

УДК 51-74+533.6.011.6+62-176

А.А. Цынаева

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ<sup>1</sup>**

**Цынаева Анна Александровна**, кандидат технических наук, доцент, окончила Ульяновский государственный технический университет, работает доцентом кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» ФГБОУ ВПО Самарский государственный архитектурно-строительный университет. Имеет статьи и разработки в области математического моделирования теплообменных процессов в технике. [e-mail: a.tsinaeva@rambler.ru].

## Аннотация

Интенсивность теплообмена в устройствах на основе газодинамической температурной стратификации, например, в сверхзвуковой трубе температурной стратификации (в трубе Леонтьева) определяется величиной теплового потока через разделяющую стенку между дозвуковым и сверхзвуковым потоками. В работе проведено математическое моделирование и численное исследование теплообмена в устройствах газодинамической температурной стратификации с использованием пассивных методов интенсификации. Исследовалась эффективность применения тепловых труб (ТТ) и металлических ребер той же конфигурации. Математическое моделирование осуществлялось с использованием математической модели. Математическая модель включает дифференциальные уравнения, описывающие движение и теплообмен в пограничном слое, уравнения для расчета процессов теплообмена в ТТ, уравнения для расчета теплового потока между дозвуковым и сверхзвуковым потоками в устройстве газодинамической температурной стратификации.

Выявлено, что интенсификация теплообмена в устройствах на основе газодинамической температурной стратификации (в трубе Леонтьева) за счет применения тепловых труб увеличивается до 3 раз. Установлено, что использование фитильных ТТ с рабочим материалом медь–вода эффективнее ТТ с рабочим материалом алюминий – ацетон в 1,05...1,12 раза.

Ключевые слова: математическое моделирование, численное исследование, температурная стратификация, интенсификация, тепловые трубы.

**NUMERICAL INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE STRATIFICATION**

**Anna Aleksandrovna Tsinaeva**, Candidate of Engineering; graduated from Ulyanovsk State Technical University; Associate Professor at the Department of Heat-and-gas Supply and Ventilation of Samara State University of Architecture and Civil Engineering; an author of development works and articles in the field of mathematical modeling of heat-exchange processes in engineering. e-mail: a.tsinaeva@rambler.ru.

## Abstract

The intensity of heat and mass transfer in devices based on the gas-dynamic temperature stratification, for example, in a supersonic pipe temperature stratification (in the Leontief's pipe) is determined by the heat flow through the separation wall between subsonic and supersonic flows. This paper presents the mathematical modeling and numerical study of heat transfer in devices of gas-dynamic temperature stratification using passive stimulation techniques. The efficiency of heat pipes (HP) and the metal edges of the same configuration were researched. Mathematical modeling was performed using a mathematical model. The mathematical model includes differential equations that describe the motion and heat transfer in the boundary layer; equations for calculation of heat transfer processes in heat pipes; equations to calculate the heat flow between subsonic and supersonic flows in the device of gas-dynamic temperature stratification.

It was found that the intensification of heat transfer devices based on the gas-dynamic temperature stratification (in the Leontief's pipe) through the use of heat pipes is increasing up to 3 times. It was established that the use of heat pipes with a wick of material copper-water is more of using efficiency of heat pipes with the working material in the aluminum-acetone up to 1.05 ... 1.12 times.

Key words: mathematical modeling, numerical investigation, temperature stratification, intensification, heat pipes.

<sup>1</sup> Работа выполнялась в рамках гранта РФФИ №12-08-31091.

## ВВЕДЕНИЕ

Условия создания образцов современной техники требуют разработки и использования адекватных математических моделей для прогнозирования характеристик объекта на стадии проектирования. Сверхзвуковая труба температурной стратификации является перспективным теплообменным аппаратом, позволяющим осуществлять подогрев потока газа из-за наличия перепада температур между температурой восстановления газа на стенке и температурой торможения. Однако эффективность сверхзвуковой трубы температурной стратификации во многом зависит от условий ее использования (свойств рабочего тела, скоростей потоков и т. д.) и определяется совершенством конструктивного исполнения устройства для конкретных условий применения. В этой связи математическое моделирование и численное исследование теплообмена в сверхзвуковой трубе температурной стратификации с пассивными интенсификаторами (прямыми плоскими продольными ребрами и ТТ, выполненными в виде таких ребер) представляется актуальным и практически значимым.

Математическое моделирование и численное исследование интенсификации теплообмена проводилось на основе численного исследования коэффициентов восстановления температуры и теплоотдачи в трубе Леонтьева. Это позволило оценить эффективность использования ТТ как интенсификаторов газодинамической температурной стратификации.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Работа устройства [1, 2] газодинамической температурной стратификации (труба Леонтьева) основана на реализации переноса тепла между потоками газа с разными числами Маха, разделенными стенкой.

Схема устройства газодинамической температурной стратификации (трубы Леонтьева) представлена на рисунке 1 [1–3].

Движущей силой процесса является температурный напор – разница температур между температурой восстановления газа на стенке и температурой торможения. При сверхзвуковых скоростях (число Маха  $M > 1$ ) и при числе Прандтля  $Pr < 0,2$ , температура восстановления будет значительно ниже температуры торможения.

Методы повышения эффективности газодинамической температурной стратификации разделяются на технологические и технические [2–4]. Технологические методы влияют на свойства рабочего тела с целью управления процессами температурной стратификации (при использовании водородо-кислородной, водородо-аргоновой и гелий-кислородных смесей, дисперсных потоков). К техническим методам относятся методы, дорабатывающие конструкцию трубы температурной стратификации (наличие лунок, перфораций, ребер, генераторов скачков уплотнения и т. д.) [2–4].

Использование ТТ для повышения эффективности температурной стратификации представляется перспективным решением [2–5].

Задача повышения эффективности газодинамической температурной стратификации может быть решена за счет увеличения коэффициента теплопередачи, температурного напора или поверхности теплообмена. Этим условиям отвечает устройство газодинамической температурной стратификации с тепловыми трубами, схема которого представлена на рисунке 1б [2–4].

Математическое моделирование осуществлялось с использованием оригинальной математической модели [2–4]. Математическая модель включает дифференциальные уравнения, описывающие движение и теплообмен в пограничном слое для расчета коэффициентов теплоотдачи и восстановления высокоскоростных газовых и дисперсных потоков; уравнения для расчета процессов теплообмена в ТТ; уравнения для расчета теплового потока между дозвуковым и сверхзвуковым потоками в устройстве газодинамической температурной стратификации.

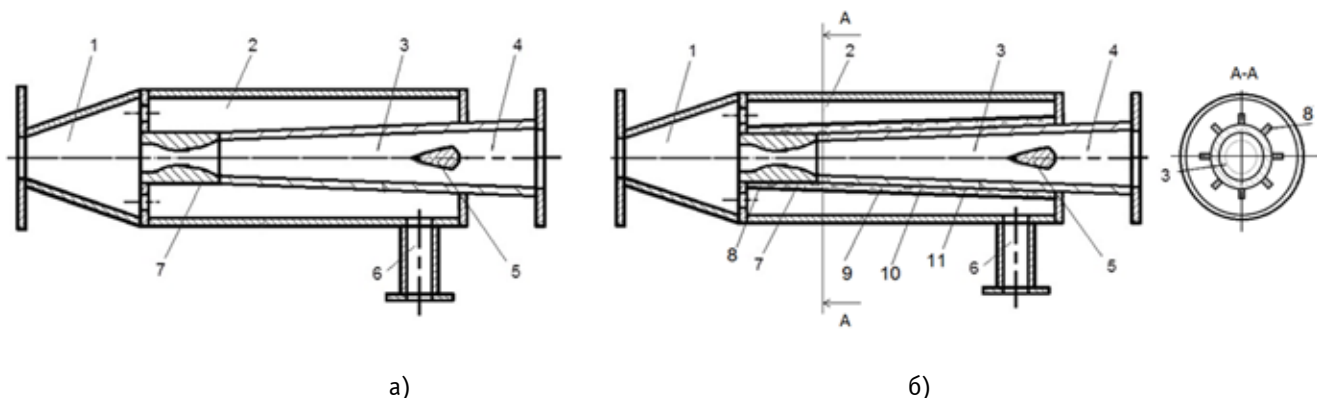


Рис. 1. Схема сверхзвуковой трубы температурной стратификации:

а) без тепловых труб; б) с тепловыми трубами;

1 – разделительная камера; 2 – тракт дозвукового течения; 3 – тракт сверхзвукового течения, 4 – выходной патрубок тракта сверхзвукового течения; 5 – сверхзвуковой диффузор; 6 – выходной патрубок тракта дозвукового течения; 7 – сверхзвуковое сопло (сопло Лавалю); 8 – тепловая труба, выполненная в виде продольного ребра; 9 – зона испарения ТТ; 10 – фитиль тепловой трубы; 11 – зона конденсации ТТ

кации с ТТ. Температура стенки со стороны сверхзвукового потока  $T_{r2}$ , профили скорости и температуры в сечениях пограничного слоя, коэффициенты восстановления  $r$  и теплоотдачи  $\alpha$  определяются в результате численного решения системы уравнений [2–4], описывающих движение и теплообмен в пограничном слое, включающей: дифференциальное уравнение энергии, дифференциальное уравнение движения, дифференциальное уравнение неразрывности, уравнение состояния.

Граничные условия при расчете коэффициента восстановления температуры определялись так же, как в работе [2–4]. Теплофизические свойства рабочего тела определялись в зависимости от температуры. Влияние продольного градиента давления и иных воздействий учитывается наличием в системе уравнений пограничного слоя членов, характеризующих внутренние источники теплоты, импульса момента движения [3, 4], и применением модифицированной модели турбулентности пути смешения Прандтля [3, 4].

Сопротивление теплопередачи для ТТ определялось выражением [2–4]:

$$R_{\Sigma} = \sum R_{cm} + R_{исп} + \sum R_{fn} + R_{кан} + R_{кон}, \quad (1)$$

где  $\sum R_{cm}$  – термическое сопротивление для стенок ТТ;

$R_{исп}$  – термическое сопротивление испарительной зоны ТТ;

$\sum R_{fn}$  – термическое сопротивление зоны фазового перехода;

$R_{кан}$  – термическое сопротивление зоны парового канала ТТ;

$R_{кон}$  – термическое сопротивление конденсационной зоны ТТ.

Так как циркуляция теплоносителя в ТТ осуществляется за счет использования фитиля (рис. 1 б), то термическое сопротивление стенки ТТ с фитилем в виде прямоугольных канавок в зоне испарения определялось как [6]:

$$R_{исп} = \frac{r_{mp} \cdot \delta_{cm}}{2 \cdot L_{исп} \cdot \lambda_{cm}}, \quad (2)$$

где  $r_{mp}$  – внешний эквивалентный радиус ТТ;

$\delta_{cm}$  – толщина стенки ТТ;

$L_{исп}$  – длина зоны испарения в ТТ,

$\lambda_{cm}$  – коэффициент теплопроводности стенки.

Термическое сопротивление насыщенного жидкостью фитиля в виде прямоугольных канавок [6] в зоне испарения:

$$R_{испф} = \frac{r_{mp}^2 \cdot \delta_{\phi}}{2 \cdot L_{исп} \cdot r_{внут} \cdot \lambda_{эф_{испф}}}, \quad (3)$$

где эффективная теплопроводность фитиля в виде прямоугольных канавок в зоне испарения определялась как:

$$\lambda_{эф_{испф}} = \frac{(\omega_{кр} \cdot \lambda_{жс} \cdot \lambda_{cm} \cdot \delta_{кф}) + \omega \cdot \lambda_{жс} (0,185 \cdot \omega_{кр} \cdot \lambda_{cm} + \delta_{кф} \cdot \lambda_{жс})}{(\omega_{кр} + \omega) \cdot (0,185 \cdot \omega_{кр} \cdot \lambda_{cm} + \delta_{кф} \cdot \lambda_{жс})}, \quad (4)$$

где  $\omega$  – ширина канавки фитиля ТТ;

$\omega_{кр}$  – ширина ребра канавки фитиля ТТ;

$\lambda_{жс}$  – теплопроводность рабочей жидкости ТТ;  $\lambda_{жс} = \lambda(T, P)$ ;

$\delta_{кф}$  – глубина канавки фитиля ТТ;

$r_{mp}$  – внешний эквивалентный радиус ТТ;

$r_{внут}$  – внутренний эквивалентный радиус ТТ;  $\delta_{\phi}$  – толщина фитиля.

Термическое сопротивление парового потока в ТТ [6] с фитилем в виде прямоугольных канавок:

$$R_{пар} = \frac{\pi \cdot r_{mp}^2 \cdot T_{\phi} \cdot f_{\kappa} \cdot \left( \frac{1}{6} L_{исп} + L_{\kappa} + \frac{1}{6} L_{кон} \right) \cdot \Delta v}{r}, \quad (5)$$

где  $\pi$  – константа Пифагора;

$T_{\phi}$  – температура в зоне раздела фаз;

$f_{\kappa}$  – коэффициент трения для потока пара в ТТ с фитилем в виде прямоугольных канавок;

$L_{\kappa}$  – длина транспортной зоны ТТ с фитилем в виде прямоугольных канавок;

$L_{кон}$  – длина зоны конденсации в ТТ с фитилем в виде прямоугольных канавок;

$\Delta v$  – изменение удельного объема в фазовом переходе;

$r_{исп}$  – теплота парообразования (конденсации) рабочей жидкости ТТ.

Термическое сопротивление стенки ТТ с фитилем в виде прямоугольных канавок в зоне конденсации [6]:

$$R_{конф} = \frac{r_{mp}^2 \cdot \delta_{\phi}}{2 \cdot L_{кон} \cdot r_{внут} \cdot \lambda_{эф_{конф}}}. \quad (6)$$

$$\text{Здесь } \lambda_{эф_{конф}} = \frac{\lambda_{жс} \cdot \omega + \omega_{кр} \cdot \lambda_{cm}}{\omega + \omega_{кр}}.$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ проведен применительно фитильным ТТ, выполненным в виде прямых плоских продольных ребер (рис. 16) постоянной толщины.

Сравнение результатов осуществлялось для двух случаев:

1) при наличии фитильных ТТ и без них. ТТ с фитилем в виде прямоугольных канавок (рабочие среды ТТ: медь – вода).

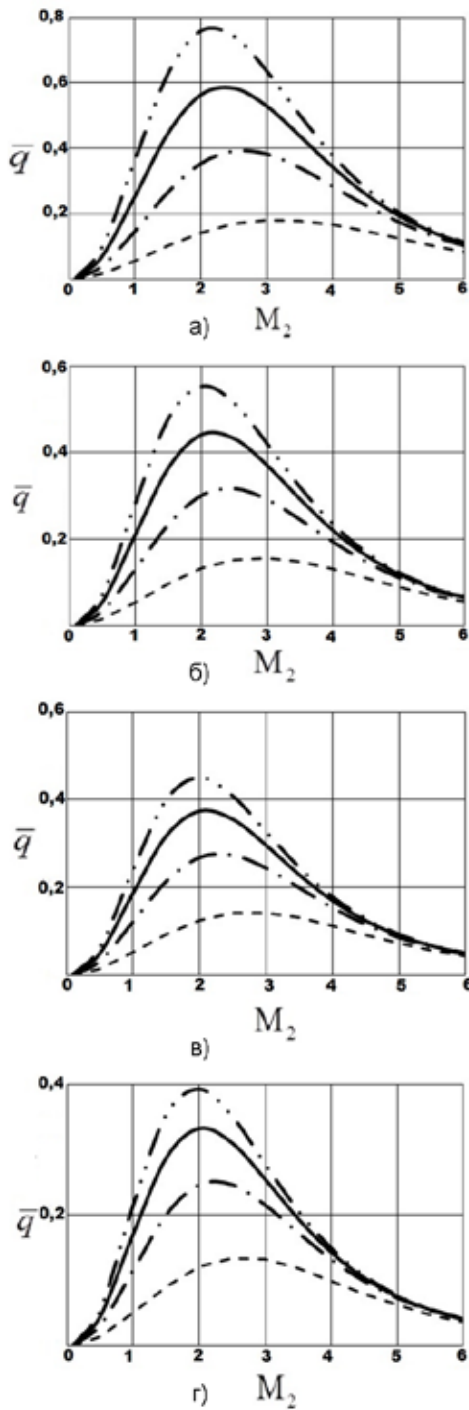


Рис. 2. Влияние числа Маха и относительной длины ТТ с фитилем в виде прямоугольных канавок на температурную стратификацию дисперсного потока:

- а) для  $M_1 = 0,1$ ;      б) для  $M_1 = 0,2$ ;
- в) для  $M_1 = 0,3$ ;      г) для  $M_1 = 0,4$ ;
- без ТТ;
- с ТТ, относительной длиной  $l/\delta = 2$ ;
- · — · — с ТТ, относительной длиной  $l/\delta = 5$ ;
- · · · · с ТТ, относительной длиной  $l/\delta = 10$

2) при наличии фитильных ТТ (рабочие среды ТТ: медь – вода, алюминий – ацетон) и при использовании металлических ребер.

Было принято, что коэффициенты теплоотдачи к поверхности ТТ и к неоребренной поверхности равны [4]. На рисунке 2 представлены результаты моделирования для значений  $\gamma = 1,4$ ,  $Pr = 0,7$  (несущая среда – воздух),  $M_1 = 0,1 \dots 0,4$ ,  $Re_{wx2} = 10^6$ , для  $G = 5 \cdot 10^{-7}$  – параметр, характеризующий наличие конденсированных частиц в потоке рабочей среды для модифицированной трубы Леонтьева с ТТ (рис. 16) с фитилем в виде прямоугольных канавок, рабочие материалы ТТ медь – вода. Здесь  $\bar{q}$  – относительный тепловой поток  $\bar{q} = q/q_{max}$  (значение  $q_{max}$  рассчитано при  $\alpha_2 = \infty$ ,  $T_2 = 0$ ) в сверхзвуковой трубе температурной стратификации определяется выражением:

$$\bar{q} = (1-r) \cdot \frac{1 - \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_2^2\right)}{\frac{1}{0.5 + \eta_p \left(\frac{1}{\delta} + 0.5\right)} + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}} \quad (8)$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты;

$r$  – коэффициент восстановления температуры;

$M$  – число Маха;

$\eta_p$  – коэффициент эффективности тепловой трубы–ребра [4];

$\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи в дозвуковом тракте;

$\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи в сверхзвуковом тракте.

Представлено сравнение с трубой Леонтьева без ТТ и без ребер (рис. 1а). Эффективность температурной стратификации возрастает в 3,9 раза при  $M_1 = 0,1$  и  $l/\delta = 10$  с использованием ТТ (медь – вода) с фитилем в виде прямоугольных канавок, при  $M_1 = 0,2$  и  $l/\delta = 10$  – в 3 раза, при  $M_1 = 0,3$  и  $l/\delta = 10$  – в 2,72 раза, при  $M_1 = 0,4$  и  $l/\delta = 10$  – в 2,66 раза (рис. 2).

На рисунке 3 представлены результаты моделирования температурной стратификации дисперсного потока для модифицированной трубы Леонтьева с ТТ с фитилем в виде канавок:  $\gamma = 1,4$ ,  $Pr = 0,7$  (несущая среда – воздух),  $M_1 = 0,1$ ,  $Re_{wx2} = 1000000$ ,  $G = 5 \cdot 10^{-7}$ ,  $M_2 = 3$ .

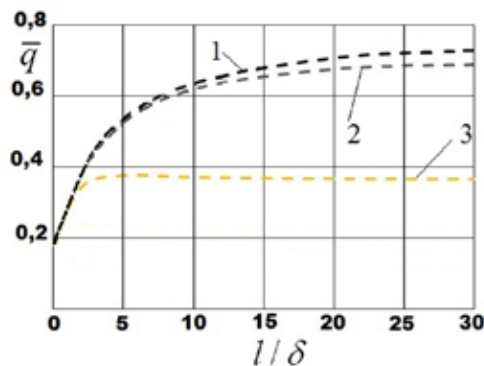


Рис. 3. Влияние числа Рейнольдса  $Re_{wx2}$  и относительной длины ТТ с фитилем в виде прямоугольных канавок на температурную стратификацию дисперсного потока: 1 – для ТТ с рабочими материалами медь – вода; 2 – для ТТ с рабочими материалами алюминий – ацетон; 3 – металлическое ребрение

Анализируя представленные на рисунке 3 результаты моделирования температурной стратификации дисперсного потока для модифицированной трубы Леонтьева с ТТ с фитилем в виде канавок, можно сказать, что использование фитильных ТТ с рабочим материалом медь – вода эффективнее применения ТТ с рабочим материалом алюминий – ацетон в 1,05...1,12 раза. При этом эффективность применения ТТ значительно превышает эффективность использования металлических ребер той же конфигурации в 1,2...2 раза.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение ТТ значительно увеличивает качество температурной стратификации газа и дисперсного потока и позволяет повысить эффективность газодинамической температурной стратификации в трубе Леонтьева до 3 раз.

Использование фитильных ТТ с рабочим материалом медь – вода эффективнее ТТ с рабочим материалом алюминий – ацетон в 1,05...1,12 раза.

С увеличением относительной длины ТТ  $l/d=0...5$  эффективность их использования возрастает до 3 раз. Рост  $l/d=5...10$  не ведет к значительному увеличению теплового потока от дозвукового к сверхзвуковому потоку рабочего тела. При увеличении  $l/d=10...30$  увеличения качества температурной стратификации практически не происходит для всех исследованных конструкций ТТ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2468309 Российская Федерация, МПК F25B9/02. Труба температурной стратификации / Цынаева А.А., Волкова Т.Н., Магазинник К.М., Сагитова К.Р.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Ульяновский государственный технический университет. – № 2011114941; заявл. 20.06.2011, опубл. 27.11.2012; Бюл. № 33. – 5 с.
2. Цынаева А.А., Цынаева Е.А., Школин Е.В. Математическое моделирование температурной стратификации в модифицированной трубе Леонтьева с тепловыми трубами // Автоматизация процессов управления. – 2013. – № 2 (32). – С. 29–35.
3. Цынаева А.А., Цынаева Е.А., Школин Е.В. Исследование температурной стратификации в модифицированной трубе Леонтьева с тепловыми трубами // Тепловые процессы в технике. – 2013. – № 5 (10). – С. 440–444.
4. Цынаева А.А., Цынаева Е.А., Школин Е.В. Интенсификация температурной стратификации турбулентных потоков за счет использования тепловых труб // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2013. – № 3–4. – С. 33–38.

5. Цынаева А.А., Цынаева Е.А., Школин Е.В. Возможность повышения эффективности систем охлаждения электрических машин // Тр. 13-й Межд. конф. по электрическим машинам, устройствам и энергетическим системам, ELMA 2011. Варна, Болгария: Technical University of Varna, 2011. – С. 51–54.

6. Чи С. Тепловые трубы: Теория и практика / пер. с англ. В.Я. Сидорова. – М. : Машиностроение, 1981. – 207 с.

### REFERENCES

1. Russian Federation Patent 2468309, Int.Cl.: F25B9/02. Truba temperaturnoy stratifikatsii [Temperature Stratification Pipe]. Inventors: Tsynaeva A.A., Volkova T.N., Magazinnik K.M., Sagitova K.R. Applicant and proprietor: Ulyanovsk State Technical University. Application: 2011114941. Date of filing: June 20, 2011. Date of publication: November 27, 2012. Bull. No. 33. 5 p.
2. Tsynaeva A.A., Tsynaeva E.A., and Shkolin E.V. Matematicheskoye modelirovaniye temperaturnoy stratifikatsii v modifitsirovannoy trube Leontyeva s teplovymi trubami [Mathematical Modeling of the Temperature Stratification of the Modified Leontief Pipe with Heat Pipes]. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* [Automation of Control Processes], 2013, no. 2 (32), pp. 29–35.
3. Tsynaeva A.A., Tsynaeva E.A., and Shkolin E.V. Issledovaniye temperaturnoy stratifikatsii v modifitsirovannoy trube Leontyeva s teplovymi trubami [Research Investigation for the Temperature Stratification of the Modified Leontief Pipe with Heat Pipes]. *Teplovyeye protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2013, no. 5 (10), pp. 440–444.
4. Tsynaeva A.A., Tsynaeva E.A., and Shkolin E.V. Intensifikatsiya temperaturnoy stratifikatsii turbulentnykh potokov za schet ispolzovaniya teplovykh trub [Temperature Stratification Intensification of the Turbulent Flows Using the Heat Pipes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [News of Higher Education Institutions. Energy Issues], 2013, no. 3–4, pp. 33–38.
5. Tsynaeva A.A., Tsynaeva E.A., and Shkolin E.V. Vozmozhnosti povysheniya effektivnosti sistem okhlazhdeniya elektricheskikh mashin [Improving the Efficiency of Electrical Machine Cooling Systems]. *Trudy 13 Mezhdunarodnoi konferentsii po elektricheskim mashinam, ustroystvam i energeticheskim sistemam* [Proceedings of the 13th Int. Conference on Electrical Machines, Drives and Power, ELMA 2011]. Varna, Bulgaria, Technical University of Varna, 2011, pp. 51–54.
6. Chi S. *Teplovyeye truby: Teoriya i praktika* [Heat Pipe Theory and Practice. A sourcebook. In V.Ya. Sidorov' Translation]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1981. 207 p.