

Эффективность теплового разделения в различных конфигурациях трубы Леонтьева

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

Ульяновский государственный технический университет

Аннотация. В статье рассматривается численное моделирование процесса разделения энергии (температурной стратификации) в трубе Леонтьева, проведенное с использованием программного обеспечения STAR-CCM+. Исследование сосредоточено на сравнительном анализе двух различных конструкций трубы, каждая из которых предназначена для создания разности температур в потоках газа. В ходе моделирования было установлено, что сверхзвуковой поток, проходящий через трубу, достигает значительно повышенной температуры на выходе, тогда как дозвуковой поток, напротив, характеризуется заметным понижением температуры. Приведены детализированные профили скорости и температуры газа для обеих конструкций, демонстрирующие эффективность каждого из вариантов трубы Леонтьева в создании четко выраженных областей с разной температурой газа без необходимости в дополнительном внешнем теплообмене. Полученные результаты имеют практическое значение для повышения эффективности работы газораспределительных станций, позволяя более эффективно управлять тепловыми потоками и предотвращать образование кристаллогидратов, а также могут быть использованы в других технологических процессах, где требуется разделение температурных потоков без внешнего подогрева или охлаждения.

Ключевые слова: труба Леонтьева, численное моделирование, STAR-CCM+, температурная стратификация, газовый поток.

Введение

Интерес к разделению энергии в газовых потоках в трубе Леонтьева обусловлен возможностью повышения эффективности работы газораспределительных станций (ГРС). Такие устройства могут использоваться для подогрева газа перед узлом редуцирования, предотвращая образование кристаллогидратов после снижения давления и снижая потребление топлива на горелках для подогрева [1]. Это не только снижает эксплуатационные затраты, но и способствует более экологичному использованию ресурсов [2]. В предыдущих исследованиях, таких как работы Леонтьева А.И. [3, 4] и Бурцева С.А. [5], были заложены основы для понимания принципов энергоразделения и применения труб Леонтьева в различных областях. В последние годы исследования в области газодинамического разделения энергии продолжают активно развиваться, что

связано с необходимостью повышения эффективности и экологической безопасности технологических процессов. Исследования [6] подчеркивают значительный потенциал применения газодинамической температурной стратификации для повышения энергоэффективности в промышленных процессах, таких как сушка керамических изделий. В данной работе показано, что использование отработанных сушильных агентов может существенно повысить эффективность процессов теплообмена, что открывает новые перспективы для применения данной технологии в различных отраслях промышленности.

В работе [2] показано, что труба Леонтьева может эффективно использоваться для транспортировки не только природного газа, но и водорода, а также сжиженного природного газа (СПГ).

Важным направлением современных исследований также является повышение эффективности процесса газодинамического разделения энергии путем применения новых материалов и технологий. Как показано в работе [7], использование специальных дисперсных фаз в трубах Леонтьева позволяет значительно увеличить теплопередачу и, следовательно, повысить общую эффективность процесса. Это открывает новые возможности для дальнейшего совершенствования конструкции труб и улучшения их эксплуатационных характеристик.

В работе [8] рассматривается применение тепловых труб как одного из перспективных методов для повышения эффективности газодинамической температурной стратификации. Тепловые трубы, обладая высокой теплопроводностью, могут существенно улучшить процесс переноса тепла между различными потоками газа.

Таким образом, данные исследования подчеркивают важность и актуальность дальнейшего изучения и оптимизации конструкции трубы

Леонтьева для повышения эффективности транспортировки газа и других промышленных процессов

Постановка задачи и метод решения

Труба Леонтьева представляет собой теплообменный аппарат типа "труба в трубе", где потоки газа проходят по двум каналам, разделенным перегородкой. Предварительно сжатый газ поступает в два канала расположенных коаксиально. Поток в первом канале остается дозвуковым, а во втором канале разгоняется до сверхзвуковых скоростей в сопле Лавалья. В результате процессов, происходящих внутри трубы, температуры торможения на выходах отличаются от начальной температуры: в дозвуковом канале температура снижается, а в сверхзвуковом — повышается. Эти процессы, называемые энергоразделением, перераспределяют полную энергию (температуру) потока газа без совершения технической работы и теплообмена с окружающей средой, создавая "холодные" и "горячие" области в потоке [9].

Для численного моделирования использовались уравнения Навье-Стокса, усредненные по Рейнольдсу (RANS), уравнения энергии и стандартная модель турбулентности k-ε [10]. Дискретизация уравнений осуществлялась методом конечных объемов с использованием программного обеспечения STAR-CCM+ [11].

Чтобы получить усреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, каждая переменная решения ϕ в мгновенных уравнениях Навье-Стокса разлагается на её среднее, или усреднённое, значение ϕ^- и её флуктуирующую компоненту ϕ' :

$$\phi = \phi^- + \phi',$$

где ϕ представляет собой компоненты скорости, давления, энергии или концентрации видов.

Процесс усреднения может рассматриваться как усреднение по времени для стационарных состояний и ансамблевое усреднение для повторяющихся переходных состояний. В результате уравнения для средних величин по существу идентичны исходным уравнениям, за исключением того, что в уравнении переноса импульса теперь появляется дополнительный член [12]. Этот дополнительный член представляет собой тензор напряжений, который имеет следующее определение:

$$T_{RANS} = -\rho \begin{pmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'w'} \end{pmatrix} + \frac{2}{3} \rho k I,$$

где: ρ — плотность, u', v', w' — компоненты скорости, k — турбулентная кинетическая энергия, I — единичный тензор.

Наиболее распространённая модель, используемая для моделирования вихревой вязкости, известна как приближение Буссинеска:

$$T_{RANS} = 2\mu_t S - \frac{2}{3}(\mu_t \nabla * \bar{v})I,$$

где: S — средний тензор скорости деформации, \bar{v} — это средняя скорость.

Уравнение движения описывает изменение скорости газового потока при воздействии на него различных факторов, таких как геометрия трубы, тепловое воздействие и трение. Запишем уравнение движения, основываясь на одномерных уравнениях газовой динамики:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) + \frac{dp}{dx} = 0,$$

где: ρ — плотность газа, v — скорость газа, p — давление, x — пространственная координата вдоль трубы.

Для сверхзвукового канала, дополнительно учитывается влияние трения на стенках трубы и теплопередача в зависимости от параметров потока:

$$\left(\frac{v_2^2}{v_1^2} \right) = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\gamma-1/\gamma} * \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} * M_1^2 \right),$$

где: M_1 — число Маха на входе в канал, γ — показатель адиабаты, p_1, p_2 — давления на входе и выходе соответственно.

Тепловой баланс определяет количество тепла, которое передается от дозвукового потока к сверхзвуковому потоку через стенки трубы [13].

Выражается следующим образом:

$$q = \frac{k}{d} * (T_w - T_g),$$

где: q — тепловой поток, k — коэффициент теплопередачи через стенку, d — толщина стенки трубы, T_w — температура стенки, T_g — температура газа.

При моделировании теплообмена в трубе Леонтьева важно учитывать влияние числа Прандтля и числа Рейнольдса на количество передаваемого тепла:

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4},$$

где: Nu — число Нуссельта, характеризующее интенсивность теплообмена, Re — число Рейнольдса, Pr — число Прандтля.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k},$$

где: μ — динамическая вязкость, C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении, k — коэффициент теплопроводности.

При низких значениях числа Прандтля, теплопроводность доминирует над вязкостью, что означает более эффективный перенос тепла [14]. Однако, слишком низкие значения Pr могут приводить к снижению общего теплового потока, передаваемого от дозвукового к сверхзвуковому потоку. Это связано с тем, что коэффициент теплопередачи Nu уменьшается с понижением числа Прандтля.

Число Рейнольдса характеризует режим течения газа, определяя соотношение инерционных и вязкостных сил:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu},$$

где: ρ — плотность газа, v — скорость потока, L — характерная длина (например, диаметр трубы), μ — динамическая вязкость.

При увеличении числа Рейнольдса поток переходит из ламинарного в турбулентный, что увеличивает интенсивность теплообмена [15].

$$q \propto Re^{0.8}.$$

Результаты и обсуждение

Важным аспектом данной работы является сравнительное моделирование двух различных конструкций трубы Леонтьева, что позволяет выявить оптимальные параметры для эффективного энергоразделения (рис.1).

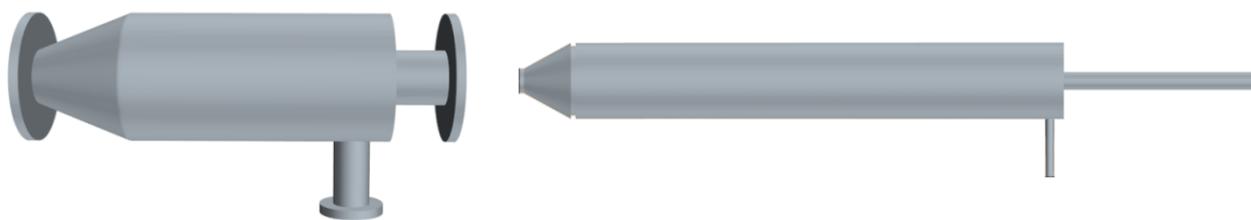


Рис. 1. – Геометрия 1-й и 2-й модели

Граничные условия для моделирования представлены в (табл. 1).

Таблица №1

Граничные условия

Параметр	Значение
Массовый расход на входе	30 кг/с
Начальное давление на входе	3 МПа
Давление на выходе из сверхзвукового канала	3 МПа
Давление на выходе из дозвукового канала	3 МПа

Для численного моделирования использовались параметры представленные в (табл. 2).

Плотность сетки увеличивалась в областях с высокими градиентами параметров, чтобы обеспечить точность расчетов (рис.2,3). Временной шаг

для решения уравнений выбирался таким образом, чтобы обеспечить устойчивость и точность моделирования, с учетом характеристического времени процесса.

Таблица №2

Расчетные параметры

Параметр	Значение
Рабочее тело	метан
Длина трубы	1 м
Размер блочно-структурированной расчетной сетки	около 3 000 000 ячеек
Модель турбулентности	k-ε
Метод дискретизации	метод конечных объемов

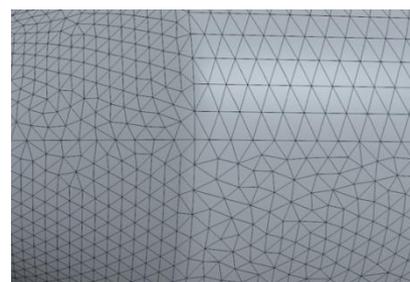


Рис. 2. – Сетка 1-й модели

Simcenter STAR-CCM+

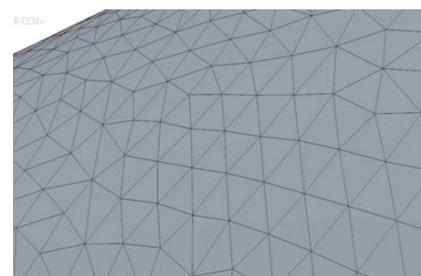


Рис. 3. – Сетка 2-й модели

Продолжительность моделирования определялась до достижения установившегося состояния потока, когда все параметры в расчетной области становились стабильными.

На рис.4 представлены профили изменения скорости и температуры для двух различных конфигураций трубы Леонтьева. Видно что сверхзвуковой канал первой модели достигает максимальной скорости 930 м/с, тогда как для второй модели скорость ниже — 600 м/с. В дозвуковых каналах для обеих моделей скорость одинакова. В первой модели температура газа на выходе из сверхзвукового канала достигает 390 К, а для второй модели — 307 К. В дозвуковом канале температура также различается между моделями.

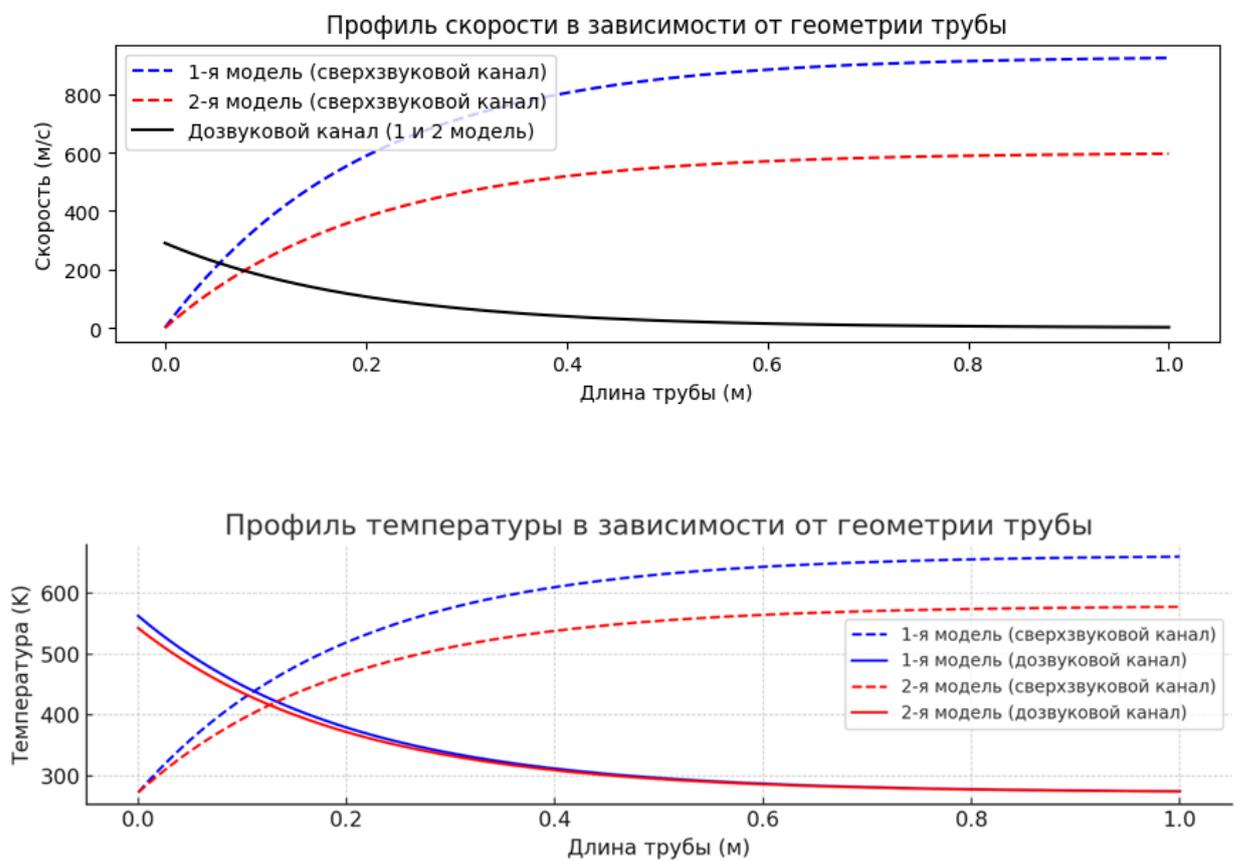


Рис. 4. – Профили изменения скорости и температуры для двух различных конфигураций трубы Леонтьева

В результате численного моделирования было получено более полное представление о влиянии изменения давления, температуры и массового расхода газа на выходные параметры системы для двух конфигураций трубы Леонтьева.

Для первой модели трубы Леонтьева результаты моделирования представлены в (табл. 3).

Таблица № 3

Результаты моделирования для 1-й модели

Параметр	Значение при P=2 МПа, T=290К	Значение при P=2.5 МПа, T=310К	Значение при P=3 МПа, T=330К
v на выходе из сверхзвукового канала (м/с)	910	930	950
v на выходе из дозвукового канала (м/с)	280	290	300
E на выходе из сверхзвукового канала	385	390	400
T на выходе из дозвукового канала	275	280	285
Число Рейнольдса (Re)	500000	550000	600000
Число Прандтля (Pr)	0.7	0.8	0.85
Турбулентность (%)	15	16	17
Массовый расход газа (кг/с)	30	30	30
Давление на входе (МПа)	2.0	2.5	3.0

Аналогичные расчеты проведены для второй модели трубы Леонтьева (табл. 4).

Таблица №4

Результаты моделирования для 2-й модели

Параметр	Значение при P=2 МПа, T=290К	Значение при P=2.5 МПа, T=310К	Значение при P=3 МПа, T=330К
v на выходе из сверхзвукового канала (м/с)	580	600	620
v на выходе из дозвукового канала (м/с)	280	290	300

T на выходе из сверхзвукового канала (К)	300	307	315
T на выходе из дозвукового канала (К)	270	275	280
Число Рейнольдса (Re)	450000	500000	550000
Число Прандтля (Pr)	0.65	0.7	0.75
Турбулентность (%)	12	13	14
Массовый расход газа (кг/с)	30	30	30
Давление на входе (МПа)	2.0	2.5	3.0

Использование нескольких вариаций входных условий позволяет оценить эффективность различных конфигураций труб для разделения потоков газа.

Для наглядной демонстрации результатов моделирования были построены профили скорости (рис.6) и температуры (рис.7) для обеих моделей.

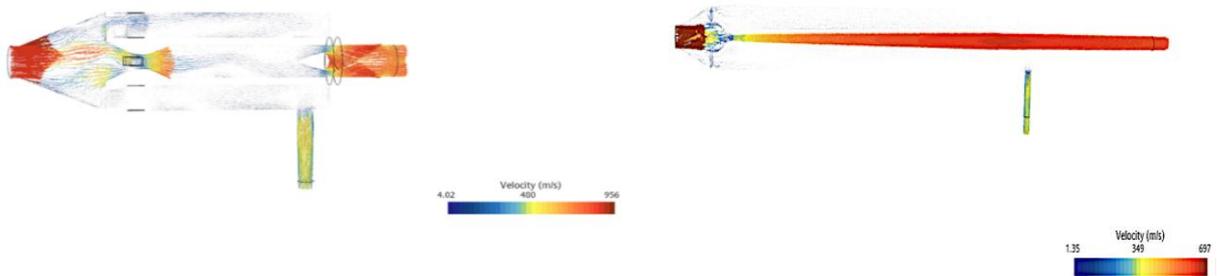


Рис. 6. – Профиль скорости 1-й и 2-й модели

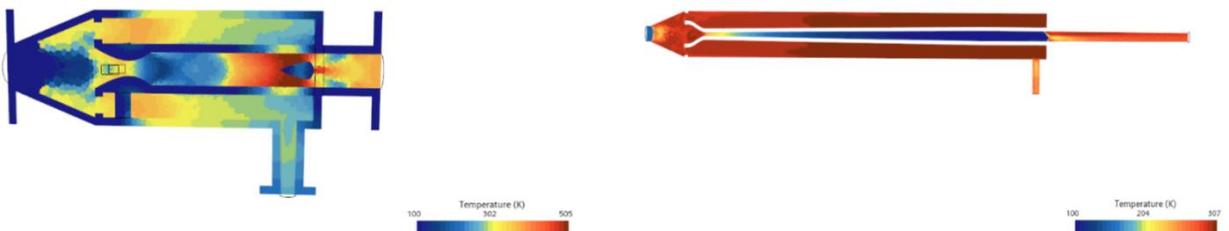


Рис. 7. – Профиль температуры 1-й и 2-й модели

Выводы

В рамках данного исследования временной шаг был выбран исходя из анализа чисел Куранта и критерия устойчивости Куранта-Фридрихса-Леви (CFL). Для стабильного решения временной шаг был установлен на уровне,

обеспечивающем число Куранта менее 0.5. Это позволило поддерживать стабильность и устойчивость расчетов при моделировании быстрых процессов в сверхзвуковых потоках газа.

Результаты моделирования показывают значительное различие в температурных профилях на выходах из каналов для данных конструкций трубы Леонтьева. Первая модель продемонстрировала более выраженное разделение температуры, с высокой температурой на выходе из сверхзвукового канала и низкой температурой на выходе из дозвукового канала. Это указывает на более эффективное энергоразделение в первой конструкции по сравнению со второй.

Литература

1. Leont'ev A.I. Temperature stratification of supersonic gas flow // Doklady Physics. 1997. V. 42. №6. pp. 309–311.
2. Рудник Р.С., Матвеев А.Ф., Цветова Е.В. Повышение эффективности магистрального транспорта газа с помощью трубы Леонтьева // IV Международная научно-техническая конференция для молодых учёных “Транспорт и хранение углеводородов”. Омск: Омский государственный технический университет, 2023. С. 50-54.
3. Леонтьев А.И. Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков // Теплофизика высоких температур. 1997. Т. 35. № 1. С. 157.
4. Леонтьев А.И. Способ температурной стратификации газа и устройство для его осуществления (Труба Леонтьева). Патент на изобретение № 2106581 URL: patents.google.com/patent/RU2106581C1/ru.
5. Бурцев С.А. Исследование путей повышения эффективности газодинамического энергоразделения // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 1. С. 14–21.



6. Карпухина 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. Ковальногов В.Н., Фокеева Е.В. Влияние природы газа на эффективность газодинамической температурной стратификации // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2010. Т. 4. № 2. С. 67-69.

8. 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). С. 192-197.

9. Щеголев Н.Л. Анализ возможности использования трубы Леонтьева в установках космического базирования // Аэрокосмический научный журнал. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. № 01. С. 23-36.

10. Смирнов Р.В., Бахвалов Ю.А. Математическое моделирование теплообменных процессов в энергосберегающих гелиоустановках // Инженерный вестник Дона. 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1782.

11. Васильев А.С., Суханов Ю.В. Некоторые тенденции развития систем моделирования эксплуатационных качеств изделий на ЭВМ и рынка этих систем // Инженерный вестник Дона. 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2366.

12. Hall I.M., Berry C.J. On the heating effect in a resonance tube // Journal of the Aerospace Sciences. 1959. V. 26. №4. pp. 253-254.

13. Gifford W.E., Longworth R.C. Pulse-tube Refrigeration // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 1964. vol. 86(3). pp. 264-268.

14. Попович С.С., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М. Экспериментальное исследование возможности интенсификации теплообмена в устройстве

безмашинного энергоразделения потоков // Вестник СГАУ. 2015. Т.14. №2. С. 159-169.

15. 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.

References

1. Leont'ev A.I. Doklady Physics. 1997. V. 42, №6. pp. 309–311.
2. 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-tehnicheskaya konferentsiya dlya molodykh uchennykh "Transport i khranenie uglevodorodov". Omsk: Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet, 2023. pp. 50-54.
3. Leont'ev A.I. Teplofizika vysokikh temperatur. 1997. V. 35. № 1. p. 157.
4. Leont'ev A.I. Sposob temperaturnoy stratifikatsii gaza i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya (Truba Leont'eva) [A method of temperature stratification of gas and a device for its implementation (Leontiev pipe)]. Patent na izobrenenie RF № 2106581. URL: patents.google.com/patent/RU2106581C1/ru.
5. Burtsev S.A. Teplofizika vysokikh temperatur. 2014. V. 52. № 1. pp. 14–21.
6. Karpukhina T.V., Koval'nogov V.N., Tsvetova E.V. Vestnik nauchnykh issledovaniy. 2019. V. 2. № 3. pp. 50-57.
7. Koval'nogov V.N., Fokeeva E.V. Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2010. V. 4. № 2. pp. 67-69.
8. Tsynaeva A.A., Tsynaeva E.A., Shkolin E.V. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta. 2013. № 3(41). pp. 192-197.
9. Shchegolev N.L. Aerokosmicheskiiy nauchnyy zhurnal. MGTU im. N.E. Baumana. 2017. № 01. pp. 23-36.



10. Smirnov R.V., Bakhvalov Yu.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1782.
11. Vasil'ev A.S., Sukhanov Yu.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2366.
12. Hall I.M., Berry C.J. Journal of the Aerospace Sciences. 1959. V. 26. №4. pp. 253-254.
13. Gifford W.E., Longsworth R.C. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 1964. vol. 86(3). pp. 264-268.
14. Popovich S.S., Vinogradov Yu.A., Strongin M.M. Vestnik SGAU. 2015. V.14. №2. pp. 159-169.
15. Tsynaeva A.L., Tsynaeva E.A., Shkolin E.V. Izv. vuzov. Aviatsionnaya tekhnika. 2013. №4. pp. 44-46.

Дата поступления: 8.10.2024

Дата публикации: 24.11.2024