

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 533.6.011.6



DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-13-21

Оригинальная статья /Original article

**Газодинамическая температурная стратификация в трубе Леонтьева:
аналитическое исследование и численное моделирование**

Р.С. Рудник, А.Ф. Матвеев, В.Н. Ковальногов

Ульяновский государственный технический университет,
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32, Россия

Резюме. Цель. Статья посвящена исследованию процессов теплопередачи в трубе Леонтьева, основанной на принципе газодинамической температурной стратификации. Цель работы заключается в описании механизма взаимодействия дозвуковых и сверхзвуковых потоков и выявлении ключевых параметров, влияющих на эффективность стратификации. **Метод.** Исследование выполнено с использованием аналитического подхода и численного моделирования в среде ANSYS Fluent. В рамках численного анализа были визуализированы температурные и скоростные поля, а также проанализирована плотность теплового потока. Применена модель турбулентности $k-\omega$ SST, позволяющая учитывать сложные особенности течения газа в трубе. **Результат.** Получены основные закономерности теплопередачи, включая влияние разности температур и давления между дозвуковыми и сверхзвуковыми потоками, а также роль турбулентной энергии в усилении теплообмена. Установлено, что на выходе из сверхзвукового канала газ нагревается по сравнению с входными условиями, а из дозвукового канала выходит охлажденный поток. **Вывод.** Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности теплообмена в промышленных системах и проектирования устройств для рекуперации тепла.

Ключевые слова: газодинамическая температурная стратификация, охлаждение газа, труба Леонтьева, теплопередача, численное моделирование, тепловой поток

Для цитирования: Р.С. Рудник, А.Ф. Матвеев, В.Н. Ковальногов. Газодинамическая температурная стратификация в трубе Леонтьева: аналитическое исследование и численное моделирование. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(1):13-21. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-13-21

**Gas-Dynamic Temperature Stratification in the Leontiev Tube:
Analytical Study and Numerical Modeling**

R.S. Rudnik, A.F. Matveev, V.N. Kovalnogov

Ulyanovsk State Technical University,
32 Northern Venets St., Ulyanovsk 432027, Russia

Abstract. Objective. The article is dedicated to the study of heat transfer processes in a Leontiev tube based on the principle of gas-dynamic temperature stratification. The objective of this work is to describe the mechanism of interaction between subsonic and supersonic flows and identify key parameters influencing stratification efficiency. **Method.** The study was conducted using an analytical approach and numerical modeling in the ANSYS Fluent environment. Temperature and velocity fields were visualized, and heat flow density was analyzed. The $k-\omega$ SST turbulence model was applied, enabling the consideration of complex gas flow characteristics in the tube. **Results.** The main heat transfer patterns were identified, including the effects of temperature and pressure differences between subsonic and supersonic flows, as well as the role of turbulent energy in enhancing heat exchange. It was established that the gas exiting the supersonic channel is heated compared to the inlet conditions, while the gas exiting the subsonic channel is cooled. **Conclusion.** The results can be used to improve the efficiency of heat exchange in industrial systems and to design heat recovery devices.

Keywords: gas-dynamic temperature stratification, gas cooling, Leontiev tube, heat transfer, numerical modeling, heat flux

For citation: R.S. Rudnik, A.F. Matveev, V.N. Kovalnogov. Gas-Dynamic Temperature Stratification in the Leontiev Tube: Analytical Study and Numerical Modeling. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(1):13-21. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-13-21

Введение. В современных условиях энергосбережение и повышение эффективности промышленных процессов становятся важнейшими задачами для многих отраслей, в частности для энергетики и газовой промышленности. Одной из наиболее энергоемких операций является компримирование газа, которое используется в процессах транспортировки, хранения и распределения природного газа. Этот процесс требует значительных энергетических затрат, а также создает технические трудности, связанные с теплообменом.

Снижение энергопотерь и оптимизация тепловых процессов остаются ключевыми задачами для многих промышленных систем. Традиционные методы теплообмена часто оказываются недостаточно эффективными для поддержания высоких темпов теплоотвода в условиях интенсивных газодинамических потоков. Для минимизации энергопотерь требуется внедрение новых технологий, способных существенно повысить эффективность теплообмена.

Одним из перспективных методов, способных значительно улучшить процессы теплообмена, является газодинамическая температурная стратификация. Она позволяет значительно увеличить теплопередачу между газовыми потоками за счет отличия адиабатной температуры стенки в сверхзвуковом тракте потока от адиабатной температуры стенки в тракте дозвуковом. Применение этого метода способно существенно повысить общую эффективность систем компримирования и других промышленных процессов.

Постановка задачи. Целью данной работы является анализ процессов теплопередачи при газодинамической стратификации, выполненный с использованием аналитических методов и численного моделирования в ANSYS Fluent. Полученные результаты позволят выявить ключевые параметры, влияющие на эффективность стратификации, и определить их оптимальные значения для применения в промышленных условиях.

Методы исследования. Механизм газодинамической температурной стратификации. Принцип работы трубы Леонтьева впервые был предложен А.И. Леонтьевым в 1996 году. В его работах было показано, что разница в температурах торможения и восстановления на стенке трубы создает условия для эффективного теплового взаимодействия между потоками. В дозвуковом канале температура газа близка к температуре торможения, тогда как в сверхзвуковом канале температура стенки значительно ниже. Это позволяет организовать естественный теплообмен между потоками за счет разницы температур, что существенно повышает общую эффективность системы [1].

Ключевым аспектом в процессе стратификации является число Прандтля (Pr), которое характеризует соотношение между кинетической вязкостью и теплопроводностью газа. При значениях числа Прандтля менее 1 (например, для гелия или водорода), эффективность стратификации возрастает, так как разница температур между стенкой и потоком становится более значительной. Это связано с тем, что такие газы обладают высокой теплопроводностью. В работах [2, 3], показано, что при высоких значениях Pr , газодинамическая температурная стратификация не столь эффективна.

В работах [4, 5] показано, что добавление дисперсных частиц в потоки способствует интенсификации теплообмена за счет их инерционного перемещения в турбулентном пограничном слое. Однако в данных исследованиях не учитывается влияние продольного градиента давления, что может существенно повлиять на результаты расчётов.

Кроме того, при увеличении числа Маха в сверхзвуковом канале трубы Леонтьева температурный напор между дозвуковым и сверхзвуковым потоками возрастает, что приводит к значительному увеличению плотности теплового потока [1].

Это объясняется тем, что в сверхзвуковых потоках доминирует аддитивный эффект кинетической энергии, который усиливает процесс охлаждения стенки. Однако, как показали более поздние исследования [6], не учитывалось влияние продольного градиента давления, который может значительно изменять поведение сверхзвукового потока и, соответственно, его влияние на стратификацию. Исследования [2, 7] показали, что для получения оптимального температурного профиля важно учитывать параметры потока, такие как концентрация частиц в дисперсных потоках и турбулентность. Тем не менее, их исследования не охватывают вопросы оптимизации геометрии трубы, что может существенно улучшить тепловую стратификацию.

Процесс теплопередачи в трубе Леонтьева основывается на передаче тепла через тонкую стенку, разделяющую дозвуковой и сверхзвуковой потоки газа. Эффективность этого процесса определяется различием температур между потоками, теплопроводностью стенки, а также ее геометрическими параметрами. В данной части исследуются основные уравнения теплопередачи для различных режимов потока и условия, обеспечивающие оптимальный теплообмен. В основе процесса теплопередачи между дозвуковым и сверхзвуковым потоками в трубе Леонтьева лежит плотность теплового потока (q), которая определяется разницей температур на границах этих потоков:

$$q = k * (T_1 - T_2), \quad (1)$$

где: (q) - плотность теплового потока, (k) - коэффициент теплопередачи через стенку, (T_1) - температура на стенке со стороны дозвукового потока, (T_2) - температура на стенке со стороны сверхзвукового потока.

Для расчета коэффициента теплопередачи (k) используют выражение:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{a_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{a_2}, \quad (2)$$

где: a_1 и a_2 — коэффициенты теплоотдачи от газа к стенке на дозвуковой и сверхзвуковой сторонах соответственно, δ — толщина стенки, λ — теплопроводность материала стенки.

Исследование [8] показало, что в сверхзвуковом канале a_2 значительно выше, чем a_1 , из-за высоких скоростей и более интенсивного теплообмена. В дозвуковом канале температура газа ближе к температуре торможения, что ограничивает интенсивность передачи тепла. Температурный напор $T_1 - T_2$ увеличивается при уменьшении температуры на стенке сверхзвукового канала T_2 , что ведет к интенсификации стратификации.

Однако не учитывалось влияние инерционного перемещения частиц в дисперсных потоках, которое может оказывать значительное влияние на коэффициент теплоотдачи, особенно в условиях турбулентности. Исследования [4, 5] показали, что при добавлении дисперсных частиц коэффициенты теплопередачи могут существенно изменяться.

Для обеспечения максимальной передачи тепла через стенку важно, чтобы разница температур между дозвуковым и сверхзвуковым потоками была максимальной. Это достигается за счет уменьшения температуры восстановления на стенке сверхзвукового канала и повышения температуры на дозвуковой стороне. Важным условием также является минимизация термического сопротивления стенки, что выражается в повышении теплопроводности материала стенки λ и снижении ее толщины δ [9].

Аналитическое исследование теплопередачи в трубе Леонтьева. Газодинамическая температурная стратификация является сложным процессом, требующим глубокого аналитического подхода для оценки эффективности теплопередачи между дозвуковым и сверхзвуковым потоками газа. Разработка аналитической модели для описания этого процесса позволяет провести исследование условий и параметров, влияющих на эффективность стратификации. Аналитическое решение уравнений теплопередачи в трубе

Леонтьева требует учета различий в термодинамических свойствах дозвукового и сверхзвукового потоков. Для дозвукового потока ($M < 1$) температура торможения T_1 определяется как:

$$T_1 = T_0(1 + 2\gamma - 1M^2), \quad (3)$$

где: T_0 - температура на входе в поток, M - число Маха, γ - показатель адиабаты.

Для сверхзвукового потока ($M > 1$) используется аналогичное уравнение, однако учитываются большие значения числа Маха, что приводит к существенному снижению температуры восстановления на стенке. Число Прандтля Pr , как было рассмотрено ранее, является важным параметром, определяющим соотношение вязкости и теплопроводности газа. Для учета влияния числа Прандтля в расчетах теплопередачи используют следующие уравнения для коэффициента теплоотдачи:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= C_1 Re^{n_1} Pr^{m_1}, \\ \alpha_2 &= C_2 Re^{n_2} Pr^{m_2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где: C_1, C_2 - эмпирические коэффициенты, Re - число Рейнольдса, n_1, n_2 - показатели для зависимости от числа Рейнольдса, m_1, m_2 - показатели для зависимости от числа Прандтля.

Как показано в работах [10-14], при увеличении числа Прандтля эффективность стратификации уменьшается, что связано с более высоким вязкостным сопротивлением газа. Это необходимо учитывать при разработке аналитической модели, особенно для потоков с высокими значениями Pr , таких как воздух.

Процесс теплопередачи в высокоскоростных дисперсных потоках, сопровождаемых продольным градиентом давления, может быть описан с использованием комплексной математической модели, включающей уравнения движения, энергии, а также внутренние источники тепла и количества движения. В данной модели необходимо учитывать влияние дисперсных частиц, которые изменяют структуру и динамику потока, что оказывает влияние на коэффициент восстановления температуры и эффективность теплопередачи. Рассмотрим течение газа с дисперсными частицами в трубе с продольным градиентом давления. Основные уравнения, описывающие движение и теплопередачу, включают:

1. Уравнение движения для газовой фазы:

$$\rho_g \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + Fp, \quad (5)$$

где ρ_g - плотность газа, u - скорость потока газа, p - давление, μ - динамическая вязкость, Fp - сила взаимодействия между газом и частицами.

2. Уравнение движения для дисперсной фазы (частиц):

$$\rho_p \frac{du_p}{dt} = \frac{-\nabla p_p}{\rho_p} + F_g + F_c, \quad (6)$$

где ρ_p - плотность частиц, u_p - скорость частиц, F_g - сила сопротивления со стороны газовой фазы, F_c - центробежная сила.

3. Уравнение энергии для газовой фазы:

$$\rho_g c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + q_p, \quad (7)$$

где c_p - удельная теплоемкость при постоянном давлении, T - температура газа, k - коэффициент теплопроводности, q_p - источник тепла, обусловленный взаимодействием с частицами.

4. Уравнение энергии для дисперсной фазы:

$$\rho_p c_{p,p} \frac{dT_p}{dt} = -F_g \cdot u_p + q_{p,conv}, \quad (8)$$

где T_p - температура частиц, $c_{p,p}$ - удельная теплоемкость частиц, $q_{p,conv}$ - теплообмен между частицами и газом.

Процесс теплопередачи существенно зависит от ряда ключевых параметров:

1. Влияние продольного градиента давления можно описать следующим уравнением:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\mu}{D} \cdot \frac{\partial u}{\partial r}, \quad (9)$$

где D - диаметр трубы, u - скорость потока. Увеличение продольного градиента давления способствует снижению коэффициента восстановления температуры и улучшению теплопередачи.

2. Влияние концентрации частиц C_p и их размера dp на теплопередачу выражается через коэффициент теплообмена:

$$Nu_p = C_p \cdot \left(\frac{Re_p^{0.7}}{Pr_p^{0.3}} \right), \quad (10)$$

где Nu_p - число Нуссельта для частиц, Re_p - число Рейнольдса для частиц, Pr_p - число Прандтля для частиц.

При увеличении числа Рейнольдса наблюдается рост числа Нуссельта, что указывает на усиление теплообмена в условиях высокоскоростных потоков (рис. 1).

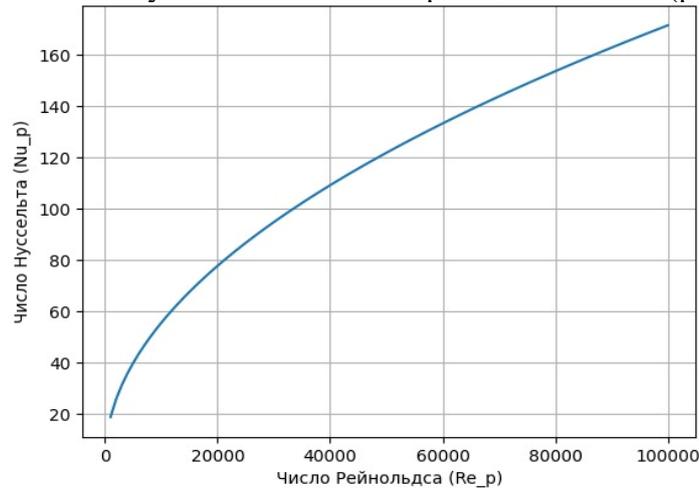


Рис. 1 - Зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса для дисперсных потоков

Fig. 1 - Dependence of the Nusselt number on the Reynolds number for dispersed flows

Для решения данных уравнений используются численные методы, основанные на разностных сетках. В задачах теплопередачи применяется метод конечных разностей для дискретизации уравнений пограничного слоя. Разностная схема для уравнения энергии в газовой фазе может быть записана следующим образом:

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \Delta t \left(\frac{k}{\rho g c_p} \right) \left(\frac{T_{i+1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} \right) + q_p \Delta t, \quad (11)$$

где $T_{i,j}^n$ - температура в узле сетки на шаге n , Δt - шаг по времени, $\Delta x, \Delta y$ - шаги по пространству.

Методы конечных разностей позволяют эффективно интегрировать уравнения в областях с высоким градиентом температуры и давления, а также учитывать влияние дисперсных фаз на динамику теплопередачи. В процессе газодинамической стратификации температура на стенке трубы определяется коэффициентом восстановления температуры, который отражает степень разогрева газа при его торможении на стенке. Коэффициент восстановления температуры r определяется следующим уравнением:

$$r = \frac{T_w - T_0}{T_t - T_0}, \quad (12)$$

где: T_w - температура на стенке, T_0 - температура газа на входе в поток, T_t - температура торможения газа.

Коэффициент восстановления r может варьироваться в зависимости от числа Маха и теплопроводности газа. В дозвуковых потоках значение r обычно близко к единице, что указывает на низкую эффективность охлаждения, тогда как в сверхзвуковых потоках r значительно ниже единицы, что приводит к эффективному охлаждению стенки и повышению интенсивности теплопередачи [15-18].

$$r = \frac{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2}{\gamma M a^2} M^2, \quad (13)$$

где M - число Маха, а γ - показатель адиабаты.

Эффективность коэффициента восстановления температуры различается для дозвуковых и сверхзвуковых потоков. Для дозвуковых потоков (при $M < 1$) температура на стенке T_w приближается к температуре торможения T_t , что приводит к высоким значениям коэффициента восстановления, близким к 1. Это ограничивает эффективность теплообмена, так как разница температур между стенкой и газом становится минимальной.

В сверхзвуковых потоках (при $M > 1$) температура восстановления на стенке значительно ниже температуры торможения, что способствует более интенсивной стратификации [19-21]. Коэффициент восстановления в этих условиях может быть существенно меньше единицы, что указывает на высокую эффективность охлаждения стенки и усиление теплопередачи. Таким образом, чем выше число Маха, тем ниже значение r , и тем выше эффективность стратификации.

Обсуждение результатов. В рамках настоящего исследования проведено численное моделирование процессов теплопередачи и газодинамической стратификации в трубе Леонтьева с использованием программного комплекса ANSYS Fluent.

Модель построена с использованием модели $k-\omega$, SST (Shear Stress Transport), который обеспечивает точное описание турбулентных течений вблизи стенок. Расчётная сетка состоит из 3 203 044 ячеек, что обеспечивает достаточную точность вычислений. В качестве рабочего вещества использовался метан. Давление на входе - 1,2 МПа, а на выходе для дозвукового и сверхзвукового каналов - 1,1 МПа. Температура на входе - 300 К. Для расчётов использовалась стационарная постановка задачи. На (рис. 2) представлено распределение температуры вдоль оси трубы Леонтьева.

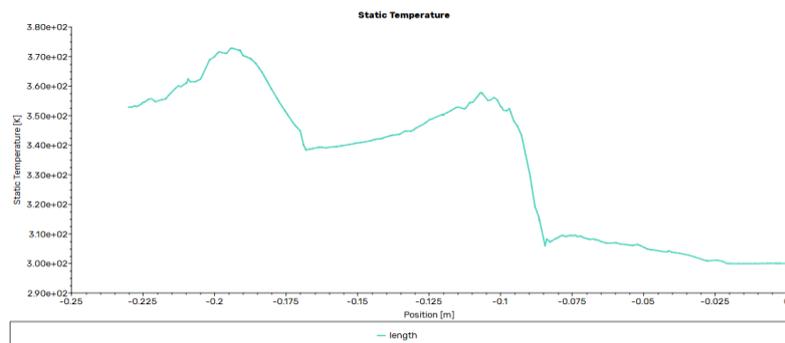


Рис. 2 - Изменения температуры газа вдоль оси трубы Леонтьева
Fig. 2 - Changes in gas temperature along the axis of the Leontiev tube

Контурное распределение температуры (рис. 3) позволяет более наглядно увидеть температурные изменения в различных зонах трубы, включая зону взаимодействия дозвукового и сверхзвукового потоков. Отчётливо видно, что в сверхзвуковом канале температура газа заметно выше, чем на входе, что обусловлено термодинамическими особенностями потока в этом режиме.

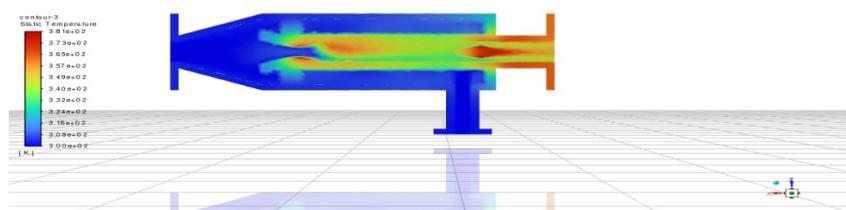


Рис. 3 - Температурное поле в трубе Леонтьева
Fig. 3 - Temperature field in the Leontiev tube

На основании анализа турбулентной кинетической энергии (рис. 4) можно отметить, что её уровень значительно возрастает в зоне сверхзвукового сопла, где происходят интенсивные процессы перемешивания и теплопередачи.

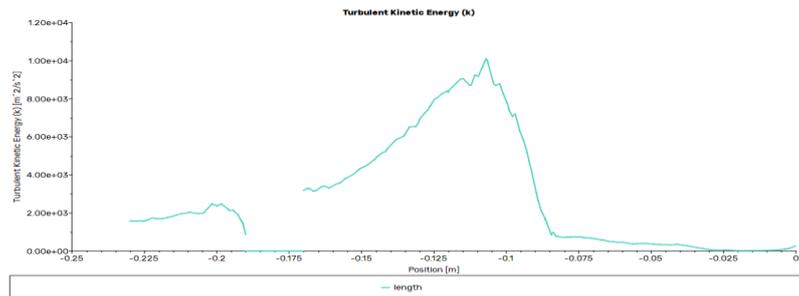


Рис. 4 - Распределение турбулентной кинетической энергии
Fig. 4 - Distribution of turbulent kinetic energy

Контурная карта распределения скорости (рис.5) показывает резкое увеличение скорости газа в сверхзвуковом канале и относительно стабильное распределение скорости в дозвуковом канале, что создаёт благоприятные условия для эффективного теплообмена.

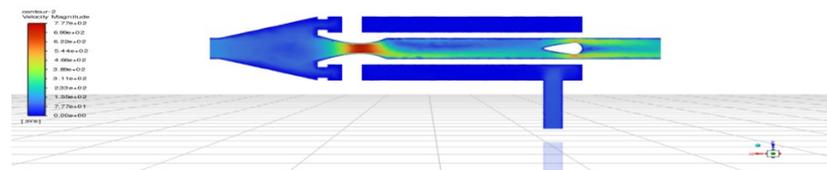


Рис. 5 - Распределение скорости газа в трубе Леонтьева
Fig. 5 - Distribution of gas velocity in the Leontiev tube

Результаты численного моделирования подтверждают, что область сверхзвукового сопла является ключевой зоной, где происходит наиболее интенсивная стратификация, что сопровождается увеличением турбулентности и теплопередачи. Установлено, что повышение давления на входе усиливает охлаждение газа в сверхзвуковом канале, а также увеличивает эффективность теплообмена между дозвуковым и сверхзвуковым потоками.

Вывод. В ходе исследования подтверждена высокая эффективность газодинамической температурной стратификации для улучшения процессов теплообмена в системах, работающих с газовыми потоками.

Проведено аналитическое исследование теплопередачи в трубе Леонтьева, позволяющее оценить влияние ключевых параметров, таких как температурный напор, числа Прандтля и Маха, а также продольный градиент давления, на эффективность температурной стратификации.

Выявлено, что снижение температуры восстановления на стенке сверхзвукового канала и повышение температуры на дозвуковой стороне значительно увеличивает плотность теплового потока, что способствует снижению энергетических затрат.

В ходе численного моделирования наблюдаются следующие ключевые закономерности:

1. Эффективность стратификации напрямую зависит от разности температур и давления между дозвуковым и сверхзвуковым потоками.
2. Увеличение турбулентной энергии вблизи зоны взаимодействия потоков усиливает теплообмен, что способствует более равномерному перераспределению температуры.
3. Использование модели $k-\omega$, SST позволяет точно оценить процессы тепло-массопереноса в сложных условиях.

Таким образом газодинамическая температурная стратификация имеет перспективное применение в промышленных системах охлаждения, теплообменниках и устройствах рекуперации тепла.

Библиографический список:

1. Леонтьев А.И. Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков // ТВТ. 1997. Т. 35. № 1. С. 157
2. Цветова Е.В. Моделирование и исследование процесса газодинамической температурной стратификации для повышения эффективности редуцирования природного газа/Е.В. Цветова, В.Н. Ковальногов, Ю.А. Хахалев//Информатика, вычислительная техника и управление – 2021. – № 2. – С. 54-58.
3. Цынаева А.Л., Цынаева Е.А., Школин Е.В. Исследование методов интенсификации теплообмена в трубе температурной стратификации // Изв. вузов. Авиационная техника. 2013. № 4. С. 44-46.
4. Ковальногов Н.Н., Фокеева Е.В. Повышение эффективности газодинамической температурной стратификации за счет использования дисперсного рабочего тела // Материалы V Международной научно-технической конференции «Современные научно-технические проблемы транспорта». Ульяновск, 2009. С. 64 – 67.
5. Температурная стратификация в сверхзвуковом дисперсном потоке / Н.Н. Ковальногов, Л.М. Магазинник, Е.В. Фокеева, М.А. Кузьмина // Труды XVII Школы-семинара молодых специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. М.: Изд-во МЭИ. 2009. Т.2. С. 213 – 216.
6. Карпущина Т.В., Ковальногов В.Н., Цветова Е.В. Повышение эффективности температурной стратификации отработанного сушильного агента//Вестник научных исследований. 2019. Т. 2, № 3. С. 50-57.
7. Тарасевич С.Э., Филин В.4., Шукин В.К. Теплоотдача дисперсного потока на непроницаемой и проицаемой стенках плоского асимметричного сопла//Изв. вузов. Авиационная техника. 2001.№1.С.47-50.
8. Хазов Д.Э. Моделирование течения в плоском канале при наличии тренировок и теплообмена // Труды XV Школы-семинары молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. В 2-х томах. Т. 1. Калуга. 23-27 мая 2005 г. М.: Изд-во МЭИ. 2005. С. 121-124
9. Цынаева А.Л., Цынаева Е.А., Школин Е.В. Исследование методов интенсификации теплообмена в трубе температурной стратификации // Изв. вузов. Авиационная техника. 2013. № 4. С. 44-46.
10. Олимпиев В.В. Поверхности теплообмена с интенсифицированной теплоотдачей и пониженным сопротивлением // Изв. вузов. Авиационная техника. 2000. № 3. С. 35-38.
11. Попович С.С., Виноградов Ю.4., Стронгин М.М. Экспериментальное исследование возможности интенсификации теплообмена в устройстве безмашинного энергоразделения потоков // Вестник СГАУ. 2015. Т. 14. №2. С. 159-169.
12. Тарасевич С.Э., Филин В.4., Шукин В.К. Теплоотдача дисперсного потока на непроницаемой и проицаемой стенках плоского асимметричного сопла//Изв. вузов. Авиационная техника. 2001. №1.С. 47-50.
13. Gifford W.E., Longworth Pulse-tube Refrigeration // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 1964. ol. 86. Iss. 3. P. 264-268.
14. Керн Д., Краус А. Развитие поверхности теплообмена. М.: Энергия, 1977. 464 с
15. Hall I.M., Berry On the Heating ffect n a Resonance ube//Journal of the Aerospace Sciences. 1959.26. 253.
16. Цынаева А.А. Моделирование системы комбинированного охлаждения лопаток турбомашин с вихревым энергоразделителем: Автореф. дис. .. канд, техн. наук. Ульяновск: УлГТУ, 2004. 19 с.
17. Ковальногов Н.Н. Выбор оптимальных параметров процесса газодинамической температурной стратификации в сверхзвуковом газовом потоке // Изв, вузов. Авиационная техника. 2010.- №3.-С. 28-31.
18. Leont'ev A. I. Temperature stratification of supersonic gas flow // Doklady Physics. 1997;42(6):309–311.
19. Цынаева А.А., Цынаева Е.А., Школин Е.В. Об использовании тепловых труб для повышения эффективности газодинамической температурной стратификации // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. — 2013. — № 3 (41). — Часть 2. — С. 192-197.
20. Попович С.С., Виноградов Ю.4., Стронгин М.М. Экспериментальное исследование возможности интенсификации теплообмена в устройстве безмашинного энергоразделения потоков // Вестник СГАУ. 2015. Т. 14. № 2. С. 159-169.
21. Бурцев С.А. Исследование путей повышения эффективности газодинамического энергоразделения // Теплофизика высоких температур — 2014 — Т.52, №1. — С. 14–21.

References:

1. Leont'ev A.I. Gas-dynamic method of energy separation of gas flows. *High Temperature*. 1997;35(1):157 (In Russ).
2. Tsvetova E.V., Modeling and study of the process of gas-dynamic temperature stratification for improving the efficiency of natural gas reduction. E.V. Tsvetova, V.N. Kovalenogov, Yu.A. Khakhalev. *Informatics, Computer Engineering, and Control*. 2021;2:54–58. (In Russ).
3. Tsynaeva A.L., Tsynaeva E.A., Shkolin E.V. Study of methods for intensifying heat transfer in a temperature stratification pipe. *University Proceedings. Aviation Technology*. 2013;4:44–46. (In Russ).
4. Kovalenogov N.N., Fokeeva E.V. Increasing the efficiency of gas-dynamic temperature stratification by using dispersed working substances. *Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference “Modern Scientific and Technical Transport Problems*. Ulyanovsk, 2009: 64–67. (In Russ).

5. Temperature stratification in a supersonic dispersed flow. N.N. Kovalenogov, L.M. Magazinnik, E.V. Fokeeva, M.A. Kuzmina. *Proceedings of the XVII School-Seminar for Young Scientists under the leadership of RAS Academician A.I. Leont'ev. M.: MEI Publishing.* 2009; 2:213–216. (In Russ).
6. Karpukhina T.V., Kovalenogov V.N., Tsvetova E.V. Improving the efficiency of temperature stratification of exhaust drying agents. *Bulletin of Scientific Research.* 2019; 2(3):50–57. (In Russ).
7. Tarasevich S.E., Filin V.A., Shchukin V.K. Heat transfer of a dispersed flow on impermeable and permeable walls of a flat asymmetric nozzle. *University Proceedings. Aviation Technology.* 2001;1:47–50.(In Russ).
8. Khazov D.E. Modeling of flow in a flat channel with friction and heat transfer. *Proceedings of the XV School-Seminar for Young Scientists and Specialists under the leadership of RAS Academician A.I. Leont'ev.* In two volumes. Kaluga. May 23–27, M.: MEI Publishing. 2005; 1:121–124. (In Russ).
9. Tsynaeva A.L., Tsynaeva E.A., Shkolin E.V. Study of methods for intensifying heat transfer in a temperature stratification pipe. *University Proceedings. Aviation Technology.* 2013;4:44–46. (In Russ).
10. Olympiev V.V. Heat transfer surfaces with enhanced heat dissipation and reduced resistance. *University Proceedings. Aviation Technology.* 2000; 3: 35–38. (In Russ).
11. Popovich S.S., Vinogradov Yu.A., Strongin M.M. Experimental study of the possibility of intensifying heat transfer in a non-mechanical energy separation device. *Bulletin of SSAU.* 2015;14(2):159–169. (In Russ).
12. Tarasevich S.E., Filin V.A., Shchukin V.K. Heat transfer of a dispersed flow on impermeable and permeable walls of a flat asymmetric nozzle. *University Proceedings. Aviation Technology.* 2001;1: 47–50. (In Russ).
13. Gifford W.E., Longsworth. Pulse-tube Refrigeration. *Journal of Manufacturing Science and Engineering.* 1964;86(3)264–268.
14. Kern D., Kraus A. Enhanced Heat Transfer Surfaces. M.: Energy, 1977: 464. (In Russ).
15. Hall I.M., Berry. On the Heating Effect in a Resonance Tube. *Journal of the Aerospace Sciences.* 1959;26: 253.
16. Tsynaeva A.A. Modeling of a combined cooling system for turbine blades with a vortex energy separator: Abstract of dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University, 2004;19. (In Russ).
17. Kovalenogov N.N. Selection of optimal parameters for the process of gas-dynamic temperature stratification in a supersonic gas flow. *University Proceedings. Aviation Technology.* 2010;3:28–31. (In Russ).
18. Leont'ev A.I. Temperature stratification of supersonic gas flow. *Doklady Physics.* 1997;42(6):309–311.
19. Tsynaeva A.A., Tsynaeva E.A., Shkolin E.V. On the use of heat pipes to improve the efficiency of gas-dynamic temperature stratification. *Bulletin of the Samara State Aerospace University.* 2013;3 (41) Part 2: 192–197. (In Russ).
20. Popovich S.S., Vinogradov Yu.A., Strongin M.M. Experimental study of the possibility of intensifying heat transfer in a non-mechanical energy separation device. *Bulletin of SSAU.* 2015; 14(2):159–169. (In Russ)
21. Burtsev S.A. Study of ways to improve the efficiency of gas-dynamic energy separation. *High Temperature Physics.* 2014;52(1):14–21 (In Russ).

Сведения об авторах:

Рудник Роман Сергеевич, аспирант, кафедра «Тепловая и топливная энергетика», kuvaldatmb99@gmail.com.

Матвеев Александр Федорович, аспирант, кафедра «Тепловая и топливная энергетика», maf78@mail.ru

Ковальногов Владислав Николаевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Тепловая и топливная энергетика», kvn@ulstu.ru

Information about the authors:

Roman S. Rudnik, PhD student, Department of Thermal and Fuel Energy, kuvaldatmb99@gmail.com

Alexander F. Matveev, PhD student, Department of Thermal and Fuel Energy, maf78@mail.ru

Vladislav N. Kovalnogov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Thermal and Fuel Energy, kvn@ulstu.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 17.11.2024.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 22.12.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 20.01.2025.