

УДК 536.24

## ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ

© 2013 А. А. Цынаева<sup>1</sup>, Е. А. Цынаева<sup>2</sup>, Е. В. Школин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Самарский государственный архитектурно-строительный университет»

<sup>2</sup>ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет»

Проведено численное решение системы дифференциальных уравнений, описывающих движение и теплообмен в пограничном слое для моделирования теплообмена в трубе температурной стратификации. На основе численного решения выявлено, что применение тепловых труб позволит увеличить эффективность работы трубы температурной стратификации.

*Тепломассообмен, газодинамическая температурная стратификация, тепловая труба.*

Работа устройства [1,2,3] на основе газодинамической температурной стратификации (труба Леонтьева) основана на реализации переноса тепла между потоками газа с разными числами Маха, разделёнными стенкой. Таким образом, движущей силой процесса является разница между температурой восстановления газа на стенке и температурой торможения. Схема устройства газодинамической тем-

пературной стратификации представлена на рис. 1, а [4]. Эффективность трубы температурной стратификации определяется теплофизическими свойствами рабочего тела. Известно [1, 2], что при сверхзвуковых скоростях ( $M > 1$ ) температура восстановления будет значительно ниже температуры торможения для рабочих сред с малыми числами Прандтля ( $Pr < 0.2$ ) [5].

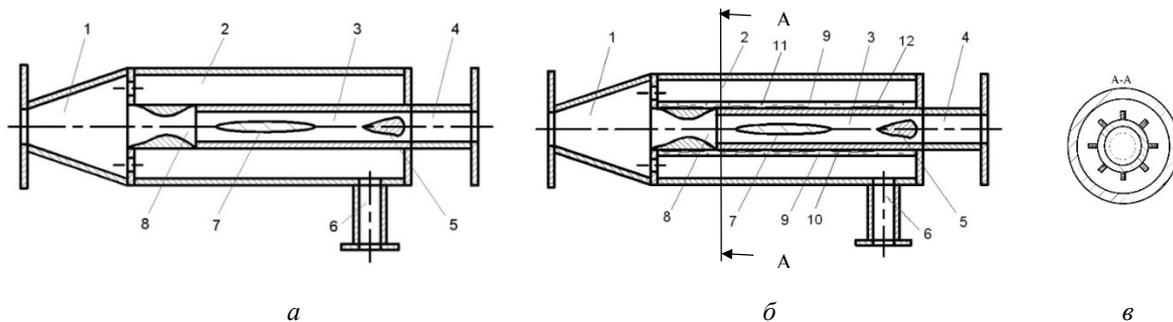


Рис. 1. Схема трубы температурной стратификации:

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 – устройство для закрутки

сверхзвукового дисперсного потока; 8 – сверхзвуковое сопло; 9 – тепловая труба (ТТ);

10 – фитиль ТТ; 11 – испарительная зона ТТ; 11 – конденсационная зона ТТ

Кроме того, плотность теплового потока возрастает при наличии проницаемой стенки между дозвуковым и сверхзвуковым трактами трубы температурной стратификации [1, 5, 6]. Эффективность температурной стратификации определя-

ется плотностью теплового потока от газа в дозвуковом тракте к газу в сверхзвуковом тракте, рассчитываемой по выражению

$$q = k \cdot (T^* - T_{r2}), \quad (1)$$

где  $T^*$  – температура заторможенного потока;  $T_{r2}$  – температура стенки со стороны сверхзвукового потока;  $k$  – коэффициент теплопередачи. Здесь температурный напор  $\Delta T = T^* - T_{r2}$  увеличивается с уменьшением температуры  $T_{r2}$ , которая, как отмечено выше, зависит от

природы рабочей среды. Температура  $T_{r2}$ , профили скорости и температуры в сечениях пограничного слоя, коэффициенты восстановления  $r$  и теплоотдачи  $a$  определяются, как в [7, 8], в результате численного решения системы уравнений, описывающих движение и теплообмен в пограничном слое, включающей:

– дифференциальное уравнение энергии

$$\rho c_p \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\lambda + \lambda_T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + (\mu + \mu_T) \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + u \frac{dp}{dx} + q_v; \quad (2)$$

– дифференциальное уравнение движения

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\mu + \mu_T) \frac{\partial u}{\partial y} \right] - \frac{dp}{dx} + s_v; \quad (3)$$

– уравнение неразрывности

$$\partial(\rho u)/\partial x + \partial(\rho v)/\partial y = 0; \quad (4)$$

– уравнение состояния

$$\rho = p/(RT). \quad (5)$$

В уравнениях (2)–(5) приняты стандартные обозначения:  $q_v$  – переменная, характеризующая интенсивность внутренних источников теплоты;  $s_v$  – переменная, определяющая интенсивность внутренних источников количества движения.

Численное интегрирование системы уравнений пограничного слоя проводилось методом прогонки с использованием неявной шеститочечной схемы 2-го порядка аппроксимации.

В работах [9,10] показана возможность повышения эффективности процесса газодинамической температурной стратификации за счёт использования дисперсного рабочего тела. Применение дисперсного рабочего тела и конструкции трубы температурной стратификации (рис. 1, а) с устройством для закрутки сверхзвукового потока позволяет существенно увеличивать коэффициент теплоотдачи со стороны тракта сверхзвукового течения. Однако в тракте дозвукового течения коэффициент теплоотдачи остаётся меньшим по сравнению с коэффициентом теплоотдачи со стороны тракта сверхзвукового течения. В этой связи предлагается применять тепловые трубы (ТТ) со стороны тракта дозвукового течения. Так как

эффективная теплопроводность ТТ значительно выше, чем у металлов, коэффициент  $k$  увеличится. Схема конструкции предлагаемой трубы температурной стратификации [7, 8, 11, 14] с ТТ представлена на рис. 1, б; разрез, поясняющий расположение ТТ, – на рис. 1, в.

ТТ в предлагаемой схеме сверхзвуковой трубы температурной стратификации выполнены в виде продольных рёбер в тракте дозвукового течения. Циркуляция теплоносителя в тепловых трубах осуществляется за счёт использования фитиля. Применение ТТ позволяет не только увеличивать коэффициент теплопередачи  $k$  между дозвуковым и сверхзвуковым течениями, но и повышает площадь теплообмена.

Анализ проводился в предположении, что коэффициенты теплоотдачи к поверхности ТТ и к поверхности между ними полагаются одинаковыми.

Коэффициент эффективности тепловой трубы  $h_{mp}$  рассчитывается как для рёбра по формуле, которую для рассматриваемых условий можно записать в виде

$$h_{mp} = \text{th} \left( \frac{l}{d} \sqrt{2\text{Bi}} \right) / \left( \frac{l}{d} \sqrt{2\text{Bi}} \right), \quad (6)$$

где  $Bi = a_1 d / I_{эф}$  – число Био;  $a_1$  – коэффициент теплоотдачи со стороны течения в дозвуковом тракте;  $d$  – толщина ТТ;  $I_{эф}$  – эффективная теплопроводность ТТ.

Сопротивление теплопередачи для ТТ определялось выражением

$$R_{\Sigma} = \sum R_{ст} + R_{исп} + \sum R_{фн} + R_{кан} + R_{кон}, \quad (7)$$

где  $\sum R_{ст}$  – термическое сопротивление для стенок ТТ;  $R_{исп}$  – термическое сопротивление испарительной зоны ТТ;  $\sum R_{фн}$  – термическое сопротивление зоны фазового перехода;  $R_{кан}$  – термическое сопротивление зоны парового канала ТТ;  $R_{кон}$  – термическое сопротивление конденсационной зоны ТТ. Здесь принято допущение, что сопротивление фазового перехода  $\sum R_{фн}$  и парового канала  $R_{кан}$  пренебрежимо малы [7].

Сопротивление теплопередачи ТТ определялось по методике [12]. Были проведены экспериментальные исследования эффективности ТТ по методике, представленной в [13]. В первом приближении коэффициент теплоотдачи для зоны кипения определялся при допущении наличия развитого пузырькового кипения. В расчёте принято, что в качестве рабочей жидкости принята вода. Поэтому использовалась следующая известная зависимость:

$$a_{исп} = \frac{39,3 \cdot (p_n \cdot 10^{-5})^{0,54}}{(1 - 4,5 \cdot 10^{-8} \cdot p_n)^3} \cdot \Delta t^2, \quad (8)$$

здесь  $p_n$  – давление насыщения;  $\Delta t = (t_n - t_n)$  – температурный напор;  $t_n$  – температура насыщения пара;  $t_n$  – температура поверхности ТТ.

Для конденсационной зоны ТТ принято допущение, что реализуется режим плёночной конденсации пара. Среднее значение коэффициента теплоотдачи

$$a_{кон} = \frac{0,728 A_n}{[d_m \cdot \Delta t]^{0,25}}. \quad (9)$$

В формуле (9)  $d_m$  – эквивалентный диаметр тепловой трубы;  $A_n$  – комплекс, рассчитываемый по выражению

$$A_n = \left[ \frac{I \cdot r_k \cdot g \cdot (r' - r'')}{n} \right]^{0,25}. \quad (10)$$

Здесь  $I$  – коэффициент теплопроводности жидкости;  $r_k$  – теплота парообразования (конденсации);  $g$  – ускорение свободного падения;  $r'$ ,  $r''$  – соответственно плотность кипящей жидкости в ТТ и сухого насыщенного пара при температуре насыщения пара;  $n$  – кинематический коэффициент вязкости.

Эффективная теплопроводность ТТ

$$I_{эф} = \frac{F}{l \cdot R_{\Sigma}}, \quad (11)$$

где  $F$  – поверхность ТТ;  $l$  – характерный размер тепловой трубы, м.

В настоящей работе исследуется влияние использования ТТ на поверхности тракта сверхзвукового течения (рис. 1, б) на эффективность газодинамической температурной стратификации.

Относительный тепловой поток  $\bar{q} = q/q_{\max}$  (значение  $q_{\max}$  рассчитано при  $a_2 = \infty$ ,  $T_2 = 0$ ; индексы: 1 – параметры в тракте дозвукового течения, 2 – параметры в тракте сверхзвукового течения) в сверхзвуковой трубе температурной стратификации определяется в предположении, что половина доли периметра трубы занята ТТ:

$$\bar{q} = (1 - r) \cdot \frac{1 - \left(1 + \frac{g-1}{2} M_2^2\right)}{1 + \frac{a_1}{0,5 + h_{mp} \left(\frac{1}{d} + 0,5\right)} + \frac{a_1}{a_2}}, \quad (12)$$

где  $r$  – коэффициент восстановления;  $g$  – показатель адиабаты;  $M$  – число Маха.

Результаты моделирования для воздуха представлены на рис. 2, а. Расчёты

выполнены для значений  $Pr=0,7$ ,  $M_1=0,2$ ,  $Re_{wx2}=10^6$ .

Результаты моделирования для двухфазного потока представлены на рис. 2, б. Расчёты проводились для значений  $g=1,4$ ,  $Pr=0,7$  (несущая среда – воздух),

$$M_1=0,2; Re_{wx2}=10^6; G=\frac{|s_n| m_0}{(u_{sm}-u)r_0^2 u_0^2}=5 \cdot 10^{-7},$$

$G$  – это обобщённый комплекс – критерий подобия, характеризующий влияние конденсированных частиц в потоке.

Анализируя результаты исследования, представленные на рис. 2, можно заключить, что применение ТТ в сверхзвуковой трубе температурной стратификации позволит интенсифицировать процесс теплообмена. Для газа рост эффективности передачи тепла от дозвукового потока к сверхзвуковому потоку составит от 1,6 до 1,96 раза для воздуха при  $M_2=2$ , а для двухфазного потока от 2,44 до 3,94 раз при  $M_2=2$  в зависимости от относительной длины ТТ  $l/d=2...10$ .

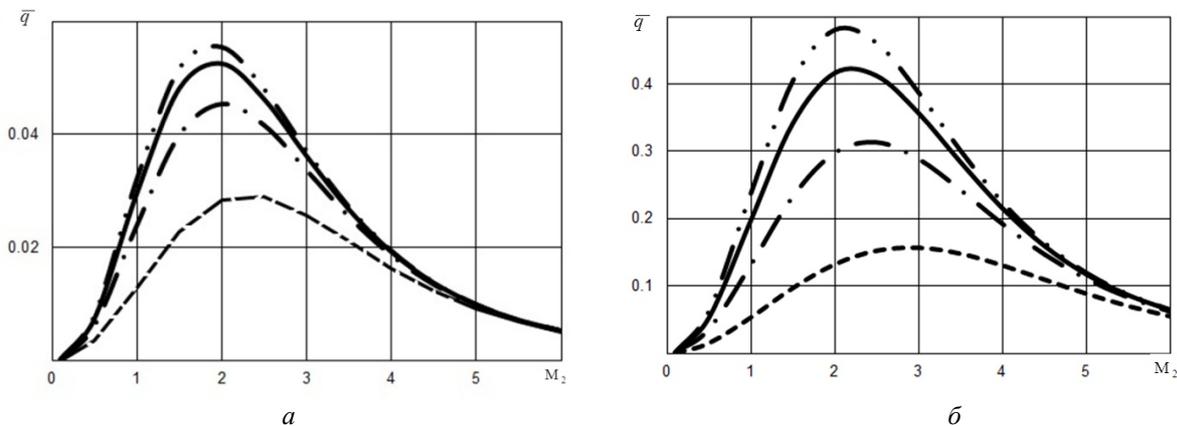


Рис. 2. Влияние числа Маха и относительной длины тепловой трубы на температурную стратификацию газа: а – для газа; б – для двухфазного потока; --- – без ТТ; -.-.- – с ТТ, относительной длиной  $l/d=2$ ; — — — – с ТТ, относительной длиной  $l/d=5$ ; — — — – с ТТ, относительной длиной  $l/d=10$

### Библиографический список

1. Леонтьев, А.И. Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков [Текст] / А.И. Леонтьев // ТВТ, 1997.– Т. 35, № 1. – С. 157-159.

2. Бурцев, С.А. Температурная стратификация в сверхзвуковом потоке газа [Текст] / С.А. Бурцев, А.И. Леонтьев // Изв. РАН. Энергетика. – 2000. – №5. – С. 101 – 113.

3. Пат. 2106581 Российская Федерация, МПК F25B9/02. Способ температурной стратификации газа и устройство для его осуществления (труба Леонтьева) [Текст] / Леонтьев А. И.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество закрытого типа «Грааль», Научно-производственное предприятие «Саров». –

№96110458/06; заявл. 23.05.1996, опубл. 10.03.1998, Бюл. № 6. – 5 с.

4. Пат. 2334178 Российская Федерация, МПК F25B9/02. Сверхзвуковая труба температурной стратификации [Текст] / Ковальногов Н. Н., Магазинник Л. М., Федоров Р. В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет.» – №2007108799/06; заявл. 09.03.2007, опубл. 20.09.08, Бюл. № 26. – 9 с.

5. Вигдорович, И.И. К теории энергоразделения потока сжимаемого газа [Текст] / И.И. Вигдорович, А.И. Леонтьев // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2010. – № 3. – С. 103 – 109.

6. Леонтьев, А. И. Влияние вдува (отсоса) на энергоразделение потоков сжимаемого газа [Текст] / А. И. Леонтьев,

В. Г. Лущик, А. Е. Якубенко // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2011. – № 6. – С. 110-117.

7. Цынаева, А.А. Интенсификация температурной стратификации турбулентных потоков за счет использования тепловых труб [Текст] / А.А. Цынаева, Е.А. Цынаева, Е.В. Школин // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2013. – №3 – 4. – С. 33-38.

8. Цынаева, А.А. Исследование температурной стратификации в модифицированной трубе Леонтьева с тепловыми трубами [Текст] / А.А. Цынаева, Е.А. Цынаева, Е.В. Школин // Тепловые процессы в технике. – 2013. – Т. 5, №10. – С. 440 – 444.

9. Температурная стратификация в сверхзвуковом дисперсном потоке [Текст] / Н.Н. Ковальногов, Л.М. Магазинник, Е.В. Фокеева, М.А. Кузьмина // Проблемы газодинамики и теплообмена в аэрокосмических технологиях: тр. XVII школы-семинара молодых специалистов под руковод. акад. РАН А.И. Леонтьева. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009. – Т. 2. – С. 213 – 216.

10. Цынаева, А.А. Моделирование процесса движения и теплообмена потока для внутреннего охлаждения плазматрона [Текст] / А.А. Цынаева, Л.М. Магазинник // Актуальные вопросы теплофизики и гидрогазодинамики: тез. докл. всерос. школы-семинара молодых учёных. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе, 2008. – С. 130-132.

11. Пат. 2468309 Российская Федерация, МПК F25B9/02. Труба температурной стратификации [Текст] / 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.

12. Кудинов, В.А. Техническая термодинамика и теплопередача: учеб. для бакалавров [Текст] / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, Е.В. Стефанюк. – М.: Изд-во Юрайт, 2011. – 560 с.

13. Цынаева, А.А. О возможностях интенсификации теплопередачи при охлаждении энергетических установок [Текст] / А.А. Цынаева, Е.А. Цынаева // Современные научно-технические проблемы транспорта: материалы V Международ. науч.-техн. конф. – Ульяновск: Изд-во «Венец» УлГТУ, 2009. – С. 67 – 71.

14. Цынаева, А.А. Математическое моделирование температурной стратификации в модифицированной трубе Леонтьева с тепловыми трубами [Текст] / А.А. Цынаева, Е.А. Цынаева, Е.В. Школин // Автоматизация процессов управления. – 2013. – № 2. – С. 29 – 35.

Работа проводится при поддержке РФФИ, грант №12-08-31091 «Повышение эффективности газодинамической температурной стратификации потока за счёт использования тепловых труб», конкурс «Мой первый грант».

## USING HEAT PIPES TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF GAS-DYNAMIC THERMAL STRATIFICATION

© 2013 А. А. Tsynaeva<sup>1</sup>, Е. А. Tsynaeva<sup>2</sup>, Е. V. Shkolin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal State budget institution of higher education  
“Samara State University of Architecture and Civil Engineering”

<sup>2</sup>Federal State budget institution of higher education  
“Ulyanovsk State Technical University”

A numerical solution of differential equations describing the motion and heat exchange in the boundary layer is used to simulate heat transfer in a tube of thermal stratification. The numerical solution proves that the use of heat pipes will make it possible to increase the efficiency of a tube of thermal stratification.

*Heat-mass exchange, gas-dynamic thermal stratification, heat pipe.*

### **Информация об авторах**

**Цынаева Анна Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», Самарский государственный архитектурно-строительный университет. E-mail: [a.tsinaeva@rambler.ru](mailto:a.tsinaeva@rambler.ru). Область научных интересов: тепло- и массообмен, температурная стратификация, энергосбережение, энергетические установки.

**Цынаева Екатерина Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», Ульяновский государственный технический университет. E-mail: [tsinaeva-kate@rambler.ru](mailto:tsinaeva-kate@rambler.ru). Область научных интересов: тепло- и массообмен, управление, энергосбережение, энергетические установки, оптимизация теплотребления.

**Школин Евгений Владимирович**, аспирант, Ульяновский государственный технический университет. E-mail: [shkolin-e@yandex.ru](mailto:shkolin-e@yandex.ru). Область научных интересов: тепло- и массообмен, тепловые трубы.

**Tsinaeva Anna Alexandrovna**, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Samara State University of Architecture and Civil Engineering. E-mail: [a.tsinaeva@rambler.ru](mailto:a.tsinaeva@rambler.ru). Area of research: heat and mass transfer, thermal stratification, energy conservation, power installations.

**Tsinaeva Ekaterina Alexandrovna**, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, the Department of Heat Engineering, Ulyanovsk State Technical University. E-mail: [tsinaeva-kate@rambler.ru](mailto:tsinaeva-kate@rambler.ru). Area of research: heat and mass transfer, management, energy saving, power installations, optimization of heat consumption.

**Shkolin Eugene Vladimirovich**, postgraduate student, Ulyanovsk State Technical University. E-mail: [shkolin-e@yandex.ru](mailto:shkolin-e@yandex.ru). Area of research: heat and mass exchange, heat pipes.