

УДК 533.6.011.6
DOI 10.17513/snt.40320

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ВХОДНОГО СОПЛА ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРАТИФИКАЦИИ В ТРУБЕ ЛЕОНТЬЕВА

Ковальногов В.Н., Рудник Р.С., Матвеев А.Ф., Азылов Т.З.

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск,
e-mail: kuvaldatmb99@gmail.com

Целью исследования является оптимизация с помощью математического моделирования геометрии входного сопла в трубе Леонтьева для повышения эффективности газодинамической стратификации в условиях отсутствия внешнего теплообмена. В отличие от существующих подходов, в которых преимущественно рассматриваются сопла Лаваля для ракетных и холодногазовых систем, в данном исследовании впервые анализируются колоколообразные и кольцевые конфигурации сопел в связи с процессом энергоразделения в трубе Леонтьева. Численное моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS Fluent с использованием уравнений Навье–Стокса и турбулентной модели Shear Stress Transport. Результаты показывают, что колоколообразное сопло обеспечивает более стабильный сверхзвуковой поток и снижает псевдошоковые потери, а кольцевое сопло, напротив, формирует высокую интенсивность локального перераспределения энергии, сопровождающуюся ростом турбулентных потерь. Полученные результаты подчеркивают важность выбора оптимальной конфигурации сопла для достижения максимальной эффективности работы теплообменных устройств. В заключение сделан вывод о предпочтительности использования колоколообразных сопел в системах, требующих стабильного перераспределения энергии, а также обозначены возможные направления дальнейших исследований. Данные результаты могут быть применены при проектировании систем теплообмена для газотранспортных и энергетических установок.

Ключевые слова: газодинамическая стратификация, сопло Лаваля, численное моделирование, колоколообразное сопло, эффективность

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

OPTIMIZATION OF INLET NOZZLE GEOMETRY TO ENHANCE THE EFFICIENCY OF GAS-DYNAMIC STRATIFICATION IN THE LEONTIEV TUBE

Kovalnogov V.N., Rudnik R.S., Matveev A.F., Azylov T.Z.

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, e-mail: kuvaldatmb99@gmail.com

The aim of the study is to optimize the geometry of the inlet nozzle in the Leontiev tube using mathematical modeling to enhance the efficiency of gas-dynamic stratification under conditions of no external heat exchange. Unlike existing approaches, which predominantly focus on Laval nozzles for rocket and cold-gas systems, this study is the first to analyze bell-shaped and annular nozzle configurations in conjunction with the energy separation process in the Leontiev tube. Numerical modeling was performed in the ANSYS Fluent software package using the Navier–Stokes equations and the turbulence model of kinetic energy and specific dissipation rate. The results show that the bell-shaped nozzle provides a more stable supersonic flow and reduces shock-related losses, while the annular nozzle, on the other hand, generates a high intensity of local energy redistribution, accompanied by an increase in turbulent losses. The obtained results highlight the importance of selecting the optimal nozzle configuration to achieve maximum efficiency in heat exchanger performance. The conclusion suggests the preference for bell-shaped nozzles in systems that require stable energy redistribution, and identifies potential directions for further research. These results can be applied in the design of heat exchange systems for gas transportation and energy installations.

Keywords: gas-dynamic stratification, Laval nozzle, numerical modeling, bell-shaped nozzle, efficiency

The study was supported by a grant from the President of the Russian Federation under project NSh-28.2022.4.

Введение

В современных исследованиях газодинамических систем математическое моделирование играет ключевую роль, обеспечивая точное описание и прогнозирование поведения потоков газа в различных условиях. Труба Леонтьева (ТЛ) представляет собой теплообменный аппарат типа «труба в трубе» [1], основанный на принципе га-

зодинамической температурной стратификации, которая позволяет перераспределять энергию между дозвуковым и сверхзвуковым потоками без внешнего теплообмена (рис. 1). Этот процесс критически зависит от геометрии входного сопла, которое определяет параметры потока, такие как число Маха, распределение давления и температуры.

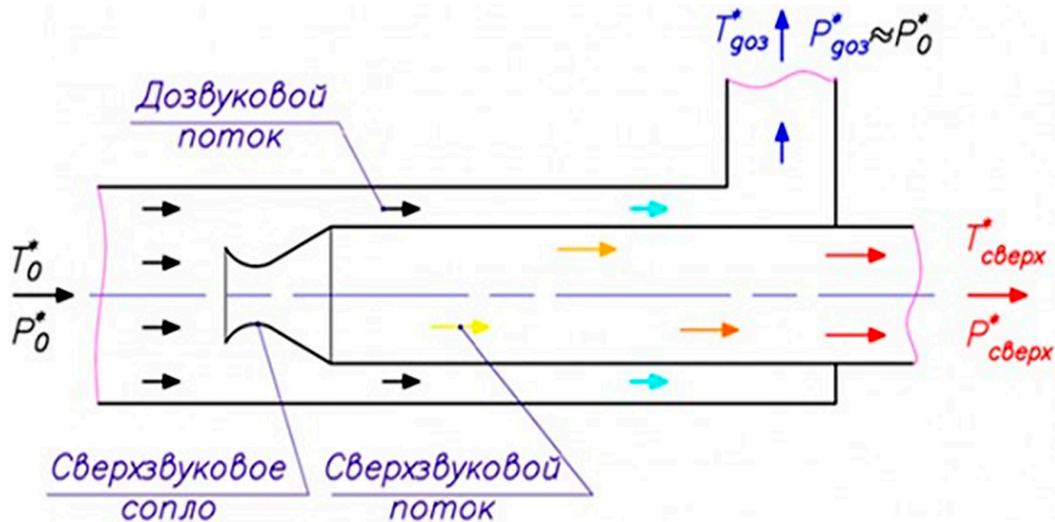


Рис. 1. Схема трубы Леонтьева
Источник: составлено авторами по [4]

Несмотря на обширные исследования сопел Лавала, применяемых для ракетных двигателей и аэродинамических труб [2, 3], их использование в системах с газодинамической стратификацией остается недостаточно исследованным. В частности, до сих пор слабо раскрыты вопросы влияния типа сопла (колоколообразного или кольцевого) на интенсивность псевдошоковых волн, турбулентные потери и устойчивость потока в условиях трубы Леонтьева.

ТЛ эффективно разделяет поток на зоны с пониженной и повышенной температурами, что делает ее полезной для улучшения теплообмена и предотвращения образования гидратов в газопроводах [5]. Кроме того, перспективной областью применения является повышение энергоэффективности и надежности в автомобильных газонаполнительных компрессорных станциях (АГНКС), где оптимальная температура сжатого газа и снижение тепловой нагрузки на оборудование имеют ключевое значение для стабильной и экономичной работы компрессорных агрегатов.

В большинстве работ, таких как исследование О. Dumitrescu с соавторами, фокус сделан на оптимизации сопел для создания тяги или управления двухфазными потоками, при этом игнорируются особенности теплообмена через перегородку в коаксиальных каналах [6]. Например, найдены исследования, посвященные двойным соплам и устойчивости потока в переменных условиях, однако влияние геометрии на температурную стратификацию не рассматривалось [7, 8].

Хотя общие закономерности, влияющие на форму сопла Лавала (например, углы су-

жения и расширения), достаточно хорошо описаны в научной литературе, для трубы Леонтьева требуется оптимизация, учитывающая особенности теплообмена через перегородку, а также требуемую разницу температур торможения между каналами [9]. Например, работа по оценке влияния входного стагнационного давления и объемного нагрева на конденсационный водяной пар в сверхзвуковом сопле Лавала продемонстрировала, что небольшое увеличение входного давления может компенсировать снижение массового расхода при наличии теплового воздействия [10].

В отличие от предыдущих работ, где сопла изучались изолированно [9–11], в данной статье предложена интегральная модель, учитывающая взаимодействие газодинамических и тепловых процессов в коаксиальных каналах.

В одной из работ численно анализировались потоки в соплах с использованием модели $k-\epsilon$, но без сравнения с $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport), которая более точно описывает пристеночные турбулентные эффекты [12]. Это создает пробел в понимании оптимальной конфигурации сопла для систем с ограниченным пространством и высокими требованиями к стабильности потока.

Кроме того, найдены работы, где исследуется влияние длины сопла на эффективность разделения энергии в ТЛ с использованием газа с низким числом Прандтля. Установлено, что увеличение длины сопла улучшает разделение энергии, это делает систему более эффективной для использования в теплообменниках [13].

Другое исследование акцентирует внимание на диссипативных эффектах, которые играют важную роль в температурной стратификации [14]. В данной работе рассматривается влияние этих эффектов на изменение температуры в газовых потоках, что напрямую воздействует на эффективность теплообмена в трубах Леонтьева. В частности, исследуется, как трение и другие потери энергии изменяют структуру температурной стратификации и общий теплообмен в системах.

Исследования показали, что геометрия и расположение сопел существенно воздействуют на эффективность охлаждения газовыми струями [15]. В частности, выявлены различия в теплоотводе в зависимости от типа сопел, а также расстояния между соплом и охлаждаемой поверхностью, что напрямую влияет на тепловую эффективность и распределение температуры.

Сопла Лавала являются ключевыми элементами для формирования сверхзвуковых потоков, преобразующих потенциальную энергию тепла и давления газа в кинетическую энергию (рис. 2). Эта способность делает их незаменимыми в инженерных системах, таких как ракетные двигатели, гиперзвуковые испытательные камеры и системы теплообмена.

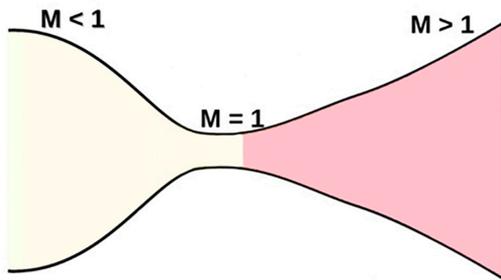


Рис. 2. Схема сопла Лавала
Источник: составлено авторами по [16]

Основной принцип работы сопла Лавала заключается в последовательном изменении площади поперечного сечения канала. Сужающаяся часть сопла (конвергентный участок) ускоряет поток газа в дозвуковом режиме, приводя его к звуковой скорости в горловине. После горловины, в дивергентной части сопла, поток продолжает ускоряться, достигая сверхзвуковых скоростей.

Различные исследования подтвердили важность геометрии сопел для достижения оптимальных параметров работы. Основные виды сопел включают:

1) конические сопла с линейной геометрией, которые просты в изготовлении и обеспечивают стабильные потоки;

2) колоколообразные сопла, которые имеют классическую сходящуюся-расходящуюся форму; их плавные контуры минимизируют турбулентность и потери энергии. Сопла данной конфигурации являются темой данного исследования;

3) кольцевые сопла, используются для управления потоком в сложных условиях, обеспечивая высокую точность регулирования параметров.

Каждый тип имеет свои преимущества в зависимости от приложения. Например, конические сопла подходят для простых систем, тогда как колоколообразные используются в высокоточных инженерных задачах [17].

Цель исследования: провести сравнительный анализ колоколообразных и кольцевых сопел Лавала, применяемых в трубе Леонтьева, и определить влияние их геометрии на распределение давления, скорости и температуры в дозвуковом и сверхзвуковом потоках для обоснования оптимальных параметров, повышающих эффективность газодинамической стратификации.

Материалы и методы исследования

В рамках данного исследования для численного анализа газодинамических процессов в трубе Леонтьева применен программный комплекс ANSYS Fluent, который решает систему уравнений Навье–Стокса, описывающих движение вязкого сжимаемого газа. Данный подход основан на фундаментальных уравнениях сохранения массы, импульса и энергии, а также уравнении состояния рабочего тела, что позволяет точно моделировать поведение сверхзвуковых и дозвуковых потоков в сложных геометрических конфигурациях.

Уравнение сохранения массы (неразрывности):

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

где ρ – плотность газа, v – вектор скорости.

Уравнение сохранения импульса (Навье–Стокса):

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + F, \quad (2)$$

где p – давление, τ – тензор вязких напряжений, F – внешние силы.

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (v(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h, \quad (3)$$

где $E = e + \frac{v^2}{2}$ – полная энергия, k – коэффициент теплопроводности, T – температура, S_h – источник тепла.

Уравнение состояния идеального газа:

$$p = \rho RT, \quad (4)$$

где R – удельная газовая постоянная.

Для учета турбулентных эффектов применена модель турбулентности k – ω SST, которая описывается следующими уравнениями:

Уравнение для кинетической энергии турбулентности k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v k) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_k - \rho \omega, \quad (5)$$

где G_k – генерация турбулентной кинетической энергии, μ_t – турбулентная вязкость, σ_k – коэффициент Прандтля для k .

Уравнение для удельной скорости диссипации турбулентной энергии ω :

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \omega) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla \omega \right) + \frac{\rho \gamma G_k}{\mu_t} - \rho \beta \omega^2, \quad (6)$$

где γ и β – эмпирические константы модели, μ_t – турбулентная вязкость, σ_k – коэффициент Прандтля для ω .

Граничные условия для моделирования включают задание полного давления и температуры на входе сопла, статического давления на выходе, а также условия прилипания и адиабатичности на стенках. Эти граничные условия отражают реальные эксплуатационные параметры системы и обеспечивают устойчивость численных расчетов.

Расчеты выполнялись в стационарной постановке с использованием схемы второго порядка точности. Для турбулентного течения была выбрана модель k – ω SST, наиболее подходящая в областях с интенсивными градиентами скорости. Плотность газа рассчитывали с использованием модели идеального газа.

Расчетная область была разделена на несколько зон:

1) зону с наиболее плотной сеткой вдоль стенок внутреннего канала, где происходит теплообмен;

2) зону вдоль оси внутреннего канала и центральной части окружности кольцевого канала, где наблюдаются наибольшие значения скорости и температуры;

3) зону с менее плотной сеткой в оставшейся части области.

Базовый размер ячеек составлял 0,001 м. При увеличении размера сетки наблюдалось снижение точности расчетов, а при уменьшении – значительный рост временных затрат. Установленный базовый размер был признан оптимальным с точки зрения точности и вычислительных ресурсов.

На входе в расчетную область задавалось полное давление $P_{total} = 280\,000$ Па и начальное избыточное давление $P_{supersonic} = 200\,000$ Па, что соответствует условиям, близким к

реальным эксплуатационным параметрам для обеспечения устойчивого течения в каналах. На выходе задавалось избыточное давление $P_{gauge} = 50\,000$ Па.

Расчеты проводили до достижения остаточных невязок на уровне 10^{-6} . Особое внимание было уделено анализу скорости сходимости для различных конфигураций сетки и параметров модели.

Результаты исследования и их обсуждение

В рамках численного анализа выполнено моделирование двух типов сопел Лаваля: колоколообразного и конического. Для каждой конфигурации проведен анализ распределения температуры, скорости и давления потока газа.

На рисунке 3 показано распределение температуры.

Колоколообразное сопло (слева) характеризуется плавным изменением температуры, тогда как в кольцевом сопле (справа) температура газа в кольцевом канале значительно повышается, этот эффект обусловлен переходом сверхзвукового потока в дозвуковой через псевдошоковые волны (рис. 4).

На рисунке 5 представлено распределение давления. В кольцевом сопле наблюдаются резкие перепады давления в дивергентной части, связанные с переходом через псевдошоковые волны. В колоколообразном сопле давление изменяется более плавно, что снижает вероятность образования ударных волн.

На рисунке 6 представлено распределение температуры и давления вдоль сопел.

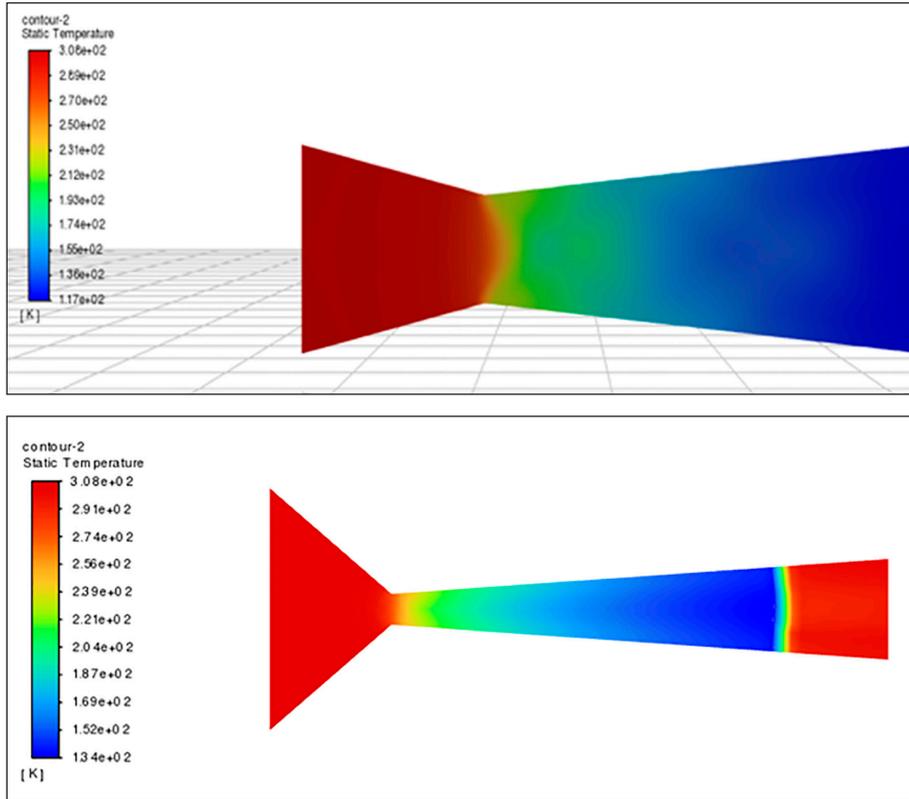


Рис. 3. Сцены распределения температуры
 Источник: составлено авторами

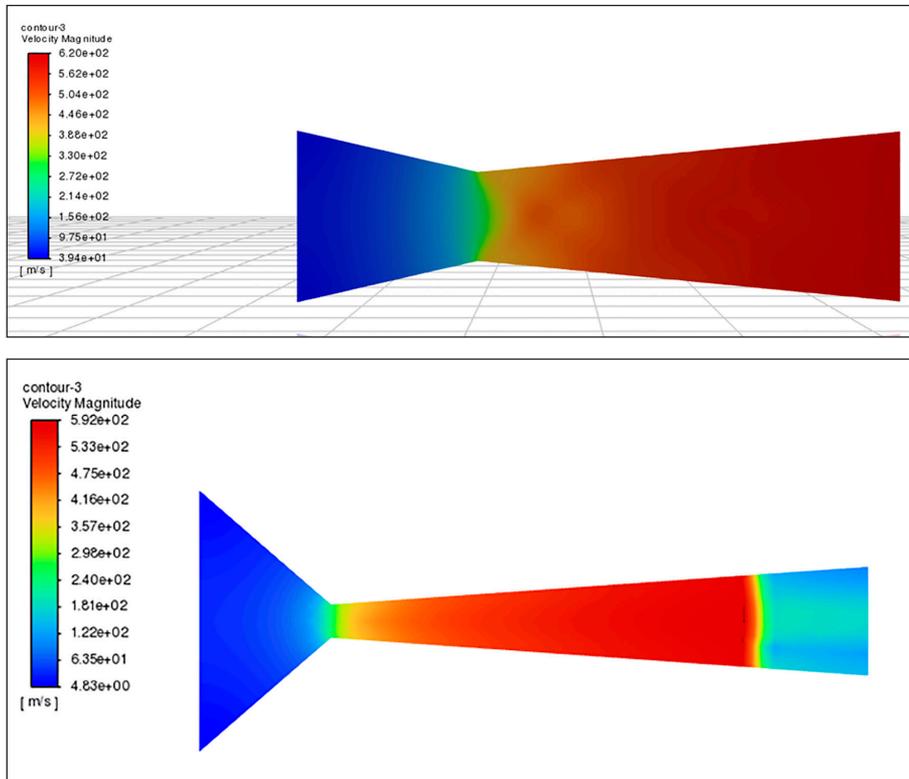


Рис. 4. Сцены распределения скорости
 Источник: составлено авторами

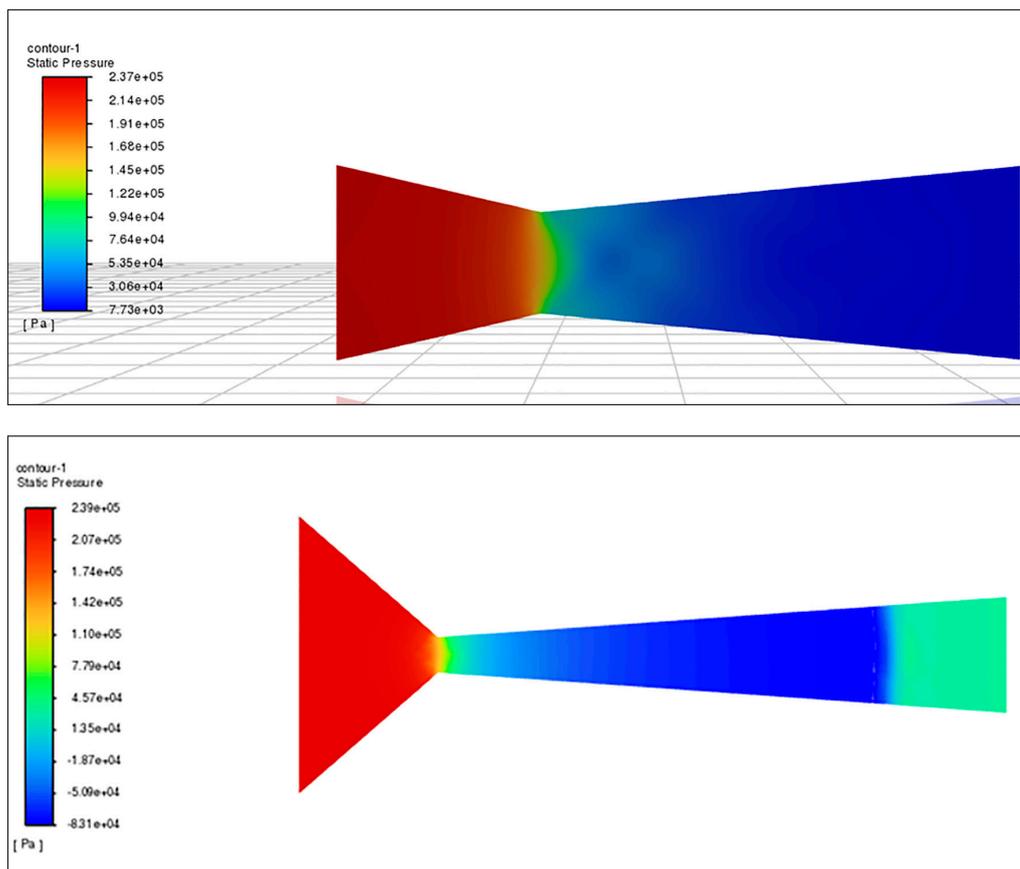


Рис. 5. Сцены распределения давления (составлено авторами)

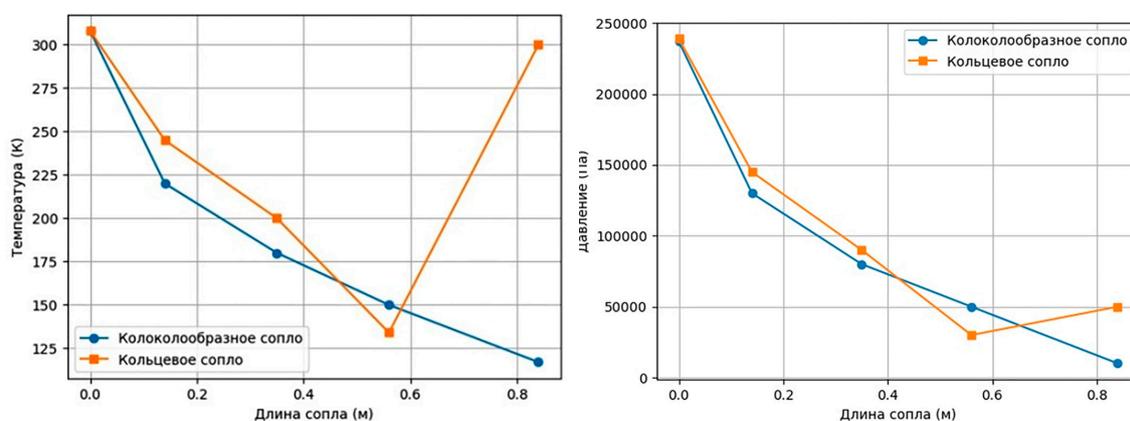


Рис. 6. Сцены распределения температуры и давления вдоль сопел
Источник: составлено авторами

Колоколообразное сопло демонстрирует плавное уменьшение температуры от входа к выходу, достигая минимального значения 117 К. В кольцевом сопле наблюдается аналогичное снижение температуры, однако в конце отмечается ее повышение до 300 К, что связано с особенностями аэродинамики данного типа сопла. В то же время давление в коло-

лообразном сопле плавно снижается от 237 000 Па на входе до 10 000 Па на выходе. В кольцевом сопле после снижения до 30 000 Па в сужающейся части давление увеличивается до 50 000 Па перед выходом, что связано с формированием псевдошоковой волны.

На рисунке 7 представлено распределение скорости вдоль сопел.

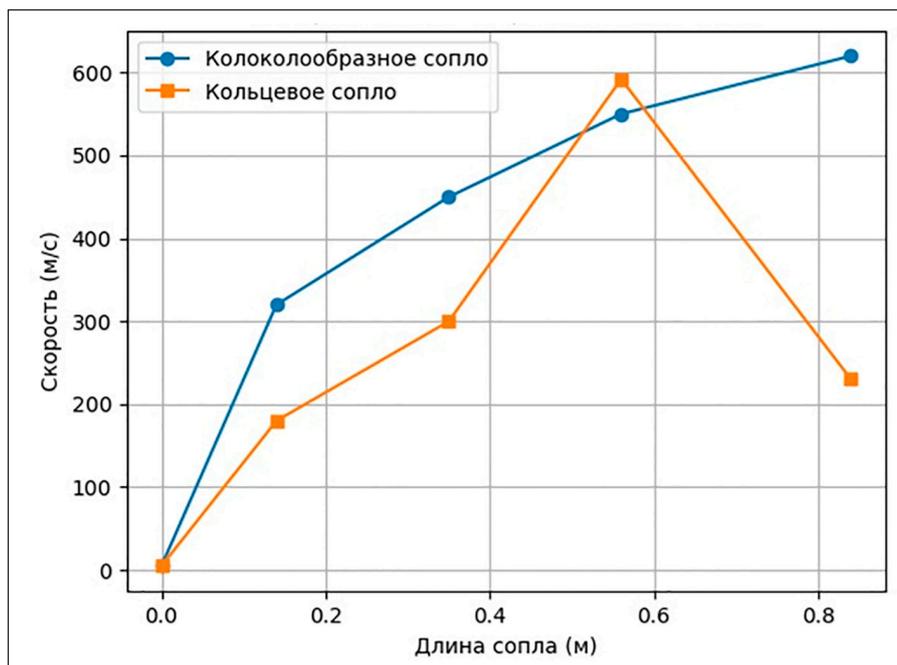


Рис. 7. Распределение скорости вдоль сопел
Источник: составлено авторами

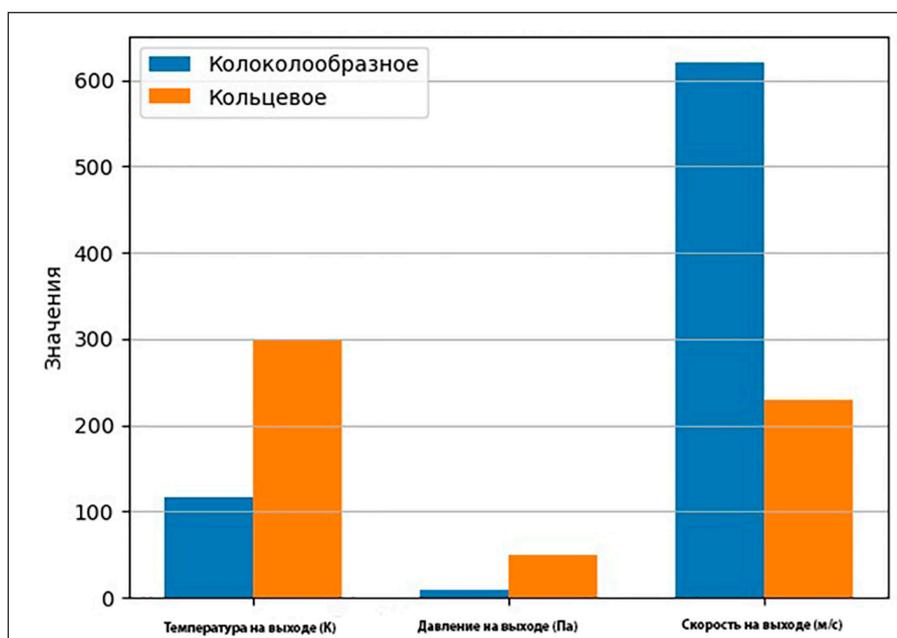


Рис. 8. Сравнение параметров на выходе сопел
Источник: составлено авторами

Колоколообразное сопло демонстрирует устойчивое увеличение скорости до 620 м/с на выходе. В кольцевом сопле скорость также возрастает, но в финальной четверти наблюдается ее снижение до 230 м/с, что связано с перераспределением энергии потока. На рисунке 8 приведено сравнение параметров на выходе сопел.

Колоколообразное сопло обеспечивает более низкую температуру и давление, но максимальную скорость. Кольцевое сопло отличается повышенными значениями температуры и давления, но меньшей скоростью на выходе.

Основные достоинства и недостатки представленных сопел в таблице.

Достоинства и недостатки каждой конфигурации сопла

Конфигурация сопла	Достоинства	Недостатки
Колоколообразное сопло	Плавное изменение параметров потока снижает вероятность образования ударных волн	Более сложная конструкция, что может увеличивать затраты на производство
	Высокая стабильность потока и минимальные потери энергии	Меньшая интенсивность перераспределения энергии в условиях высоких нагрузок
	Обеспечивает лучшее перераспределение энергии между дозвуковым и сверхзвуковым потоками	
Коническое сопло	Простая геометрия, что снижает производственные издержки	Резкие градиенты давления и температуры создают турбулентные зоны
	Более высокая интенсивность перераспределения энергии	Имеется вероятность формирования псевдошоковых волн, снижающих эффективность

Примечание: составлено авторами на основе численного моделирования в ANSYS Fluent.

Для верификации численной модели входного сопла – критически важного элемента трубы Леонтьева – результаты моделирования были сопоставлены с экспериментальными данными из работы Dumitrescu с соавторами, где проводились испытания сопла Лавала с холодным газом [18]. Сравнение показало, что численное значение давления на выходе колоколообразного сопла (10 000 Па) отклоняется от экспериментального значения (примерно 15 000 Па) менее чем на 33%, что в контексте сложной геометрии и турбулентных эффектов считается приемлемым. Распределение скорости (620 м/с) также находится в пределах экспериментального диапазона (300–600 м/с) с отклонением около 3%, что подтверждает надежность модели $k-\omega$ Shear Stress Transport (SST) для описания сверхзвуковых потоков в условиях исследования.

Результаты моделирования подтверждают и дополняют данные литературы, показывая, что колоколообразные сопла Лавала обеспечивают стабильное перераспределение энергии между дозвуковым и сверхзвуковым потоками, снижая турбулентные потери и повышая эффективность системы. Конические сопла, напротив, усиливают локальное перераспределение энергии, но при этом отмечен рост турбулентных эффектов и псевдошоковых волн, что снижает их эффективность [19].

Новизна исследования заключается в анализе колоколообразных и кольцевых сопел в контексте трубы Леонтьева, что позволило выявить специфические закономерности, такие как влияние геометрии сопла на псевдошоковые волны, и их связь с температурной стратификацией.

Заключение

Использование колоколообразных сопел в конструкции трубы Леонтьева позволяет повысить эффективность устройства за счет минимизации турбулентных потерь и обеспечения стабильной работы системы. Конические сопла, несмотря на их простоту, лучше подходят для задач, где требуется интенсивное перераспределение энергии, но их применение ограничено высокими потерями энергии и сниженной устойчивостью процессов.

В перспективе полученные результаты могут найти применение при совершенствовании автомобильных газонаполнительных компрессорных станций, где рациональное распределение тепловой энергии в процессе сжатия служит одним из ключевых условий надежной и экономичной работы компрессоров.

Список литературы

1. Леонтьев А.И. Температурная стратификация сверхзвукового газового потока // Доклады академии наук. Энергетика. 1997. Т. 354, № 4. С. 475-477.
2. Chanphavong L. Numerical investigation of premixed combustion of producer gas with hydrogen injection in a cyclonical chamber // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2024. Vol. 46. № 1. P. 3644–3662. DOI: 10.1080/15567036.2024.2323154.
3. Baloni B.D., Kumar S.P., Channiwalwa S.A. Computational Analysis of Bell Nozzles // Proceedings of the 4th International Conference of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer (FFHMT'17): materials conf. (Toronto, Canada, August 21–23, 2017). Toronto: International ASET Inc. 2017. P. 110-1–110-6. DOI: 10.11159/ffhmt17.110. URL: https://avestia.com/FFHMT2017_Proceedings/files/paper/FFHMT_110.pdf (дата обращения: 17.02.2025).
4. Попович С.С., Здитовец А.Г., Киселёв Н.А., Макарова М.С. Исследование возможностей использования эффекта безмашинного энергоразделения для безогневого подогрева и редуцирования давления природного газа:

стендовый доклад // Всероссийская конференция молодых учёных-механиков, YSM-2018: материалы конференции (Сочи, 4–14 сентября 2018 года). Сочи. 2018. URL: <http://youngschool.imec.msu.ru/index.php/ru/component/zoo/item/issledovanie-vozmozhnostej-ispolzovaniya-effektabezmashinnogo-energorazdeleniya-dlya-bezognevnogo-podogreva-i-redutsirovaniya-davleniya-prirodnogo-gaza> (дата обращения: 23.02.2025).

5. Рудник Р.С., Матвеев А.Ф., Цветова Е.В. Повышение эффективности магистрального транспорта газа с помощью трубы Леонтьева // Транспорт и хранение углеводородов. 2023. № 1. С. 50–54.

6. Dumitrescu O., Gherman B., Tipa T. Development of a Laval nozzle for a cold gas propulsion system // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 400. № 042016. DOI: 10.1088/1757-899X/400/4/042016.

7. Perigo D., Schwane R., Wong H.Y.W. A Numerical Comparison of the Flow in Conventional and Dual Bell Nozzles in the Presence of an Unsteady External Pressure Environment // Proceedings of the 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit: materials conf. Huntsville, Alabama, 20–23 July 2003. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 2003. DOI: 10.2514/6.2003-4731. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2003-4731> (дата обращения: 17.02.2025).

8. Martelli E., Nasuti F., Onofri M. Numerical parametric analysis of dual-bell nozzle flows // AIAA Journal. 2007. Vol. 45. P. 640–650. DOI: 10.2514/1.26690.

9. Foque D., Nuyttens D. Effects of nozzle type and spray angle on spray deposition in ivy pot plants // Pest Management Science. 2010. Vol. 67. P. 199–208. DOI: 10.1002/ps.2051.

10. Huang M., Luo Q.H., Sun B.G., Zhang S., Wang K., Bao L., Li Q., Tang X., Deng W. Experimental investigations of the hydrogen injectors on the combustion characteristics and performance of a hydrogen internal combustion engine // Sustainability. 2024. Vol. 16. № 5. P. 1940. DOI: 10.3390/su16051940. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/5/1940> (дата обращения: 17.02.2025).

11. Zeoli N., Tabbara H., Gu S. CFD modeling of primary breakup during metal powder atomization // Chemical Engineering Science. 2011. Vol. 66. P. 6498–6504. DOI: 10.1016/j.ces.2011.09.014.

12. Makarov M.S., Makarova S.N. Numerical simulation of energy separation of low-Prandtl gas mixture flowing in the finned single Leontiev tube // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1359. № 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/1359/1/012022.

13. Makarov M.S., Makarova S.N. The influence of the supersonic nozzle length on the efficiency of energy separation of low-Prandtl gas flowing in the finned single Leontiev tube // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. Vol. 1675, Is. 1. №. 012011. DOI: 10.1088/1742-6596/1675/1/012011.

14. Burtsev S.A., Leontiev A.I. “Study of the influence of dissipative effects on the temperature stratification in gas flows”, International Heat Transfer Conference. 2014. Vol. 52. P. 297–307. DOI: 10.1134/S0018151X13060060.

15. Kobayashi H., Kabeya K., Takashima Y., Takeda G. Effect of Nozzle Geometry and Distance on Cooling Performance of Impinging Jets // ISIJ International. 2018. Vol. 58, Is. 8. P. 1500–1509. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-133.

16. Recchia S. Cosmic ray driven galactic winds // International Journal of Modern Physics D. 2021. Vol. 30. № 3. P. 2150017-1–2150017-10. DOI: 10.1142/S0218271821500175. URL: <https://www.worldscientific.com/doi/10.1142/S0218271821500175> (дата обращения: 17.02.2025).

17. Siddhartha D.V.S., Das Sadiq K., Sarath R.S. Comparative Study of Shock Formation in Bell and Conical Nozzle // Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer. 2023. DOI: 10.1007/978-19-6945-4_13.

18. Dumitrescu O., Gherman B., Tipa T. “Development of a Laval nozzle for a cold gas propulsion system” // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018. Vol. 400. № 4. P. 042016. DOI: 10.1088/1757-899X/400/4/042016.

19. Sahebzadeh S., Montazeri H., Rezaeiha A. Wind energy harvesting with building-integrated ducted openings: CFD simulation and neural network optimization // Energy Reports. 2024. Vol. 11. P. 1053–1078. DOI: 10.1016/j.egyr.2023.12.033.