4 – капиллярно-пористая вставка;
- 5 – нижняя крышка; 6 – капиллярные инжектирующие каналы;
- 7 – нижняя плоская капиллярно-пористая вставка-испаритель

При небольших диаметрах тепловых труб, выполненных из нержавеющей стали, применение плоских крышек возможно из-за их умеренного теплового сопротивления, простоты и технологичности изготовления.

Перенос паровой фазы происходит по паровому каналу, расположенному вдоль центральной оси капиллярно-пористой вставки, в свою очередь плотно установленной и механически зафиксированной в тонкостенном цилиндрическом корпусе ТТ с верхней и нижней крышками.

Центральное расположение парового канала, выполненного в виде газодинамического конфузorno-диффузорного сопла, аналогичного соплу Лавалю, окруженного слоем капиллярно-пористой вставки вдоль всей длины ТТ, позволяет существенно уменьшить теплопотери.

Без слоя капиллярно-пористой вставки паровое сопло заметно охлаждается внешним теплообменом, вследствие чего пар в пограничном слое у стенок сопла становится пересыщенным. В результате нарушается нормальный режим истечения паровой струи: в потоке в участках диффузора, близких к критическому сечению, преждевременно появляется большое количество микрокапелек конденсата теплоносителя. При этом происходит значимое увеличение расхода струи пара и ее замыкание на стенках капиллярно-пористой вставки, что снижает предельные параметры теплопередачи ТТ.

Конденсационные скачки, образующиеся в расширяющейся части сопла, сопровождаются тепловыделением и под воздействием двух факторов (теплового и геометрического) течение паровой струи может потерять устойчивость.

Переменное сечение капиллярно-пористой вставки с максимальным значением толщины вблизи критиче-

ского сечения сопла и уменьшающейся толщиной в области испарения и конденсации защищает паровой поток от переохлаждения таким образом, что конденсация начинает происходить лишь вблизи лобовой точки турбулизатора и далее на внутренней поверхности верхней крышки ТТ, при температуре торможения паровой струи, превышающей температуру испарения.

Перегрев  $\Delta T$  потока пара на выходе из сопла, обусловленный превышением температуры торможения над температурой кипения рабочей жидкости в испарителе ТТ, учитывают с помощью введения эффективного значения теплоты конденсации [7; 8] по формуле

$$r_{\text{eff}} = r + C_p'' \cdot \Delta T,$$

где  $r_{\text{eff}}$  – эффективное значение теплоты конденсации, Дж/кг;  $C_p''$  – теплоемкость перегретого пара, Дж/кг·К;  $\Delta T$  – разность между температурой, перегретого пара и его температурой насыщения при данном давлении, К. Величина перегрева  $\Delta T$  при высоких тепловых нагрузках на тепловую трубу достигает 50 К. Степень сжатия газодинамического конфузорно-диффузорного сопла выбрана такой же, как у сопла Лавала.

Для интенсификации парообразования в зоне испарения при малых тепловых нагрузках применяют несколько инжектирующих паровыводных каналов, пронизывающих нижнюю плоскую капиллярно-пористую вставку-испаритель, плотно прилегающую к плоской нижней крышке ТТ. Диаметр инжектирующих каналов достигает 1 мм, и пониженное капиллярное давление приводит к снижению температуры кипения и парообразования теплоносителя в этих каналах, что оказалось очень существенным при малых тепловых нагрузках ТТ и соответственно при небольших начальных скоростях течения пара над испарителем.

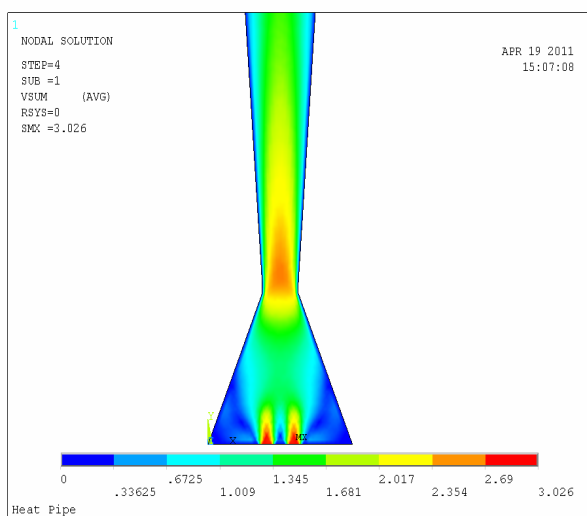


Рис. 3. Результаты расчетов скорости течения струй пара диэтилового эфира, см/с, над инжектирующими паровыми каналами в испарительной части ТТ при малой тепловой нагрузке

Вычисление скорости потока пара было проведено с помощью программы ANSYS. Решали уравнения Навье–Стокса и теплопроводности с граничными условиями 3-го рода, т. е. с фиксированными значениями температуры источника и стока тепла ТТ. Модель исследовали в виде продольного сечения вдоль осевых линий двух инжекторных каналов, что сохранило все особенности вихревой нестационарности при условии непрерывного замкнутого циркуляционного движения теплоносителя в жидкой и паровой фазах.

Экспериментальное определение скорости потока пара диэтилового эфира  $C_4H_{10}O$  было проведено в критическом сечении сопла с использованием проволочного термоанемометра с нагретой нитью [9; 10]. Перпендикулярно продольной оси ТТ на высоте критического сечения сопла к внешней поверхности обечайки лазерной сваркой приварен отрезок трубки-держателя из нержавеющей стали, диаметром 6 мм и длиной 15 мм. Резьбовой хвостовик трубки-держателя на длине 5 мм содержит 4 продольных паза, шириной 0,3 мм каждый, сдвинутые друг относительно друга на  $90^\circ$ , которые вместе с внешней накидной гайкой со вставкой с коническим каналом образуют фиксатор датчика термоанемометра. Датчик термоанемометра представляет собой отрезок тонкостенной капиллярной трубки из ковара, диаметром 2 мм и толщиной стенки 0,05 мм, внутрь которой введены остеклованные коваровые токовводы диаметром 0,3 мм. Герметизацию внутреннего пространства капиллярной трубки и механическую фиксацию токовводов проводят с помощью стеклопорошка С-48-5, которым заполняют пространство внутри трубки с одной стороны при постоянном виброуплотнении, и в специальной оправке спекают при температуре  $1000 \pm 20^\circ\text{C}$ . Образующаяся внутренняя капля стекла с одной стороны трубки на глубину 5...6 мм надежно герметизирует токовводы, а с противоположной стороны трубки вставляют тефлоновый фиксатор с двумя отверстиями для токовводов.

С помощью миниатюрной сварочной машины СМС-6 наваривают чувствительный элемент – кусочек проволоки – на выступающие из капли стекла токовводы.

Диаметр проволоки золото–железо 5 мкм, удельное электрическое сопротивление  $2,8 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{м}$ , температурный коэффициент сопротивления  $3,9 \cdot 10^{-3} 1/\text{К}$ .

Внешнюю поверхность тонкостенной капиллярной трубки датчика термоанемометра покрывают тонким слоем силиконового герметика и по скользящей посадке по внутреннему каналу трубки-держателя вводят в паровой канал ТТ на заданную глубину таким образом, чтобы проволочка располагалась в середине критического сечения сопла с ориентацией, перпендикулярной продольной оси ТТ. После вулканизации герметика и закручивания внешней накидной гайки на хвостовике трубки-держателя ТТ готова для дегазации капиллярно-пористой вставки, заполнения теплоносителем и общей герметизации.

Калибровку термоанемометра проводили в специальных опытах на расходомерной шайбе и эталонном

критическом сопле, устанавливаемых в ориентированном вертикально вверх рабочем участке сифонной тепловой трубы-гипсометра [2].

Перепад давления на расходомерной шайбе измеряли с помощью преобразователя разности давлений «Сапфир-22ДД» и микроманометра ММН-240, в качестве теплоносителя сифонной ТТ использовали диэтиловый эфир. Мембранный блок преобразователя «Сапфир-22ДД» и подводные линии в процессе всех измерений поддерживали при температуре 35 °С.

Принцип действия термоанемометра внутри работающей тепловой трубы основан на конвективной потере тепла нагретой проволокой датчика в потоке насыщенного пара. Электрическая мощность  $P_0$ , выделяемая проволокой термоанемометра при протекании через него тока подогрева  $I_0$ , теряется конвекцией  $P_{\text{conv}}$ , кондукцией  $P_{\text{cond}}$  и излучением, причем вкладом излучения из-за его малости при данных температурах и давлениях пренебрегают:

$$P_0 = P_{\text{conv}} + P_{\text{cond}}.$$

Кондуктивный вклад в теплотери по тоководам, называемым балками каркаса термоанемометра, оценивают следующим образом [7; 8; 11]:

$$P_{\text{cond}} = 2 \cdot \lambda_C \cdot \Pi_C \cdot \omega_C \cdot (T_W - T_{\text{St}}) \cdot \frac{\text{sh}(\omega_C \cdot L)}{\text{ch}(\omega_C \cdot L)},$$

где  $\lambda_C$  – коэффициент теплопроводности каркаса, Вт/м·К;  $\Pi_C$  – суммарный периметр сечения каркаса, м;  $T_W$  – температура проволоки термоанемометра, К;  $T_{\text{St}}$  – температура потока пара, К;  $L$  – длина каркаса, м; параметр  $\omega_C$  вычисляют из выражения

$$\omega_C = \sqrt{\frac{\alpha_C \cdot \Pi_C}{\lambda_C \cdot S_C}}$$

где  $\alpha_C$  – коэффициент теплоотдачи каркаса конвекцией, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $S_C$  – площадь сечения каркаса, м<sup>2</sup>.

Коэффициент теплоотдачи каркаса  $\alpha_C$  оценивают стандартным образом [11; 12]:

$$\text{Nu}_C = C \cdot \text{Pr}^n \cdot \text{Re}_C^m,$$

где  $\text{Nu}_C = \alpha_C \cdot D_C / \lambda_{\text{St}}$  – число Нуссельта балок каркаса;  $\text{Re}_C = \rho_{\text{St}} \cdot u \cdot D_C / \mu_{\text{St}}$  – число Рейнольдса балок каркаса;  $\text{Pr} = \mu_{\text{St}} \cdot C_P / \lambda_{\text{St}}$  – число Прандтля;  $D_C$  – диаметр балок каркаса, м;  $\rho_{\text{St}}$  – плотность пара, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda_{\text{St}}$  – коэффициент теплопроводности пара, Вт/м·К;  $C_P$  – теплоемкость пара, Дж/кг·К;  $C, n, m$  – константы, зависящие от формы сечения балок и диапазона чисел Рейнольдса  $\text{Re}$  [11; 12];  $u$  – скорость течения потока пара, м/с;  $\mu_{\text{St}}$  – коэффициент динамической вязкости пара, Па·с.

Кондуктивный вклад в теплотери выделяемой мощности  $P_{\text{cond}}$  в данной работе достигал 18,5 %.

При стационарных условиях в потоке пара устанавливается состояние теплового равновесия для проволоки датчика: тепловая мощность  $P_0 - P_{\text{cond}}$ , выделяющаяся при прохождении электрического тока по проволоке, отводится потоком пара. Вид функциональной зависимости между напряжением на проволоке датчика и средней скоростью потока пара выводится из рассмотрения процесса теплообмена с ок-

ружающей средой проволоки, расположенной перпендикулярно потоку. Этот процесс описывают эмпирическим соотношением

$$\text{Nu}_W = 0,42 \cdot \text{Pr}^{0,2} + 0,57 \cdot \text{Pr}^{0,33} \cdot \text{Re}_W^{0,5}, \quad (1)$$

где  $\text{Nu}_W = \alpha_W \cdot d_W / \lambda_{\text{St}}$  – число Нуссельта проволоки датчика;  $\text{Re}_W = \rho_{\text{St}} \cdot u \cdot d_W / \mu_{\text{St}}$  – число Рейнольдса проволоки датчика;  $d_W$  – диаметр проволоки датчика, м;  $\alpha_W$  – коэффициент теплоотдачи проволоки, Вт/м<sup>2</sup>·К.

Для двухатомных газов и паров выражение (1) справедливо в диапазоне чисел Рейнольдса

$$10^{-2} \leq \text{Re} < 10^4.$$

Уравнение теплового баланса проволоки термоанемометра имеет вид

$$(P_0 - P_{\text{cond}}) = \pi \cdot \ell \cdot \lambda_{\text{St}} \cdot (T_W - T_{\text{St}}) \times \\ \times (0,42 \cdot \text{Pr}^{0,2} + 0,57 \cdot \text{Pr}^{0,33} \cdot \text{Re}_W^{0,5}),$$

где  $\ell$  – длина проволоки, м.

Термоанемометр измерял среднюю во времени продольную компоненту скорости  $u$  свободного потока пара с коэффициентом перегрева нити 0,8, собственно калибровка была проведена с использованием модифицированного уравнения Кинга [9; 10]:

$$u = k_1 \cdot (E^2 - E_0^2)^{1/j} + k_2 \cdot (E - E_0)^{1/2},$$

где  $E, E_0$  – выходные напряжения термоанемометра при наличии скорости потока пара и ее отсутствии;  $k_1, k_2$  и  $j$  – константы, определяемые при калибровке.

Сигнал с нити термоанемометра усиливают в 10 раз и подают на вход 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и далее в компьютер, где данные измерений накапливают в памяти в виде массива и затем подвергают программной обработке стандартным логарифмическим методом.

Максимальная ошибка при калибровке термоанемометра не превышает 10 % от значения скорости  $u$ . Погрешность измерения среднего во времени значения продольной компоненты скорости потока пара с помощью термоанемометра достигает 30 % ( $\pm 0,3$  см/с).

Результаты измерений скорости потока пара в критическом сечении сопла в зависимости от величины температурного напора  $\delta T = T - T_B$  на внешней поверхности испарителя ТТ приведены на рис. 4 [3–6; 13]. Здесь же проведено сравнение экспериментальных значений скоростей потока пара в критическом сечении сопла и в стандартном цилиндрическом паровом канале ТТ в зависимости от температуры перегрева испарителя над температурой кипения диэтилового эфира, при равной площади сечений каналов.

Проведено сравнение скоростей потоков пара, выпускаемых пористым испарителем с капиллярными инжектирующими каналами и плоским пористым испарителем без инжектирующих каналов в зависимости от температуры перегрева испарителя над температурой кипения диэтилового эфира (рис. 5).

Число Рейнольдса  $\text{Re} = 0,06$ . Число Прандтля  $\text{Pr} = 0,77$ .

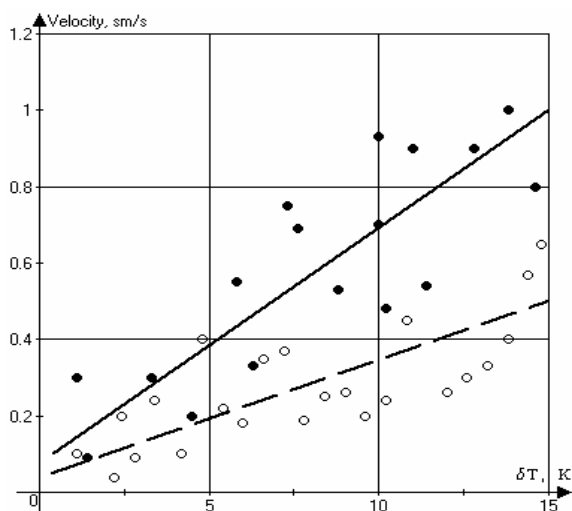


Рис. 4. Сравнение экспериментальных значений скорости потока пара, см/с, измеренных в критическом сечении сопла (●) и в стандартном цилиндрическом паровом канале (○) в зависимости от величины перегрева испарителя  $\delta T$  над температурой кипения теплоносителя, К, при одинаковой площади сечения паровых каналов и на одинаковом расстоянии от испарителя. Сплошной линией обозначены расчетные аппроксимирующие значения скорости в критическом сечении сопла, пунктирной – скорости в стандартном цилиндрическом канале, см/с

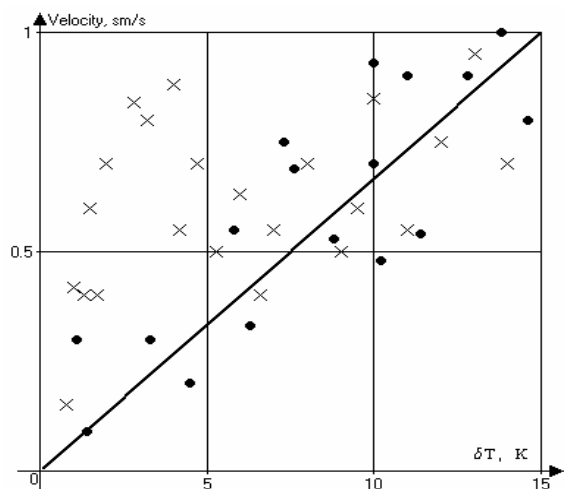


Рис. 5. Сравнение экспериментальных значений скорости потоков пара, см/с, измеренных в критическом сечении сопла, выпускаемых испарителем с инжектирующими паровыми каналами (×) и испарителем без инжектирующих паровых каналов (●) в зависимости от величины перегрева испарителя  $\delta T$  над температурой кипения теплоносителя, К. Сплошной линией обозначены расчетная кривая скорости потока пара над испарителем без инжектирующих паровых каналов, см/с

Положительные свойства сопла Лавалья проявляют себя и в тепловых трубах, где движение капельного теплоносителя в паровой фазе близко к конвективному и проблема интенсификации теплопередающих характеристик за счет увеличения скорости потока в паровом канале весьма значима.

Экспериментально подтверждено увеличение скорости потока пара внутри парового канала ТТ, выполненного в виде сопла, близкого к соплу Лавалья, по сравнению со стандартным цилиндрическим паровым каналом.

При оснащении мелкопористого испарителя сквозными капиллярными инжектирующими каналами при малых тепловых нагрузках скорость потока пара над каналами оказывается выше, чем над мелкопористым испарителем без каналов. При дальнейшем увеличении тепловой нагрузки на ТТ разница скоростей потоков пара над испарителями с инжектирующими каналами и без них уменьшается и становится меньше погрешности измерений.

#### Библиографические ссылки

1. Glaser A. Наблюдение следов быстрых заряженных частиц в жидкостной камере // УФН. 1954. Т. 52. № 1. С. 167–170.
2. ГОСТ 8.563.1–9. Диафрагмы, сопла ИСА 1932 и трубы Вентури, установленные в заполненных трубопроводах круглого сечения [Электронный ресурс]. URL: <http://gostexpert.ru> (дата обращения: 31.01.2012).
3. Специальная система охлаждения матричных фотоприемных устройств / А. В. Серяков, В. А. Карачинов, С. В. Ильин, К. И. Ившин // Соврем. телевидение и радиоэлектроника : тр. 19 Междунар. науч.-техн. конф. М., 2011. С. 78–79.
4. Seryakov A. V., Konkin A. V., Belousov V. K. The intensification of heat-transfer characteristic of heat pipes // Proc. of the VIII Minsk Intern. Seminar of Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources. Vol. 2. Minsk, 2011. P. 59–65.
5. Пат. на полезную модель № 95812 РФ, МПК F 28D 15/00 / Устройство заполнения тепловых труб несмачивающей жидкостью / Серяков А. В. Оpubл. 10.07.2010. Бюл. 19.
6. Пат. № 2431101 РФ, МПК F 28D 15/00 / Способ заполнения тепловых труб / Серяков А. В. Оpubл. 10.10.2011. Бюл. 28.
7. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление : справ. пособие. М. : Энергоатомиздат, 1990.
8. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. 5-е изд., перераб. и доп. М. : Атомиздат, 1979.
9. Бредшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение. М. : Мир, 1974.
10. Ярин Л. П., Генкин А. Л., Кукес В. И. Термометрия газовых потоков. Л. : Машиностроение, 1983.
11. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров : справочник : пер с англ. М. : Атомиздат, 1979.
12. Жукаускас А. А. Конвективный перенос в теплообменниках. М. : Наука, 1982.
13. Серяков А. В., Конькин А. В., Белоусов В. К. Увеличение скорости струи в паровом канале тепловых труб среднетемпературного диапазона // Решетневские чтения : материалы XV Междунар. науч. конф. Ч. 1. Красноярск, 2011. С. 354–355.

A. V. Seryakov, A. V. Konkin, V. K. Belousov

## APPLICATION OF STEAM JET NOZZLE IN HEAT PIPES OF MEAN TEMPERATURE RANGE

*The work presents a part of a complex rated experimental research of heat-transfer intensification characteristics of the heat pipes of medium temperature range.*

*At the butt (axial) direction of heat flow at the inlet into the heat pipe, being characteristic for the space application, appears a possibility of the jet steam nozzle usage which is analogous to the Laval nozzle and surrounded with a capillary porous insertion layer along the whole length, which increases the steam flow velocity and the heat pipe limit parameters.*

*Keywords: heat pipe of the medium temperature range, capillary porous insertion, capillary steam injectors, Laval nozzle.*

© Сeryakov A. V., Konkin A. V., Belousov V. K., 2012

УДК 62-233.3/9

А. П. Смирнов, А. А. Иптышев, Д. В. Вавилов, А. В. Шигина

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ ВНУТРЕННЕГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ С МАЛОЙ РАЗНОСТЬЮ ЧИСЕЛ ЗУБЬЕВ. ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД

*Представлена реализация объектно-ориентированной модели в виде программного комплекса для синтеза и моделирования взаимодействия геометрии разномодульных зубчатых пар внешнего и внутреннего зацепления GearAnalysis, выполнение синтеза геометрии разномодульной зубчатой пары внутреннего взаимодействия и ее анализ в САЕ-пакетах.*

*Ключевые слова: зубчатые колеса, объектно-ориентированная модель, объектно-ориентированная декомпозиция, синтез зубчатых пар, имитационное моделирование.*

Разработка программ с большим количеством объектов и программных модулей требует проведения объектно-ориентированного анализа расчетных моделей и объектно-ориентированной декомпозиции задачи. При этом не существует общепризнанного наилучшего способа проведения декомпозиции, но в ряде источников [1; 2] при создании моделей рекомендуется заострять внимание на сущностях, характерных для исследуемой предметной области, в данном случае на зубчатых парах (рис. 1).

Проектирование зубчатых передач (ЗП) по заданным показателям качества является достаточно сложной технической задачей. При декомпозиции данного процесса можно выделить следующие основные объекты: объект с параметрами зубчатого колеса (профиль, возможно, параметры ступицы и др.), объект с параметрами зубчатой передачи (к таковым можно отнести межосевое расстояние), объект с моделью описания профилей зубчатых колес, объект с алгоритмом вычисления граничных условий кривых, образующих профиль зубчатого колеса, объект с алгоритмом для выполнения анализа зубчатой пары (нахождение точек контакта, получение углов входа/выхода из зацепления, получение передаточной функции, линии зацепления и др.), кроме того, объекты для импорта/экспорта геометрии зубчатых пар в другие программные продукты. Также при решении задачи разработки программного обеспечения необ-

ходимо выделить служебные объекты, позволяющие наращивать базовый функционал и осуществлять адаптацию под требуемую задачу или CAD/CAE-среду. По многообразию используемых сущностей и их свойств можно судить о сложности разрабатываемого программного обеспечения.

После проведения объектно-ориентированной декомпозиции была создана объектно-ориентированная модель (рис. 2), на основе которой был разработан программный комплекс для синтеза геометрии и моделирования взаимодействия зубчатых пар GearAnalysis.

В данную объектно-ориентированную модель заложен функционал обеспечения синтеза геометрии разномодульных зубчатых пар внешнего и внутреннего зацепления, позволяющий выполнять визуальное моделирование взаимодействия зубчатых пар и подключать дополнительные программные модули, например, программный модуль для экспорта геометрии в CAD-среду. Таким образом, можно сделать вывод, что данная объектно-ориентированная модель дает возможность решать задачи автоматизированного проектирования зубчатых передач с применением плагинов автоматизированной передачи зубчатых колес с наиболее приближенным профилем в CAD/CAE-среды для проведения компьютерных анализов работоспособности зубчатых передач и включения в состав проектируемых изделий.