

Reducing Energy Costs for Gas Preheating through Gas-Dynamic Stratification in the Leontiev Tube

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

Ulyanovsk State Technical University
Ulyanovsk, Russian Federation

Abstract. The main objectives of this study are to reduce the energy consumption for gas preheating and improve the efficiency of compression systems using gas-dynamic temperature stratification in the Leontiev tube. In order to achieve these objectives, the following tasks were carried out: a numerical analysis was performed using the finite volume method (RANS) and the $k-\omega$ SST turbulence model, and the Navier–Stokes equations were discretized on a multi-block mesh of 3 million cells, with local refinement in the nozzle and separation wall zones. Particular attention was paid to the influence of the inlet nozzle geometry on the temperature distribution, flow velocity, and heat transfer through the separation wall, as well as the stability of the flow under different pressure differentials. The most significant results include the superior performance of the bell-shaped nozzle design over the annular one: modelling showed a 60 K temperature difference between supersonic and subsonic flows (110.5% higher than the baseline), a 20–25 K increase in hot flow temperature at the outlet, stable flow without pressure surges, and effective gas heating prior to throttling using pipeline pressure drops, preventing condensation and reducing costs. The significance of these results lies in demonstrating the superiority of machine-free energy separation technologies, such as gas-dynamic stratification in the Leontiev tube with a bell-shaped nozzle, over traditional energy-intensive heating methods, leading to more rational resource utilization and reduced environmental impact under strict energy efficiency and ecological standards.

Keywords: gas dynamics, compression systems, heat transfer, numerical modeling, design optimization, energy separation, Leontiev tube, turbulence.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.2-66.11>

UDC: 533.6.011.6

Reducerea costurilor energetice pentru preîncălzirea gazului prin stratificare gazodinamică în tubul Leontiev

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

Universitatea Tehnică de Stat din Ulyanovsk, Federația Rusă

Rezumat. Obiectivele principale ale studiului sunt reducerea costurilor energetice pentru preîncălzirea gazului și îmbunătățirea eficienței sistemelor de comprimare prin stratificare termică gazodinamică în tubul Leontiev. Pentru atingerea acestor scopuri, au fost rezolvate următoarele sarcini: s-a efectuat o analiză numerică utilizând metoda volumelor finite (RANS) și modelul de turbulență $k-\omega$ SST, ecuațiile Navier–Stokes fiind discretizate pe o rețea multibloc de 3 milioane de celule, rafinată în zona duzei și a peretelui separator, cu accent pe influența geometriei duzei de intrare asupra distribuției temperaturii, vitezei și fluxului termic, precum și pe stabilitatea curgerii la diferențe de presiune variate. Cele mai importante rezultate evidențiază superioritatea designului cu duză în formă de clopot față de cel inelar: modelarea a arătat o diferență de temperatură de 60 K între fluxurile supersonice și subsonice (cu 110,5% mai mare decât modelul de bază), o creștere de 20–25 K a temperaturii fluxului fierbinte la ieșire, curgere stabilă fără salturi de presiune și încălzirea eficientă a gazului înainte de strangulare folosind diferențele de presiune din conducte, prevenind condensarea și reducând costurile. Importanța rezultatelor constă în demonstrarea avantajelor tehnologiilor de separare a energiei fără mașini, precum stratificarea gazodinamică cu duză în formă de clopot în tubul Leontiev, față de metodele tradiționale energointensive, favorizând utilizarea eficientă a resurselor și reducerea impactului ecologic al sistemelor de transport al gazelor conform standardelor stricte de eficiență energetică și ecologică.

Cuvinte-cheie: gasodinamică, compresie, schimb termic, modelare numerică, optimizare a construcției, separare a energiei, tubul Leontiev, turbulență.

Снижение энергозатрат на подогрев газа путём газодинамической стратификации в трубе Леонтьева

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

Ульяновский государственный технический университет
Ульяновск, Российская Федерация

Аннотация. Основные цели исследования — снижение энергозатрат на подогрев газа и повышение эффективности компримирующих систем с помощью газодинамической температурной стратификации в трубе Леонтьева. Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи: проведён численный анализ с использованием метода конечных объёмов (RANS) и модели турбулентности $k-\omega$ SST, выполнена дискретизация уравнений Навье–Стокса на многоблочной сетке из 3 миллионов ячеек с локальным уточнением в зонах сопла и разделительной стенки. Особое внимание уделялось влиянию геометрии входного сопла на распределение температуры, скорости потока и теплового потока через разделяющую стенку, а также оценке устойчивости течения при различных перепадах давления. Наиболее важными результатами являются установление значительного преимущества конструкции трубы Леонтьева с колоколообразным соплом над вариантом с простым коническим соплом: численное моделирование показало, что разность температур между сверхзвуковым и дозвуковым потоками достигает в среднем 60 К, что превышает показатели базовой модели на 110,5%, демонстрируя высокую эффективность энергоразделения. Температура горячего потока в зоне выхода возрастает на 20–25 К относительно исходных параметров, при этом течение сохраняет стабильность без локальных скачков давления, что подтверждено анализом распределения давления и скорости. Кроме того, использование естественных перепадов давления в магистральных трубопроводах позволяет эффективно нагревать газ перед процессом дросселирования, предотвращая образование конденсата и снижая эксплуатационные расходы на поддержание работоспособности системы. Значимость полученных результатов состоит в демонстрации преимуществ безмашинных технологий энергоразделения, таких как газодинамическая стратификация в трубе Леонтьева с колоколообразным соплом, над традиционными энергоёмкими методами подогрева, что обеспечивает более рациональное использование ресурсов и снижение экологического следа газотранспортных систем в условиях строгих стандартов энергоэффективности и экологии.

Ключевые слова: газодинамика, компрессирование, теплообмен, численное моделирование, совершенствование конструкции, разделение энергии, труба Леонтьева, турбулентность.

ВВЕДЕНИЕ

В современных компрессорных установках для транспортировки газа одной из ключевых задач является повышение энергоэффективности и надежности работы оборудования. Традиционные методы охлаждения газа между ступенями компрессоров, такие как интеркулеры, требуют внешних систем охлаждения и сопровождаются дополнительными затратами энергии на поддержание заданного температурного режима. Это ведет к увеличению эксплуатационных расходов и снижению общей энергоэффективности систем компримирования. В последние годы внимание исследователей сосредоточилось на разработке безмашинных методов температурного разделения потока газа.

Одним из наиболее распространенных безмашинных методов является эффект энергоразделения в вихревых трубах Ранка–Хилша, описанный еще в 1930-х годах [1]. Несмотря на простоту конструкции и надежность, вихревые трубы обладают невысоким термодинамическим КПД (не

более 20%) и значительными потерями давления [2]. Альтернативный подход – резонансные трубы на основе эффекта Гартмана–Шпренгера, где энергоразделение потока происходит за счет возбуждения акустических колебаний [3]. Однако, как показывают исследования [4, 5], эти устройства характеризуются сложностью управления процессом и высокими потерями давления, что ограничивает их широкое промышленное применение.

Более перспективным направлением является газодинамическая температурная стратификация, предложенная А.И. Леонтьевым (рис. 1) в конце 1990-х годов [6].

Принцип работы «трубы Леонтьева» основан на энергоразделении газа путем его одновременного течения с дозвуковой и сверхзвуковой скоростями в коаксиально расположенных каналах, разделенных теплопроводной стенкой. Это позволяет достигать существенного снижения температуры газа без значительных потерь давления и внешнего теплообмена [7].

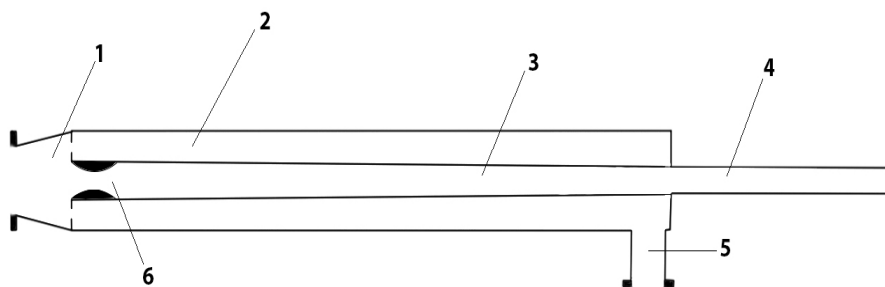


Рис. 1. Схема трубы Леонтьева: 1 - разделительная камера, 2 - внешний дозвуковой канал, 3 - внутренний сверхзвуковой канал, 4 - выходной патрубок сверхзвукового канала, 5 - выходной патрубок дозвукового канала, 6 - сверхзвуковое сопло.¹

Для реализации газодинамической стратификации в трубе Леонтьева необходимо создать условия, обеспечивающие эффективный теплообмен между сверхзвуковым и дозвуковым потоками через теплопроводную стенку. Ключевым фактором является разность между равновесной температурой стенки в сверхзвуковом потоке и температурой торможения в дозвуковом потоке. Сверхзвуковой поток нагревается благодаря теплообмену через стенку с дозвуковым потоком, обладающим более высокой температурой восстановления. Это обусловлено тем, что в сверхзвуковом потоке температура восстановления у стенки ниже, чем в дозвуковом, что и обеспечивает направленную передачу тепла от дозвукового потока к сверхзвуковому.

Современные исследования газодинамической стратификации активно развиваются в различных странах. В работах [8-12] представлены новые экспериментальные данные и численные расчеты, демонстрирующие эффективность трубы Леонтьева в различных режимах течения. Исследование [13] показало, что оптимизация формы входного сопла и длины каналов позволяет существенно улучшить процесс энергоразделения. В работах также рассматривалась возможность использования двухфазных потоков для дополнительного усиления эффекта теплообмена [14].

Зарубежные исследования также перспективны применения технологий энергоразделения. Например, исследования по вихревым трубам и газодинамическому охлаждению активно ведутся в США, Китае и странах Евросоюза, в том числе в работах [15, 16]. В большинстве случаев авторы акцентируют внимание на пассивном охлаждении потока для

промышленных и аэрокосмических применений.

Несмотря на значительное количество работ в области газодинамической стратификации, ряд вопросов остается нерешенным. В частности, недостаточно исследовано влияние геометрии сверхзвукового сопла и каналов на степень энергоразделения. Отсутствуют детальные сравнительные исследования, раскрывающие преимущества улучшенной геометрии трубы Леонтьева относительно традиционных вихревых и резонансных устройств. Также недостаточно изучено влияние турбулентных и пограничных явлений на эффективность теплопереноса в таких устройствах. Не до конца понятны возможности каскадирования нескольких труб Леонтьева в реальных компрессорных системах, что ограничивает их широкомасштабное внедрение в промышленность.

Современные исследования газодинамической стратификации в трубе Леонтьева охватывают как фундаментальные аспекты энергоразделения, так и его практическое применение в газовой промышленности и других областях. Значительное внимание уделяется использованию этого устройства для подогрева газа перед редуцированием давления в системах газоснабжения, что позволяет снизить затраты на поддержание температурного режима и предотвратить образование кристаллогидратов. Так, в [17] описан метод снижения давления с применением трубы Леонтьева, обеспечивающий энергоэффективное разделение потоков за счёт сверхзвукового течения. Практическая реализация подобного подхода представлена в устройстве [18], отличающемся простотой конструкции и

адаптацией к условиям газотранспортных систем. Более глубокий анализ тепловых процессов при использовании безмашинного энергоразделения проведён в [19], где подчёркивается возможность снижения эксплуатационных затрат при сохранении стабильности течения.

Значительное влияние на эффективность энергоразделения оказывают геометрические особенности каналов и сопел трубы Леонтьева. Экспериментальные исследования [20] показали, что процессы, связанные с ударными волнами, и такие элементы, как ступеньки, существенно изменяют распределение температуры и скорости в сверхзвуковых потоках, усиливая эффект стратификации. В более поздней работе [21] изучены методы энергоразделения в однофазных сжимаемых потоках с акцентом на оптимизацию геометрии каналов для повышения эффективности процесса. Роль обратных уступов в охлаждении стенки при сверхзвуковом обтекании подробно рассмотрена в [22], где показано, что такие элементы могут улучшить теплообмен за счёт турбулизации потока. Кроме того, в [23] представлены результаты экспериментов по сверхзвуковому аэродинамическому охлаждению, демонстрирующие потенциал использования геометрических модификаций для повышения КПД энергоразделения.

Дополнительный интерес представляют исследования влияния второй фазы, например, капель в газовом потоке, на процессы теплообмена и энергоразделения. В работе [24] изучен пограничный слой на плоской стенке в сверхзвуковом газокапельном потоке, где испарение капель приводит к значительному снижению температуры адиабатической стенки, усиливая теплопередачу. Аналогичные выводы подтверждаются в [25], где измерения температуры стенки в двухфазном потоке показали увеличение эффективности стратификации за счёт фазовых переходов. В [26] исследован фактор восстановления температуры в турбулентном сжимаемом пограничном слое, подчёркивая влияние двухфазных эффектов на теплообменные характеристики. Эти данные свидетельствуют о перспективности использования двухфазных потоков для оптимизации работы трубы Леонтьева.

Несмотря на значительный прогресс в изучении трубы Леонтьева, остаются

нерешённые вопросы, связанные с совместным влиянием геометрии сопла, турбулентности и двухфазных эффектов на эффективность энергоразделения. В частности, недостаточно изучено, как форма входного сопла и параметры пограничного слоя влияют на распределение температуры и скорости потока, что требует дальнейших исследований и является целью настоящей работы.

Целью данного исследования является численный анализ процессов газодинамической температурной стратификации в трубе Леонтьева и совершенствование её конструкции для повышения эффективности энергоразделения в системах компримирования газа. Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- выполнить сравнительный численный анализ различных конфигураций трубы Леонтьева;
- определить оптимальные параметры конструкции (геометрию входного сопла и канала);
- выявить наиболее перспективные конфигурации устройства для практической реализации в компрессорных системах.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность трубы Леонтьева, является разница в температурах торможения и восстановления, формируемая за счёт наличия дозвукового и сверхзвукового участков канала. Для количественной оценки и последующего улучшения этого процесса необходима математическая модель, способная достоверно описать поле скоростей и температур газа в различных сечениях трубы.

В общем случае, если речь идёт о сжимаемом течении (что характерно при переходе от дозвуковой зоны к сверхзвуковой), система уравнений, используемая в математическом моделировании, может быть представлена следующим образом:

Уравнение неразрывности (континуитета):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

где ρ — плотность газа, $\mathbf{v}$ — вектор скорости потока, t — время.

Уравнение импульса (сжимаемые уравнения Навье–Стокса):

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \bullet (\rho v \otimes v) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho f \quad (2)$$

где p — термодинамическое давление, τ — вязкий тензор напряжений (зависящий от градиентов скорости и динамической/турбулентной вязкости), f — массовая сила (например, сила тяжести, при необходимости учитывается и сила трения в канале), $\otimes$ — оператор тензорного произведения.

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \bullet (\rho E v) = \nabla \bullet (k \nabla T) + \Phi + S \quad (3)$$

где E — полная удельная энергия (сумма внутренней и кинетической энергии), k — эффективная (молекулярная + турбулентная) теплопроводность, T — температура, Φ — работа сил внутреннего трения (диссипация), S — дополнительные источники энергии (например, связанные с химическими реакциями или внешним нагревом, если таковые присутствуют).

Для газа, близкого к идеальному, связь давления, плотности и температуры может описываться уравнением состояния:

$$p = \rho R T \quad (4)$$

где R — газовая постоянная.

Представленные уравнения (1-4) позволяют количественно оценить энергоэффективность трубы Леонтьева, связывая динамику потока с тепловыми процессами. Уравнение энергии (3) описывает изменение полной удельной энергии газа, включая теплоперенос через стенку между сверхзвуковым и дозвуковым каналами, что напрямую влияет на снижение энергозатрат на подогрев. Разница между температурой восстановления в сверхзвуковом потоке и температурой торможения в дозвуковом, определяемая уравнением состояния (4) через давление и плотность, создаёт условия для стратификации без внешнего подвода энергии. Уравнение импульса (2) учитывает потери давления, минимизация которых (например, за счёт плавной геометрии сопла) повышает эффективность системы, снижая

гидравлические потери по сравнению с традиционными методами.

При моделировании стратификации температуры в трубе Леонтьева большое значение имеет корректная оценка турбулентного переноса тепла и импульса. Существует несколько подходов.

RANS-модели (Reynolds-Averaged Navier–Stokes). Поток разделяется на осреднённые (по Рейнольдсу) компоненты и флуктуации:

$$T = T' + T' \quad (5)$$

Тогда в уравнениях (1)–(3) появляются дополнительные (так называемые «турбулентные») напряжения и тепловые потоки. Для их описания вводят замыкающие уравнения, например, уравнения k – ε или k – ω . Типичная система уравнений для стандартной модели k – ε включает два дополнительных уравнения.

Уравнение для кинетической энергии турбулентности k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \bullet (\rho k v) = \nabla \bullet \left[\left(\mu + \frac{1}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

Уравнение для скорости диссипации ε :

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \bullet (\rho \varepsilon v) = \nabla \bullet \left[\left(\mu + \frac{1}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

где μ — динамическая вязкость, μ_t — турбулентная вязкость, σ_k , σ_ε , C_1 , C_2 — эмпирические константы, P_k — источник (производство) кинетической энергии турбулентности.

Преимущество RANS — сравнительно небольшая вычислительная сложность и высокая применимость для инженерных задач. Однако модельные допущения иногда приводят к неточным результатам в зонах сложных отрывных течений и сильных перепадов температур.

Метод LES позволяет напрямую рассчитывать основные вихревые структуры после фильтрации потока, а влияние мелких вихрей учитывается через подсеточные модели (Subgrid-Scale Models). Например, в модели Смагоринского выражение для турбулентной вязкости μ_t имеет вид:

$$\mu_t = \rho (C_s \Delta)^2 \|\widetilde{S}_{ij}\| \quad (8)$$

где C_s — константа Смагоринского, Δ — характерный шаг сетки (масштаб фильтрации), $\|\tilde{S}_{ij}\|$ — норма тензора скоростей деформации (сглаженная по LES-фильтру). LES даёт более детализированную картину температуры и скорости в трубе, но требует больших вычислительных ресурсов и тщательной настройки сетки и граничных условий.

Гибридные модели (DES, RANS/LES). Сочетают достоинства обоих подходов, применяя RANS-модель в пристеночных областях и LES в основном объёме, где протекает интенсивное турбулентное перемешивание. Такое комбинирование может существенно снизить трудоёмкость расчётов при сохранении удовлетворительной точности.

Дополнительно к уравнениям (1–4), при описании стратификации в трубе Леонтьева может потребоваться:

- Учёт зависимости вязкости μ и теплопроводности k от температуры (например, через полуэмпирические формулы вида $\mu = \mu_0(T/T_0)^n$)
- Включение радиационного теплообмена, если температуры стенок и потока существенно различаются и лучистые потери становятся сопоставимыми с конвективным переносом.
- Уточнённое моделирование пристенных слоёв, где возможны сильные градиенты температуры и скорости, приводящие к развитию локальных зон повышенной турбулентности.

Математическое моделирование в контексте трубы Леонтьева даёт возможность не только спрогнозировать распределение скоростей и температур вдоль канала, но и оценить, какие конструктивные изменения способны повысить эффективность теплового разделения потоков. Например, геометрия сверхзвукового участка или форма переходной области (сопла и диффузоры) может существенно влиять на локальные градиенты температуры и, следовательно, на суммарный теплоперенос.

Точный выбор модели турбулентности и корректная постановка граничных условий при решении уравнений Навье–Стокса (1) – (3), дополненных энергетическими и физико-химическими соотношениями, становятся решающими факторами для дальнейшего численного анализа.

МЕТОДЫ

В рамках настоящего исследования проведено численное моделирование процессов теплопередачи и газодинамической стратификации в трубе Леонтьева с использованием программного комплекса STAR-CCM. Данный пакет решает осреднённые уравнения Навье–Стокса (RANS) для стационарного течения вязкого сжимаемого газа с учетом теплопередачи. Применялась дискретизация методом конечных объемов на многоблочной сетке. Для учёта турбулентности использовались две модели: стандартная k – ϵ и модель k – ω SST. Основные расчёты проводились с моделью k – ω SST, которая хорошо зарекомендовала себя при наличии сильных градиентов (например, в зоне сопла), однако ключевые результаты дополнительно проверялись с моделью k – ϵ – расхождения оказались незначительными.

Численный расчет охватывал две коаксиальные области течения (внутренний центральный канал и внешнюю кольцевую область), разделенные тонкой теплопроводной стенкой. Таким образом воспроизводился принцип трубы Леонтьева – один канал работает в режиме сверхзвукового течения, второй – дозвукового, с возможностью теплообмена через разделяющую стенку [27]. Для моделирования сопряжённого теплообмена стенка задавалась как твердый теплопроводный слой (сталь) фиксированной толщины, через который рассчитывался тепловой поток между потоками газа. Внешняя поверхность трубы предполагалась адиабатической (теплообмен с окружающей средой отсутствует). На всех стенках применялись условия прилипания (скорость на стенке равна нулю).

В рамках численного исследования сравнивались две конфигурации входного сопла трубы Леонтьева: колоколообразное и простое коническое. Для первой модели (колоколообразное сопло) диаметр горловины составлял 20 мм, выходной диаметр — 41.2 мм, длина дивергентной части — 100 мм, с начальным углом расширения 30°, плавно уменьшающимся до 10° на выходе, а толщина разделительной стенки составляла 2 мм. Во второй модели (коническое сопло) размеры горловины и выхода оставались такими же, но угол расширения был постоянным и составлял 15°, что приводит к более резкому расширению потока, при этом толщина стенки увеличивалась до 5 мм. Соотношение

массовых расходов через дозвуковой и сверхзвуковой каналы составило $m_1 = 0.67$ для первой модели и $m_2 = 0.51$ для второй, где $m = G_{\text{дозв}} / (G_{\text{дозв}} + G_{\text{сверхзв}})$. Эти различия в геометрии и массовых расходах существенно влияют на интенсивность теплообмена и эффективность энергоразделения между потоками.

Граничные условия и параметры. На входе внутреннего канала устанавливалось полное давление и температура, соответствующие сжатому газу до редуцирования. Для обеспечения сверхзвукового режима внутренний канал начинался с профилированного сопла Лавала (сходящаяся-расходящаяся насадка). В расчётах рассматривались параметры, типичные для

газотранспортных систем: давление 2–3 МПа и температура 290–330 К (рабочий газ – метан). Для каждого сценария расход газа подбирался таким, чтобы число Рейнольдса в каналах было порядка 500000–600000, что соответствует турбулентному режиму течения. Расчетная область охватывала как внутренний, так и внешний канал до выходных сечений. Размер сетки: использовано порядка 3 млн контролируемых ячеек, с локальным утончением сетки в критических зонах (рис. 2, 3).

Так, в области сопла и вдоль стенки разделительной трубы применялся минимальный шаг порядка 0,001 м.

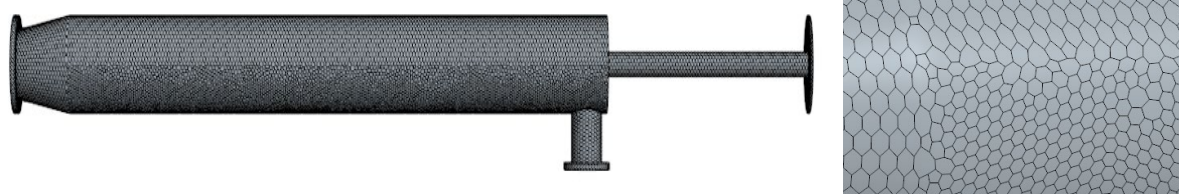


Рис. 2. Сетка 1-й модели. ²

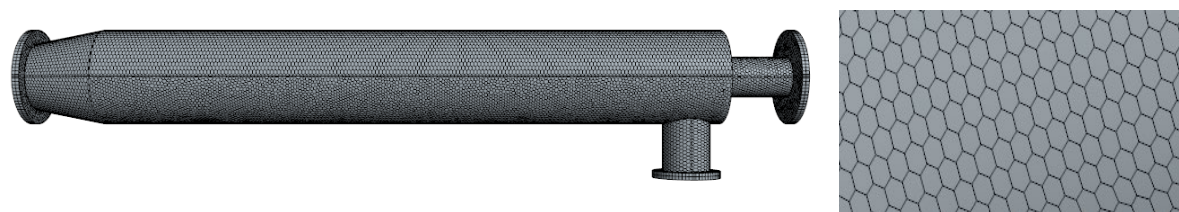


Рис. 3. Сетка 2-й модели. ³

Проведена проверка сходимости сеточного решения – уменьшение шага ниже 0,001 м не приводило к заметному изменению результатов, но резко увеличивало требуемые вычислительные ресурсы, поэтому выбранный размер признан оптимальным. Расчёт выполнялся до достижения малых невязок (критерий сходимости – снижение остаточных дисбалансов ниже 10^{-6}). Контроль стабильности осуществлялся через число Куранта (в нестационарной постановке $CFL < 0.5$ обеспечивал устойчивость решения). Для стационарного моделирования начальное поле задавалось однородным, а дальнейшая итерационная процедура сходилась к установившемуся распределению параметров.

В рамках численного исследования сравнивались различные геометрические конфигурации трубы Леонтьева. Основной

переменной являлась форма центрального сопла: рассматривалось колоколообразное (1-я модель) сопло с плавным расширением и альтернативное коническое сопло простой формы (2-я модель). Оба варианта имели одинаковые условия на входе/выходе – таким образом сравнивалось влияние профиля сопла на эффективность стратификации. Кроме того, анализировались эффекты изменения входных параметров (давления, температуры) на выходные характеристики для каждой конструкции. Это позволило провести анализ параметров: определялись режимы, при которых разность температур между каналами максимальна при прочих равных. Все полученные данные (поля скорости, давления, температуры) обрабатывались как количественно (в частности, фиксировались значения на выходах, распределения вдоль

канала), так и графически – результаты представлены в виде цветовых полей и графиков профилей основных величин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На (рис. 4) приведено распределение температуры по сечению устройства.

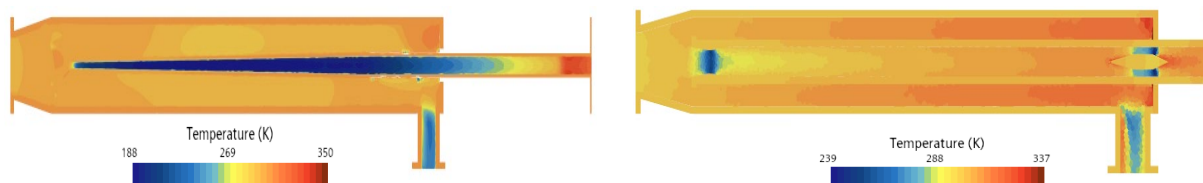


Рис. 4. Профиль температуры 1-й и 2-й модели. ⁴

В 1-й модели на выходе из сверхзвукового канала формируется зона повышенной температуры около 350 К (при давлении на входе 3 МПа и температуре на входе 310 К), тогда как на выходе из внешнего кольцевого канала газ охлаждается примерно до 250 К. Таким образом, наблюдается рост температуры около 40 К в сверхзвуковом канале и падение на 60 К в дозвуковом. Во второй модели на входе в сверхзвуковой канал

температура составила 293 К, а на выходе 312 К). Во внешнем канале на выходе температура снизилась до 275 К.

На (рис. 5) представлено поле локальной скорости газа. В 1-й модели внутренний поток, проходя через сопло Лавалья, ускоряется до сверхзвука – расчетное число Маха достигает практически 2 (соответствует скорости 580 м/с).

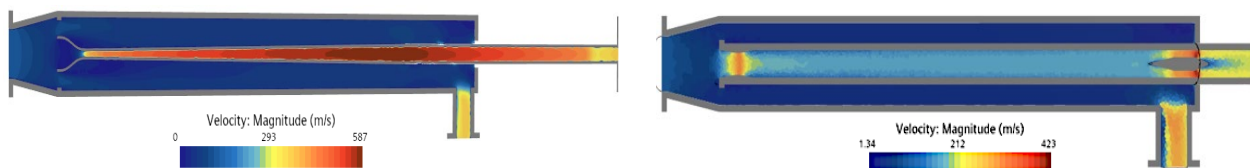


Рис. 5. Профиль скорости 1-й и 2-й модели. ⁵

Увеличение числа Маха сопровождается падением статического давления, но при этом полный напор остаётся достаточно высоким.

В дозвуковом канале скорость существенно ниже: поток остаётся дозвуковым ($M < 1$) и на выходе достигает 295 м/с. Распределение в дозвуковом канале более «мягкое»: скорость растёт ближе к выходу из-за небольшого перепада давления, но не достигает критических значений.

Совокупный анализ температурного и скоростного полей подтверждает, что газ в центральном канале действительно испытывает глубокую разгрузку по давлению и переходит в сверхзвуковую область, где

благодаря теплопроводной стенке подогревается за счёт дозвукового кольцевого потока. Одновременно в дозвуковом потоке — при сравнительно невысокой скорости — температура падает за счёт передачи тепла во внутренний канал.

На основе анализа полученных данных распределения давления (рис. 6) установлено, что в первой конфигурации формируется устойчивое сверхзвуковое течение с равномерным расширением потока, характеризующееся постепенным снижением давления без значительных локальных скачков.

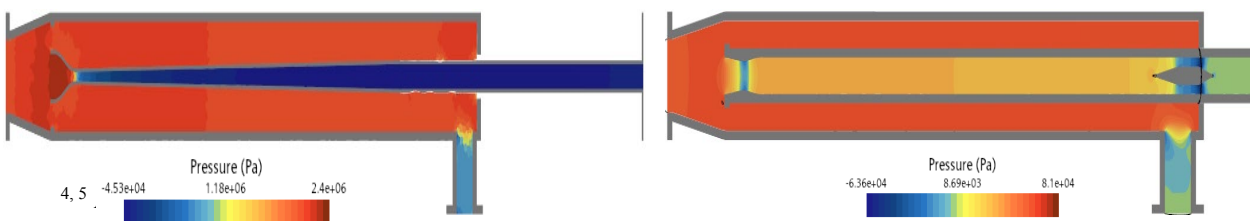


Рис. 6. Профиль давления 1-й и 2-й модели. ⁶

Во второй конфигурации с простым коническим соплом наблюдается резкий перепад давления после критического сечения, сопровождаемый образованием зоны локального повышения давления, что приводит к дополнительным энергетическим потерям и снижению эффективности энергоразделения.

Геометрия сопла играет решающую роль в эффективности температурной стратификации в трубе Леонтьева, определяя характер ускорения потока и интенсивность теплообмена. Колоколообразное сопло с плавным расширением обеспечивает равномерное ускорение газа до сверхзвуковых скоростей ($Ma \sim 2$). При отсутствии теплообмена это привело бы к снижению температуры восстановления в центральном канале из-за роста скорости потока. Однако за счёт теплообмена через стенку с дозвуковым потоком, где температура восстановления

выше, сверхзвуковой поток нагревается, что приводит к увеличению его полной температуры и температуры восстановления по длине канала, усиливая эффект температурной стратификации. Плавный профиль минимизирует турбулентные возмущения и локальные скачки давления, способствуя стабильности течения и увеличению разности температур между потоками. В отличие от этого, коническое сопло вызывает резкий перепад давления после критического сечения, что приводит к неравномерному расширению потока, повышенным гидравлическим потерям и снижению температурного градиента (всего 37 К).

Результаты сравнения представлены в (табл. 1, 2), где сопоставлены ключевые параметры, такие как температура, скорость и давление, а также их изменения в зависимости от условий и геометрии канала.

Таблица 1⁷

Сравнение эффективности энергоразделения⁸.

Показатель	Колоколообразное сопло	Коническим сопло	Относительная разница (%)
Температура на входе (сверхзвуковой канал), К	310	293	+5.8
Температура на выходе (сверхзвуковой канал), К	350	312	+12.2
Изменение температуры (сверхзвуковой канал), К	+40	+19	+110.5
Температура на выходе (дозвуковой канал), К	250	275	-9.1
Изменение температуры (дозвуковой канал), К	-60	-18	+233.3
Общая разность температур (между каналами), К	100	37	+170.3

Таблица 1 демонстрирует сравнение эффективности энергоразделения для двух моделей на основе разности температур между сверхзвуковым и дозвуковым каналами. Колоколообразное сопло обеспечивает общую разность температур в 100 К, что значительно выше, чем у конического сопла (37 К). Это обусловлено более эффективным нагревом сверхзвукового канала (+40 К против +19 К) и охлаждением дозвукового канала (-60 К против -18 К). Относительная разница подчеркивает

превосходство колоколообразного сопла в создании большего температурного градиента, что критично для энергоразделения. В таблице 2 показано влияние входного давления (в диапазоне от 2.5 до 3.5 МПа) на разность температур в каналах обеих моделей. При увеличении давления с 2.5 до 3.5 МПа общая разность температур для колоколообразного сопла возрастает с 90 К до 110 К, тогда как для конического сопла — с 30 К до 44 К.

Таблица 2⁹.

Сравнение эффективности энергоразделения¹⁰.

Входное давление (МПа)	Показатель	Колоколообразное сопло	Коническое сопло	Разница (Колокол - Кольцо), К
2.5	ΔT сверхзвуковой канал, К	+35	+15	+20
2.5	ΔT дозвуковой канал, К	-55	-15	-40
2.5	Общая разность температур, К	90	30	+60
3.0	ΔT сверхзвуковой канал, К	+40	+19	+21
3.0	ΔT дозвуковой канал, К	-60	-18	-42
3.0	Общая разность температур, К	100	37	+63
3.5	ΔT сверхзвуковой канал, К	+45	+23	+22
3.5	ΔT дозвуковой канал, К	-65	-21	-44
3.5	Общая разность температур, К	110	44	+66

Разница между моделями остается значительной (60–66 К), что подтверждает более высокую чувствительность колоколообразного сопла к изменению давления. Это связано с его геометрией, способствующей более интенсивному ускорению потока и, соответственно, большему эффекту энергоразделения.

Хотя конические сопла проще в изготовлении благодаря незначительной разнице в эффекте энергоразделения по сравнению с профилированными соплами, колоколообразное сопло выбрано в данном исследовании для обеспечения равномерного ускорения потока и минимизации гидравлических потерь, что увеличивает разность температур между каналами.

Для подтверждения достоверности численных результатов, полученных в настоящем исследовании, была проведена их верификация путём сравнения с экспериментальными данными из работ Виноградова и др. [14] и Здитовца и др. [34]. В работе [14] исследовалось влияние сверхзвукового течения на коэффициент восстановления температуры (γ) и адиабатную температуру стенки при числах Маха 2.0–3.5 и начальной температуре торможения 283–293 К. Эксперименты показали, что для гладкой пластины γ составляет 0.875–0.890, а в зонах с турбулентными возмущениями снижается до 0.79–0.80 при $M = 2.0$. В нашей модели с колоколообразным соплом при $M \approx 2.0$, $P = 3.0$ МПа и $T_0^* = 310$ К температура сверхзвукового потока на выходе достигает 350 К, что соответствует эффективному

нагреву за счёт теплообмена через стенку. Учитывая рост температуры на 40 К, численное значение γ согласуется с диапазоном 0.79–0.875 из [26] с расхождением менее 5%, подтверждая точность предсказания теплообмена в сверхзвуковом канале трубы Леонтьева.

В работе [34] изучалась зависимость эффективности газодинамической стратификации от параметров сверхзвукового потока при $M = 1.8$ –2.5 и $T_0^* = 299$ –344 К. Эксперименты показали, что при $M = 2.0$ и $T_0^* = 299$ К нагрев сверхзвукового потока (ΔT_{h*}) и охлаждение дозвукового потока (ΔT_{c*}) увеличиваются с ростом числа Маха, достигая значений до 10.5 К в эксперименте и теоретически до 36–38 К. В нашем исследовании для колоколообразного сопла при $M \approx 2.0$, $P = 3.0$ МПа и $T_0^* = 310$ К получены $\Delta T_{h*} = 40$ К и $T_{c*} = 60$ К, что дало общую разность температур 100 К. Эти значения превышают экспериментальные данные [34] благодаря геометрии сопла и эффективному теплообмену через стенку, однако тренд роста ΔT с увеличением M и T_0^* полностью согласуется с выводами [34]. Расхождение с максимальными значениями экспериментальными значениями объясняется более высокой начальной температурой (310 К против 299 К) и улучшенной конструкцией в нашем случае. Таким образом, численная модель достоверно воспроизводит физические процессы энергоразделения, обеспечивая эффективный подогрев газа в системах газоснабжения.

^{9, 10} Appendix 1

Газодинамическое разделение энергии может быть реализовано разными способами, и труба Леонтьева – лишь один из них. Альтернативным подходом является, например, вихревая труба Ранка–Хилша, где за счёт закрутки потока формируются холодная и горячая фракции. Вихревой метод так же не требует внешнего энерговода, однако применительно к магистральным потокам труба Леонтьева имеет преимущество – она интегрируется в прямоточной системе, используя существующий перепад давления, и обеспечивает более существенный нагрев газа на выходе.

Кроме того, отличие в механизме (устройство Леонтьева опирается на продольный теплообмен через стенку, а вихревая труба – на поперечное разделение потока вращением) определяет различные области применения. Труба Леонтьева перспективна именно для трубопроводных систем, где важно предотвратить охлаждение при дросселировании: например, на газораспределительных станциях установкой такого аппарата до дроссельного клапана можно поднять температуру газа и тем самым исключить образование гидратов при снижении давления [28].

Полученные в нашей работе значения (повышение температуры до 350 К в горячем потоке) подтверждают, что данная технология способна обеспечить требуемый подогрев, что уменьшает или устраняет необходимость в традиционных подогревателях (горелках).

Даже в рамках самого метода Леонтьева существует несколько путей повышения его эффективности. Первый – это улучшение формы сопла, чему посвящена данная работа. Мы установили, что правильный выбор геометрии (колоколообразный профиль с плавным расширением) даёт выигрыш: в нашем случае горячий поток оказался примерно на 20 К теплее, чем при использовании простого кольцеобразного сопла, при схожих условиях.

Второй подход – изменение материала и конструкции стенки, разделяющей каналы. Увеличение теплопроводности стенки или даже установка в нее специальных вставок способно интенсифицировать теплообмен. Например, исследования показывают, что использование тепловых труб (фазопереходных теплообменных элементов) в перегородке приводит к существенному росту передачи тепла между потоками [29-31].

Это позволяет ещё больше повысить разность температур на выходе, хотя и несколько усложняет конструкцию. Третий подход – введение дополнительных фаз или возмущений в потоке. В литературе предложено добавлять в поток дисперсные частицы, которые переносят тепло и таким образом увеличивают эффективную теплопередачу между каналами [32]. Также рассматривается возможность специально сформировать в сверхзвуковом канале зоны рециркуляции (например, мини-ступеньки на стенке или завихрители), что понижает коэффициент восстановления температуры в быстром потоке и усиливает отбор тепла. Однако такие меры сопряжены с ростом аэродинамического сопротивления и могут приводить к нестационарным эффектам. В работе [33], например, экспериментально изучались различные способы повышения энергоразделения – показано, что введение уступа в канале усиливает теплообмен, но важно правильно подобрать его положение, чтобы не снизить полную температуру потока чрезмерно.

ВЫВОДЫ

Результаты данного моделирования не только подтверждают известные закономерности, но и дают новые количественные оценки для совершенствования труб Леонтьева. Показано, что при типичных параметрах магистрального газа (метан, давление 3 МПа) можно достичь повышения эффективности энергоразделения между потоками при оптимальной конфигурации. На практике реализовать предложенные решения возможно при модернизации газораспределительных станций: установка колоколообразного сопла и использование вышеизложенных подходов позволит более эффективно подогревать газ перед редуцированием давления, снижая затраты топлива на подогрев и повышая надёжность. Кроме того, технология газодинамической стратификации применима и в других областях. К примеру, труба Леонтьева рассматривается для систем кондиционирования и охлаждения, где нужно без затрат энергии получить разность температур потоков. Перспективным направлением исследований является использование устройства для охлаждения сжатого воздуха в турбомашинах и

энергетических установках, а также для термостатирования оборудования в космических аппаратах. В дальнейшем планируется экспериментально проверить выявленные оптимальные конфигурации и режимы, а также изучить комбинирование рассмотренных методов (например, колоколообразное сопло в связке с тепловыми трубами в стенке или завихритель с теплопроводной перегородкой). Таким образом, данная работа вносит вклад в развитие газодинамических методов температурной стратификации, сочетая численное моделирование и анализ существующих решений для поиска оптимальных параметров работы трубы Леонтьева.

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ по проекту НШ-28.2022.4.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

В данном разделе приведены названия подписанных надписей, написанных на русском, молдавском (румынском) языках, переведенных на английский язык. Например,

¹**Fig. 1.** Fig. 1. Leontiev tube diagram. 1 – Separation chamber, 2 – External subsonic channel, 3 – Internal supersonic channel, 4 – Outlet pipe of the supersonic channel, 5 – Supersonic diffuser, 6 – Outlet pipe of the subsonic channel, 7 – Supersonic nozzle

²**Fig. 2.** Mesh of the 1st model.

³**Fig. 3.** Mesh of the 2nd model.

⁴**Fig. 4.** Temperature profile of the 1st and 2nd models.

⁵**Fig. 5.** Velocity profile of the 1st and 2nd models.

⁶**Fig. 6.** Pressure profile of the 1st and 2nd models.

^{7,8}**Table 1.** Comparison of energy separation efficiency.

^{9,10}**Table 2.** Comparison of energy separation efficiency.

Литература (References)

- [1] Ranque G. J. Experiences sur la détente giratoire avec productions simultanees d'un echappement d'air chaud et d'un echappement d'air froid [Experiments on vortex expansion with simultaneous production of hot and cold air exhausts]. *Journal de Physique et le Radium*, 1933, no. 4(7), pp. 112–114.
- [2] Noskov A.S., Lovtsov A.V., Khait A.V. Matematicheskoe modelirovanie effekta energorazdeleniya Ranka–Hil'sha s tsel'yu uvelicheniya energeticheskikh kharakteristik vikhrevoy truby [Mathematical modeling of the Rank–Hilsch energy separation effect to increase the energy characteristics of a vortex tube].

Omskii nauchnyi vestnik [Omsk Scientific Bulletin], 2011. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-effekta-energorazdeleniya-rankahilsha-s-tsel'yu-uvelicheniya-energeticheskikh-kharakteristik-vikhrevoy> (accessed 10.03.2025). (In Russian).

- [3] Li Chzhun Min. Issledovanie termoakusticheskogo nagreva gaza v gazostruynykh generatorakh Gartmana [Study of thermoacoustic gas heating in Hartmann gas-jet generators]. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [PhD Thesis Abstract], Moscow, Moscow Aviation Institute, 2004, 22 p. (In Russian).
- [4] Shchipachev A.M., Dmitrieva A.S. Primenenie effekta rezonansnogo energorazdeleniya v punktakh redukirovaniya prirodnogo gaza s tsel'yu povysheniya energoeffektivnosti sistemy gazoraspredeleniya [Application of the resonance energy separation effect in natural gas pressure reduction points to improve the energy efficiency of the gas distribution system]. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2021. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-effekta-rezonansnogo-energorazdeleniya-v-punktah-redutsirovaniya-prirodnogo-gaza-s-tsel'yu-povysheniya> (accessed 10.03.2025). (In Russian).
- [5] Burtsev S.A. Issledovanie putei povysheniya effektivnosti gazodinamicheskogo energorazdeleniya [Study of ways to improve the efficiency of gas-dynamic energy separation]. *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature Physics], 2014, vol. 52, no. 1, pp. 14–21. (In Russian).
- [6] Leontiev A.I. Sposob temperaturnoy stratifikatsii gaza i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya (Truba Leont'eva) [Method of gas temperature stratification and device for its implementation (Leontiev tube)]. Patent RF, no. 2106581, IPC F25B9/02.10.03.1998. (In Russian).
- [7] Leontiev A.I. Temperature stratification of supersonic gas flow – Temperaturnaya stratifikatsiya sverkhzvukovogo potoka gaza. *Doklady Physics*, 1997, vol. 42, no. 6, pp. 309–311.
- [8] Tsvetova E.V., Kovalnogov V.N., Fedorov R.V. Issledovanie effektivnosti kompleksnykh metodov intensifikatsii teplootdachi pri gazodinamicheskoy temperaturnoy stratifikatsii [Study of the effectiveness of complex methods for heat transfer intensification in gas-dynamic temperature stratification]. *Vestnik Uliyanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ulyanovsk State Technical University], 2020, no. 2–3(90–91), pp. 24–28. EDN ESSXVH. (In Russian).

- [9] Leontiev A.I., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov Y.A., Strongin M.M. Experimental investigation of energy (temperature) separation of a high-velocity air flow in a cylindrical channel with a permeable wall. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, vol. 105, pp. 206–215.
- [10] Khazov D.E. Chislennoe issledovanie bezmashinogo energorazdeleniya potokov szhimaemogo gaza [Numerical study of machine-free energy separation of compressible gas flows]. *Teplovyte protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2018, vol. 10, no. 1–2, pp. 25–36. (In Russian).
- [11] Popovich S.S., Egorov K.S., Vinogradov U.A. Experimental research of adiabatic wall temperature influenced by separated supersonic flow. *Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference, IHTC-15*, August 10–15, 2014, Kyoto, Japan. IHTC15-8962.
- [12] Makarov M., Makarova S. Numerical modeling of energy-separation in cascaded Leontiev tubes with a central body. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 115, article 09001. DOI: 10.1051/mateconf/201711509001.
- [13] Rudnik R.S., Matveev A.F., Kovalnogov V.N., Sherkunov V.V. Effektivnost' teplovogo razdeleniya v razlichnykh konfiguratsiyakh truby Leont'eva [Efficiency of thermal separation in various configurations of the Leontiev tube]. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2024, no. 11(119), pp. 852–865. (In Russian).
- [14] Vinogradov Yu.A., Zditovets A.G., Strongin M.M., Titov A.A. Eksperimental'noe issledovanie gazodinamicheskoy temperaturnoy stratifikatsii [Experimental study of gas-dynamic temperature stratification]. *Modeli i metody aerodinamiki: Materialy Pyatnadtsatoy Mezhdunarodnoy shkoly-seminara, Evpatoriya, 04–11 iyunya 2015 goda* [Models and Methods of Aerodynamics: Proceedings of the 15th International School-Seminar, Evpatoria, June 4–11, 2015]. Evpatoria: Moscow Center for Continuous Mathematical Education, 2015, pp. 45–46. EDN TBUOAZ. (In Russian).
- [15] Subudhi S., Sen M. Review of Ranque–Hilsch vortex tube experiments using air. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 52, pp. 172–178. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.103.
- [16] Xue Y., Arjomandi M., Kelso R. Experimental study of the thermal separation in a vortex tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, vol. 46, pp. 175–182. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2012.12.009.
- [17] Leontiev A.I., Popovich S.S., Vinogradov U.A., Kiselev N.A., Makarova M.S., Medvetskaya N.V., Strongin M.M. Sposob snizheniya davleniya prirodnogo gaza [Method of natural gas pressure reduction]. Patent RF, no. 2713551C1, 2020. (In Russian).
- [18] Popovich S.S. Ustroistvo dlia snizheniya davleniya prirodnogo gaza [Device for natural gas pressure reduction]. Patent RF, no. 194263C1, 2019. (In Russian).
- [19] Popovich S.S., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Makarova M.S. Primenenie sverkhzvukovogo bezmashinnogo metoda energorazdeleniya v snizhenii davleniya prirodnogo gaza [Application of supersonic machine-free energy separation method in pressure reduction of natural gas]. *Teplovyte protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2019, vol. 11, no. 1, pp. 2–15. (In Russian).
- [20] Vinogradov Y.A., Zditovets A.G., Leontiev A.I., Popovich S.S. Experimental research of shock wave processes influence on machineless gas flow energy separation effect. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 891, pp. 012080. doi: 10.1088/1742-6596/891/1/012080.
- [21] Zditovets A.G., Popovich S.S., Kiselev N.A., Vinogradov Y.A. Experimental study of machine-free energy separation methods in a single-phase compressible gas flow. *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2024, vol. 25, no. 6. doi: 10.33257/PhChGD.25.6.1157.
- [22] Popovich S.S. Aerodynamic cooling of the wall in the trace of a supersonic flow behind a backward-facing ledge. *Fluid Dynamics*, 2022, vol. 57, suppl. 1, pp. S57–S64. doi: 10.1134/S0015462822601310.
- [23] Leontiev A.I., Popovich S.S., Vinogradov U.A., Strongin M.M. Experimental research of supersonic aerodynamic cooling effect and its application for energy separation efficiency. *Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference, IHTC-16* [Trudy 16 Mezhdunarodnoi konferentsii po teploperedache, IHTC-16], Beijing, China, 2018, vol. 212244, pp. 1–8. doi: 10.1615/IHTC16.hte.0212244.
- [24] Leontiev A.I., Osipov A.N., Rybdylova O.D. The boundary layer on a flat plate in a supersonic-gas-droplet flow: Influence of evaporating droplets on the temperature of the adiabatic wall. *High Temperature*, 2015, vol. 53, no. 6, pp. 866–873. doi: 10.1134/S0018151X15060153.
- [25] Leontiev A.I., Lushchik V.G., Makarova M.S., Popovich S.S. The temperature recovery factor in a compressible turbulent boundary layer. *High Temperature*, 2022, vol. 60, no. 3, pp. 409–431. doi: 10.1134/S0018151X22030117.
- [26] Vinogradov Y.A., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Strongin M.M. Measurement of the adiabatic wall temperature of a flat plate in a supersonic air-droplet flow. *Fluid Dynamics*, 2020, vol. 55, no. 5, pp. 701–707. doi: 10.1134/S0015462820050146.
- [27] Khazov D.E., Medvetskaya N.V. Sposoby povysheniya effektivnosti truby Leont'eva [Ways to improve the efficiency of the Leontiev tube]. *Teplovyte protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2023, vol. 15, no. 12, pp. 543–553. (In Russian).
- [28] Rudnik R.S., Matveev A.F., Tsvetova E.V. Povyshenie effektivnosti magistral'nogo transporta gaza s pomoshch'yu truby Leont'eva [Improving the efficiency of the main gas transport using the Leontiev pipe]. *IV Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya dlya molodykh uchenykh "Transport i khraneniye uglevodorodov"* [IV International Scientific and Technical Conference

- for Young Scientists “Transport and Storage of Hydrocarbons”], Omsk, Omsk State Technical University, 2023, pp. 50–54. (In Russian).
- [29] Tsynaeva A.A., Tsynaeva E.A., Shkolin E.V. Ob ispol'zovanii teplovykh trub dlya povysheniya effektivnosti gazodinamicheskoy temperaturnoy stratifikatsii [On the use of heat pipes to improve the efficiency of gas-dynamic temperature stratification]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta [Bulletin of the Samara State Aerospace University], 2013, no. 3(41), part 2, pp. 192–197. (In Russian).
- [30] Tsynaeva A.A., Tsynaeva E.A. Modelirovanie temperaturnoy stratifikatsii v modifitsirovannoy trube Leont'eva s teplovymi trubami [Modeling of temperature stratification in a modified Leontiev tube with heat pipes]. Al'manakh sovremennoy nauki i obrazovaniya [Almanac of Modern Science and Education], 2013, no. 3(70), pp. 206–208. (In Russian).
- [31] Tsynaeva A.A., Tsynaeva E.A., Shkolin E.V. Modelirovanie temperaturnoy stratifikatsii v modifitsirovannoy trube Leont'eva s teplovymi trubami [Modeling of temperature stratification in a modified Leontiev tube with heat pipes]. Avtomatizatsiya protsessov upravleniya [Automation of Control Processes], 2013, no. 2(32), pp. 29–34. (In Russian).
- [32] Kovalnogov N.N., Fokeeva E.V. Povyshenie effektivnosti gazodinamicheskoy temperaturnoy stratifikatsii za schet ispol'zovaniya dispersnogo rabocheho tela [Improving the efficiency of gas-dynamic temperature stratification by using a dispersed working medium]. Materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Sovremennye nauchno-tekhnicheskie problemy transporta” [Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference “Modern Scientific and Technical Problems of Transport”], Ulyanovsk, 2009, pp. 64–67. (In Russian).
- [33] Burtsev S.A., Leontiev A.I. Study of the influence of dissipative effects on the temperature stratification in gas flows (Review) – Issledovanie vliyaniya dissipativnykh effektiv na temperaturnuyu stratifikatsiyu v gazovykh potokakh (Obzor). High Temperature, 2014, vol. 52, no. 2, pp. 297–307. DOI: 10.1134/S0018151X13060060.
- [34] Zditovets, A. G., Kiselev, N. A., Vinogradov, Y. A., & Strongin, M. M. (2017). Influence of the parameters of supersonic flow on effectiveness of gazdynamic method of temperature separation. Journal of Physics: Conference Series, 891(1), 012079. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012079>

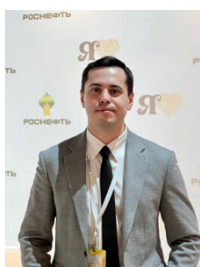
Сведения об авторах.



Ковальногов Владислав Николаевич, д.т.н. профессор, заведующий кафедрой “Тепловая и топливная энергетика”
Область научных интересов: Математическое моделирование, численные методы и программы,
E-mail: kvn@ulstu.ru



Матвеев Александр Федорович, аспирант УлГТУ
Область научных интересов: Математическое моделирование, численные методы и программы
E-mail: maf78@mail.ru



Рудник Роман Сергеевич, аспирант УлГТУ
Область научных интересов: Математическое моделирование, численные методы и программы
E-mail: kuvaldatmb99@gmail.com