

Интенсификация теплообмена в энергетических устройствах на основе газодинамической температурной стратификации с помощью тепловых труб*

Цынаева А. А., канд. техн. наук

Самарский государственный архитектурно-строительный университет

Цынаева Е. А., канд. техн. наук

Ульяновский государственный технический университет

Никитин М. Н., канд. техн. наук

Центр исследования и разработки энергоэффективных решений, Самара

Эффективность сверхзвуковой трубы температурной стратификации (трубы Леонтьева) определяется значением теплового потока через разделяющую стенку между дозвуковым и сверхзвуковым потоками. Установлено, что применение тепловых труб (ТТ) позволяет повысить эффективность газодинамической температурной стратификации в трубе Леонтьева до 3 раз. Выявлено, что фитильные ТТ с рабочим материалом медь – вода эффективнее ТТ с рабочим материалом алюминий – ацетон в 1,05 – 1,12 раза.

Ключевые слова: теплообмен, интенсификация, газодинамическая температурная стратификация, тепловые трубы, испарение, конденсация.

Устройства на основе газодинамической температурной стратификации (рис. 1) реализуют перенос теплоты между потоками газа с разными числами Маха, разделенными стенкой [1 – 3]. Движущей силой процесса является температурный напор — разница температур восстановления газа на стенке и торможения. При сверхзвуковых скоростях (число Маха $M > 1$) и числе Прандтля $Pr < 0,2$ температура восстановления будет значительно ниже температуры торможения.

Методы повышения эффективности газодинамической температурной стратификации разделяются на технологические и технические [4]. Технологические методы влияют на свойства рабочего тела с целью управления процессами температурной стратификации (при использовании водорода-ксеноновой, водорода-аргоновой и гелий-ксеноновых смесей, дисперсных потоков). К техническим относятся методы доработки конструкции трубы температурной стратификации (наличие лунок, перфораций, ребер, генераторов скачков уплотнения и др.) [4].

Для повышения эффективности температурной стратификации перспективно использование тепловых труб [4]. При этом задача

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 рис. 1, б [3].

Математическая модель, используемая для моделирования устройства, включает в себя: 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 тепловых трубах; уравнения для расчета теплового потока между дозвуковым и сверхзвуковым потоками в устройстве газодинамической температурной стратификации с тепловыми трубами. Температура стенки со стороны сверхзвукового потока T_2 , профили скорости и температуры в сечениях пограничного слоя, коэффициенты восстановления r и теплоотдачи α определяются путем численного решения системы дифференциальных уравнений [4], описывающих движение и теплообмен в пограничном слое. Это уравнения энергии, движения, неразрывности, состояния.

Граничные условия при расчете коэффициента восстановления температуры находили так же, как в [4, 5]. Теплофизические свойства рабочего тела определяли в зависимости от температуры. Влияние продольного градиента давления и иных воздействий учитыва-

* Работа выполняется при поддержке гранта РФФИ № 12-08-31091 мол а «Повышение эффективности газодинамической температурной стратификации потока за счет использования тепловых труб» и стипендии Президента РФ № СП-406.2012.1 для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики.

ли наличием в системе уравнений пограничного слоя членов, характеризующих внутренние источники теплоты, а также импульса момента движения и применением модифицированной модели турбулентности пути смешения Прандтля [4, 5].

Сопротивление теплопередачи для ТТ вычисляли из выражения [6]

$$R_{\Sigma} = \Sigma R_{\text{ст}} + R_{\text{исп}} + \Sigma R_{\text{ф.п}} + R_{\text{кан}} + R_{\text{кон}}, \quad (1)$$

где $\Sigma R_{\text{ст}}$, $R_{\text{исп}}$, $\Sigma R_{\text{ф.п}}$, $R_{\text{кан}}$, $R_{\text{кон}}$ — термические сопротивления стенок ТТ, ее испарительной зоны, зоны фазового перехода, зоны парового канала, конденсационной зоны.

Поскольку циркуляция теплоносителя в ТТ осуществляется за счет использования фитиля (см. рис. 1, б), термическое сопротивление стенки в зоне испарения ТТ с фитилем определяли по формуле [6]

$$R_{\text{исп}} = \frac{r_{\text{тр}} \delta_{\text{ст}}}{2L_{\text{исп}} \lambda_{\text{ст}}}, \quad (2)$$

где $r_{\text{тр}}$ — внешний эквивалентный радиус ТТ; $\delta_{\text{ст}}$ — толщина стенки ТТ; $L_{\text{исп}}$ — длина зоны испарения; $\lambda_{\text{ст}}$ — теплопроводность стенки.

В зоне испарения термическое сопротивление насыщенного жидкостью фитиля ТТ

$$R_{\text{испф}} = \frac{r_{\text{тр}}^2 \delta_{\text{ф}}}{2L_{\text{исп}} r_{\text{внут}} \lambda_{\text{эф.испф}}}, \quad (3)$$

где эффективную теплопроводность фитиля в виде прямоугольных канавок в зоне испарения находили по формуле

$$\lambda_{\text{эф.испф}} = \frac{\{\omega_{\text{к.р}} \lambda_{\text{ж}} \lambda_{\text{ст}} \delta_{\text{к.ф}} + \omega \lambda_{\text{ж}} (0,185 \omega_{\text{к.р}} \lambda_{\text{ст}} + \delta_{\text{к.ф}} \lambda_{\text{ж}})\}}{\{(\omega_{\text{к.р}} + \omega)(0,185 \omega_{\text{к.р}} \lambda_{\text{ст}} + \delta_{\text{к.ф}} \lambda_{\text{ж}})\}}, \quad (4)$$

где ω — ширина канавки фитиля ТТ; $\omega_{\text{к.р}}$ — ширина ребра канавки фитиля; $\lambda_{\text{ж}}$ — теплопроводность рабочей жидкости ТТ; $\delta_{\text{к.ф}}$ — глубина канавки фитиля; $r_{\text{тр}}$ — внешний эквивалентный радиус ТТ; $r_{\text{внут}}$ — внутренний эквивалентный радиус ТТ; $\delta_{\text{ф}}$ — толщина фитиля.

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

$$R_{\text{пар}} = \frac{\pi r_{\text{тр}}^2 T_{\text{ф}} f_{\text{к}} \left(\frac{1}{6} L_{\text{исп}} + L_{\text{к}} + \frac{1}{6} L_{\text{кон}} \right) \Delta v}{r_{\text{исп}}}, \quad (5)$$

где $T_{\text{ф}}$ — температура в зоне раздела фаз; $f_{\text{к}}$ — коэффициент трения для потока пара в ТТ; $L_{\text{к}}$ — длина транспортной зоны ТТ; $L_{\text{кон}}$ — длина

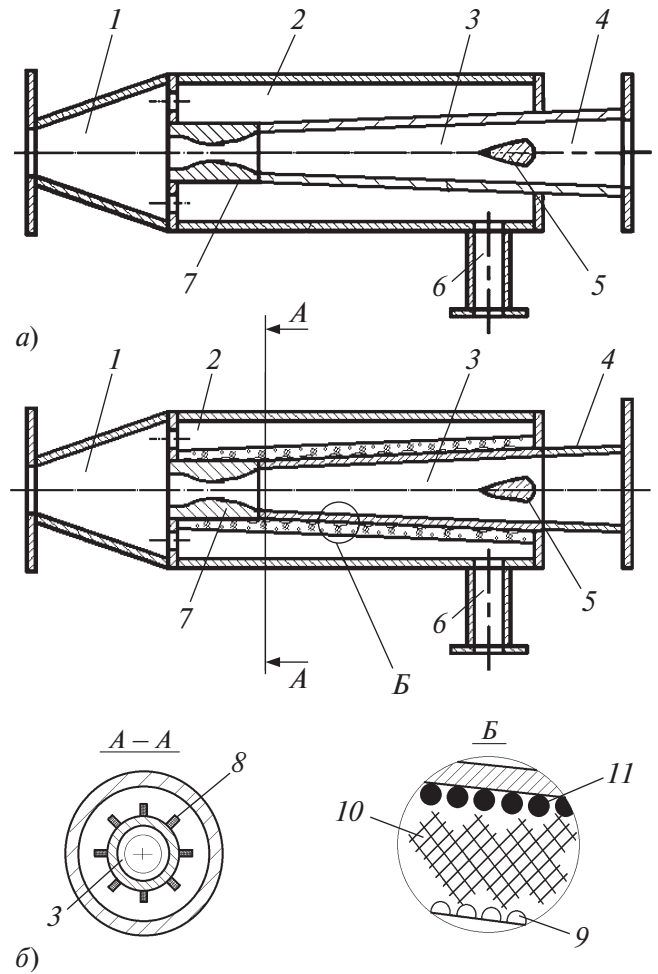


Рис. 1. Схема сверхзвуковой трубы температурной стратификации: без тепловых труб (а) и с тепловыми трубами (б):

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

зоны конденсации в ТТ; Δv — изменение удельного объема в фазовом переходе; $r_{\text{исп}}$ — теплота парообразования (конденсации) рабочей жидкости ТТ.

Термическое сопротивление стенки ТТ в зоне конденсации [6]

$$R_{\text{конф}} = \frac{r_{\text{тр}}^2 \delta_{\text{ф}}}{2L_{\text{кон}} r_{\text{внут}} \lambda_{\text{эф.конф}}}, \quad (6)$$

где $\lambda_{\text{эф.конф}} = \frac{\lambda_{\text{ж}} \omega + \omega_{\text{к.р}} \lambda_{\text{ст}}}{\omega + \omega_{\text{к.р}}}$.

Анализ проведен применительно к фитильным ТТ, выполненным в виде прямых плоских продольных ребер (см. рис. 1, б) постоянной толщины. Результаты сравнивали для двух случаев:

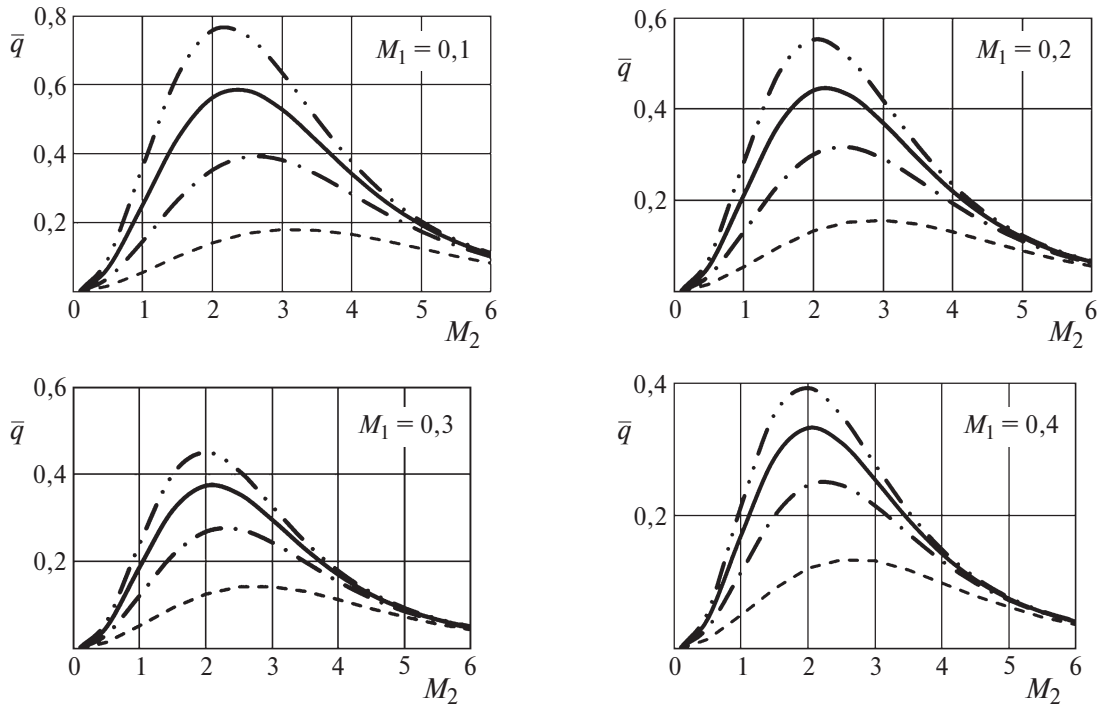


Рис. 2. Влияние числа Маха и относительной длины ТТ с фитилем в виде прямоугольных канавок на температурную стратификацию дисперсного потока:

--- — без ТТ; —, —, — — с ТТ и относительной длиной $l/\delta = 2, 5, 10$

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

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

Было принято, что коэффициенты теплоотдачи к поверхности тепловых труб и к нерребренной поверхности равны [4]. На рис. 2 представлены результаты моделирования при $\gamma = 1,4$ (показатель адиабаты), $Pr = 0,7$ (несущая среда — воздух), $M_1 = 0,1 \div 0,4$, $Re_{wx2} = 10^6$, $G = 5 \cdot 10^{-7}$ (параметр, характеризующий наличие конденсированных частиц в потоке рабочей среды) для модифицированной трубы Леонтьева с ТТ (см. рис. 1, б) с фитилем в виде прямоугольных канавок; рабочий материал ТТ — медь–вода.

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 из выражения

$$\bar{q} = (1-r) \frac{1 - \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_2^2\right)}{\frac{1}{0,5 + \eta_p \left(\frac{1}{\delta} + 0,5\right)} + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}, \quad (8)$$

где γ — показатель адиабаты; r — коэффициент восстановления температуры; η_p — коэффициент эффективности тепловой трубы — ребра [4]; α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи в дозвуковом и сверхзвуковом трактах.

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

На рис. 3 приведены результаты моделирования температурной стратификации дисперсного потока для модифицированной трубы Леонтьева с ТТ с фитилем в виде канавок при $\gamma = 1,4$, $Pr = 0,7$ (несущая среда — воздух), $M_1 = 0,1$, $Re_{wx2} = 900\,000$, $G = 5 \cdot 10^{-7}$, $M_2 = 3$. Анализируя эти данные, можно сказать, что применение фитильных ТТ с рабочим материалом медь — вода эффективнее ТТ с рабочим материалом алюминий — ацетон в 1,05 — 1,12 раза.

Выводы

1. Применение тепловых труб значительно увеличивает качество температурной страти-

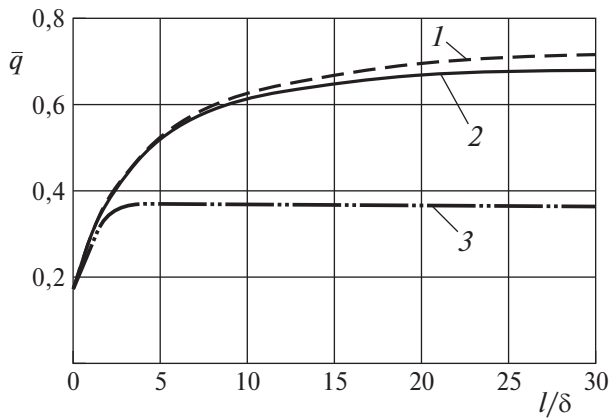


Рис. 3. Влияние числа Рейнольдса $Re_{\text{вих2}}$ и относительной длины ТТ с фитилем в виде прямоугольных канавок на температурную стратификацию дисперсного потока:

1 — для ТТ с рабочим материалом медь — вода; 2 — ТТ с рабочим материалом алюминий — ацетон; 3 — металлическое оребрение

фикации газа и дисперсного потока и позволяет повысить эффективность газодинамической температурной стратификации в трубе Леонтьева до 3 раз.

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

3. С увеличением относительной длины ТТ l/δ от 0 до 5 эффективность их исполь-

зования возрастает до 3 раз. Рост l/δ от 5 до 10 не ведет к значительному увеличению теплового потока от дозвукового к сверхзвуковому потоку рабочего тела. При увеличении l/δ от 10 до 30 повышения качества температурной стратификации практически не происходит при всех исследованных конструкциях тепловых труб.

Список литературы

1. Леонтьев А. И. Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков. — ТВТ, 1997, т. 35, № 1.
2. Бурцев С. А., Леонтьев А. И. Температурная стратификация в сверхзвуковом потоке газа. — Изв. РАН. Энергетика, 2000, № 5.
3. Пат. 2468309 РФ, МПК F25B9/02. Труба температурной стратификации / А. А. Цынаева, Т. Н. Волкова, К. М. Магазинник, К. Р. Сагитова. — Изобретения, Полезные модели, 2012, № 33.
4. 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).
5. Ковальников Н. Н. Прикладная механика жидкости и газа. — Ульяновск: УлГТУ, 2010.
6. Чи С. Тепловые трубы: Теория и практика / Пер. с англ. В. Я. Сидорова. — М.: Машиностроение, 1981.

a.tsinaeva@rambler.ru