



Газодинамические и термические потери в адиабат- ном процессе расширения открытой системы

При разработке и модернизации систем вентиляции и кондиционирования воздуха, а также впускных и выпускных систем тепловых двигателей режим течения рабочего тела по газозвуковым каналам принимается, как правило, адиабатическим, то есть без внешнего теплообмена с окружающей средой при постоянной теплоёмкости. Однако следует уточнить, что в открытых системах адиабатичность процесса расширения газа требует (так же, как и обычно) отсутствия внешнего теплообмена при постоянной теплоёмкости, но при этом не ставит никаких ограничений для появления внутреннего теплообмена, возникающего из-за преобразования газодинамических потерь в теплоту, то есть не ограничивается постоянством энтропии в потоке, поэтому адиабатичность и постоянство энтропии сосуществуют только в изоэнтропном процессе (называемом ещё «идеально адиабатическим»), так как в других термодинамических процессах открытых систем этого не происходит.

Газодинамические потери, вызывающие внутренний теплообмен в адиабатных открытых системах, оказывают влияние на характер преобразования параметров рабочего тела в потоке, то есть способствуют возникновению режима течения при заторможенной температуре

$T^* = \text{const}$ и появлению дополнительного термического сопротивления.

Как известно, движущийся поток рабочего тела в открытой системе характеризуется двумя абсолютными температурами и двумя абсолютными давлениями:

- абсолютная термодинамическая (статическая) температура потока T ;
- абсолютная температура изоэнтропно-заторможенного потока T^* ;
- абсолютное (статическое) давление в потоке P ;
- абсолютное изоэнтропно-заторможенное давление в потоке P^* .

Температура T^* достигается при изоэнтропном преобразовании кинетической энергии в энтальпию, то есть после преобразования статическая температура T увеличивается на скоростную составляющую.

В открытых системах адиабатичность процесса расширения газа требует (так же, как и обычно) отсутствия внешнего теплообмена при постоянной теплоёмкости, но при этом не ставит никаких ограничений для появления внутреннего теплообмена

Рецензия эксперта на статью получена
02.08.2019 [Expert review on the article
received on August 2, 2019].

УДК 536.7. Научные специальности: 05.23.03, 05.04.02.

Газодинамические и термические потери в адиабатном процессе расширения открытой системы

Андрей А. Балашов, д.т.н., профессор; Максим Э. Брякотин, к.т.н., доцент; Константин В. Мамчур, аспирант, кафедра «Двигатели внутреннего сгорания» (ДВС), Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (АлтГТУ, г. Барнаул)

В процессе течения газа по газозвуковым каналам систем вентиляции, кондиционирования воздуха, а также впускных и выпускных систем тепловых двигателей возникают газодинамические потери, они оказывают влияние на режим течения и способствуют появлению дополнительного термического сопротивления в потоке. Для выяснения этих обстоятельств проведён краткий анализ термодинамических процессов расширения рабочего тела в открытой системе с привлечением диаграмм работы в P - V -координатах и тепловой в T - S -координатах.

Ключевые слова: адиабатический процесс, изотермический процесс, газодинамический, механический, термический, статический, тепловой.

UDC 536.7. The number of scientific specialty: 05.23.03, 05.04.02.

Gas dynamic and thermal losses in the adiabatic process of expansion of the open system

Andrey A. Balashov, PhD, Professor; Maxim E. Brjakotin, PhD, Associate Professor; Constantine V. Mamchur, postgraduate student, the Department of Internal Combustion Engines (ICE), Polzunov Altai State Technical University (AltSTU, Barnaul city)

During the flow of gas through the air-gas channels of ventilation systems, air conditioning, as well as intake and exhaust systems of thermal engines, gas dynamic losses occur, which affect the flow regime and contribute to the appearance of additional thermal resistance in the flow. To clarify these circumstances, a brief analysis of the thermodynamic processes of expansion of the working fluid in an open system with the use of diagrams in P - V coordinates and thermal in T - S coordinates.

Key words: adiabatic process, isothermal process, gas-dynamic, mechanical, thermal, static, thermal.



Поскольку T^* больше T на конечную величину, поэтому рассматриваемый процесс должен сопровождаться затратой энергии при движении потока, носителем которой является кинетическая энергия направленного движения рабочего тела. Следовательно, затраты работы на преодоление газодинамических сопротивлений должны заимствоваться из общего баланса энергии, что и обуславливает её потерю. В связи с этим снижается заторможенное давление и увеличивается внутренняя энергия потока, поэтому возникает тепловое сопротивление [6].

Без учёта факторов, связанных с конечной скоростью движения рабочего тела, особенностью внутреннего теплообмена, возникающего в движущемся потоке, и использованием изэнтропно-заторможенных параметров, термодинамический анализ становится неполным и не отражает общих закономерностей преобразования энергии.

Вследствие изменения полной энергии рабочего тела в потоке, вызванного затратой работы на преодоление газодинамических сопротивлений, будет иметь место уменьшение заторможенного давления по потоку, что приведёт к снижению скорости. Это обстоятельство связанное со снижением скорости в потоке, приведёт к появлению дополнительной теплоты [2, 6] при $T^* = \text{const}$, влияние которой проявится в том, что вместо теоретического процесса будет рассматриваться действительный [6].

Однако упомянутое дополнительное термическое влияние газодинамических потерь на скорость рабочего тела не исключает прямого механического воздействия газодинамических сопротивлений на скорость потока [7].

В этом случае сила, создающая движение рабочего тела при наличии газодинамических сопротивлений в потоке, должна определяться как суммарная двух сил — силы, создаваемой перепадом давления, и силы, которая затрачивается на преодоление газодинамических сопротивлений, то есть в адиабатном потоке изменение кинетической энергии должно определяться суммой двух работ

$$w dw = -\vartheta dp - dl_r, \quad (1)$$

где $w dw$ — изменение кинетической энергии потока; ϑdp — располагаемая работа в адиабатном процессе расширения; dl_r — работа по преодолению газодинамических сопротивлений.



Располагаемая работа в адиабатном процессе расширения определится как:

$$l_{\text{расп}} = \vartheta dp = \frac{m}{m-1} R (T^* - T_2), \quad (2)$$

где $l_{\text{расп}}$ — располагаемая работа в адиабатном процессе открытой системы; m — показатель адиабатного процесса расширения открытой системы; R — удельная газовая постоянная; T^* — абсолютная температура заторможенного потока; T_2 — абсолютная статическая температура в выходном сечении потока.

Работа по преодолению газодинамических сопротивлений в канале dl_r преобразуется в элементарное количество теплоты $dq_{\text{га}}$, которое будет усвоено потоком и создаст дополнительное термическое сопротивление.

В этом случае, считая значения показателя адиабаты m известным [4], найдём удельное элементарное количество теплоты $dq_{\text{га}}$, характеризующее термическое влияние газодинамических сопротивлений на параметры потока. Для этой цели воспользуемся выражением, приведённым в [5, с. 89, зависимость 145]:

$$m = k - (k-1) \frac{\delta q_{\text{га}}}{Pd\vartheta}, \quad \text{отсюда} \quad (3)$$

$$\delta q_{\text{га}} = \frac{k-m}{k-1} Pd\vartheta, \quad (4)$$

где k — показатель изэнтропного процесса в открытой системе; $\delta q_{\text{га}}$ — элементарное количество теплоты от преобразования газодинамических потерь в потоке; $Pd\vartheta$ — работа расширения рабочего тела в открытой системе.

В связи с изложенным необходимо сказать, что в процессе адиабатного расширения рабочего тела в открытой системе по данным работы [2] существует два вида термогазодинамических потерь, характеризующихся перепадами заторможенных и статических давлений в потоке:

□ газодинамические потери, образующиеся за счёт прямого механического взаимодействия газодинамических сопротивлений с потоком, характеризующиеся перепадом заторможенных давлений $\Delta P^* = P_1^* - P_2^*$;

□ дополнительные потери, возникающие за счёт преобразования газодинамических потерь в теплоту, характеризующую перепадом статических давлений $\Delta P_T = P_2 - P_T$, которая усваивается потоком и создаёт добавочное термическое сопротивление.

Необходимо добавить, что в этом же процессе адиабатного расширения в открытой системе можно определить ещё и суммарные потери как результат взаимодействия основных и дополнительных газодинамических потерь, но представленных температурными параметрами потока, в частности, перепадом статических температур $\Delta T_T = T_2 - T_1$ при температуре заторможенного потока $T^* = \text{const}$.

Для обозначения перечисленных способов влияния газодинамических сопротивлений на параметры рабочего тела в потоке, характеризующих коэффициентами газодинамических потерь ξ , предлагается использовать нижние индексы, которые указывали бы на способ взаимодействия газодинамических сопротивлений с рабочим телом в адиабатном потоке:

□ ξ_a — коэффициент газодинамических потерь, характеризующий результирующие (суммарные) термогазодинамические потери в адиабатном потоке, связанные с механическим и термическим влиянием на его параметры;

□ $\xi_{ам}$ — коэффициент газодинамических потерь, характеризующий потери только от механического взаимодействия газодинамических сопротивлений с рабочим телом в адиабатном потоке;

□ $\xi_{ат}$ — коэффициент газодинамических потерь, характеризующий потери только от термического взаимодействия газодинамических сопротивлений с рабочим телом в адиабатном потоке.

Таким образом, результирующий (суммарный) коэффициент газодинамических потерь в выходном сечении адиабатного потока ξ_a может быть представлен в виде суммы коэффициентов газодинамических потерь, полученных как при прямом механическом взаимодей-

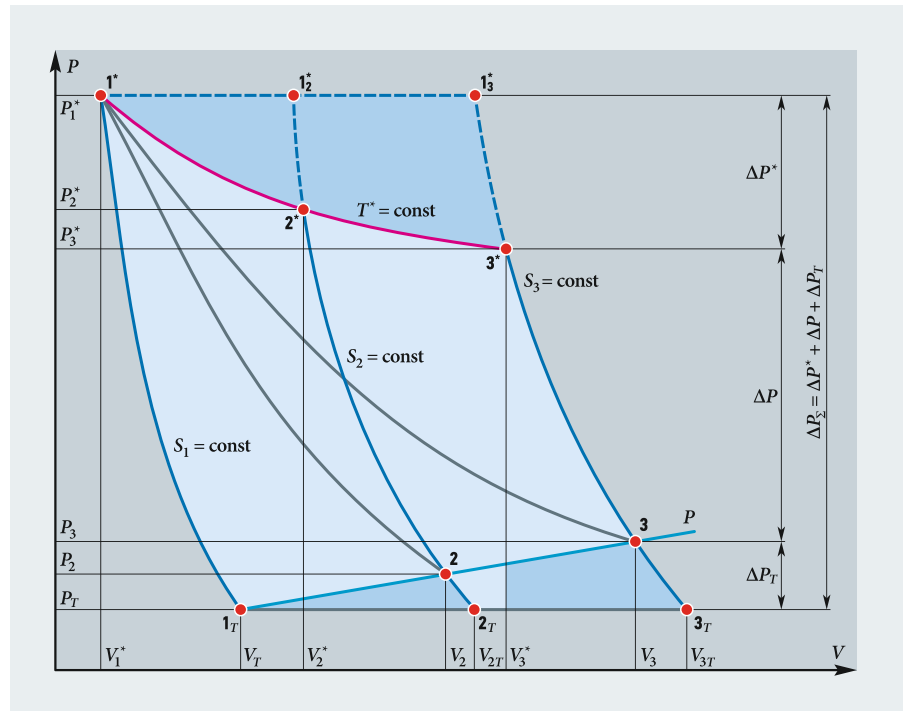


Рис. 1. P–V-диаграмма расширения газа в адиабатном потоке

ствии потока с сопротивлениями в канале $\xi_{ам}$, так и при косвенном термическом взаимодействии тех же сопротивлений с потоком газа $\xi_{ат}$ и представляется следующей зависимостью:

$$\xi_a = \xi_{ам} + \xi_{ат}. \quad (5)$$

Перечисленные коэффициенты ξ_a , $\xi_{ам}$ и $\xi_{ат}$ будут использованы в дальнейшем для определения элементарного количества теплоты, усваиваемой потоком при результирующем, механическом и термическом взаимодействиях газодинамических сопротивлений с рабочим телом в адиабатном потоке. Вывод и расширенный анализ зависимостей для определения коэффициентов ξ_a , $\xi_{ам}$ и $\xi_{ат}$ приведен в [2, с. 58–66].

Необходимо добавить, что прямое механическое воздействие газодинамических сопротивлений на рабочее тело в открытой адиабатной системе непо-

средственно скажется на снижении заторможенного давления и уменьшении внешней кинетической энергии (действительной скорости) в выходном сечении потока, а косвенное термическое влияние — на увеличении внутренней энергии (характеризуемой температурой T_2) и появлении дополнительного теплового сопротивления [7], а оба вместе — на общем характере адиабатного процесса расширения рабочего тела в открытой системе. Итак, на диаграмме работы в координатах P–V представлен график адиабатного процесса расширения рабочего тела в открытой системе с показателем адиабаты m , который может быть представлен в виде двух процессов (рис. 1):

□ адиабатного процесса (точки 1*–2 или 1*–3) с показателем m ;

□ изохорного процесса (точки 2*–2 или 3*–3) с показателем k .

Адиабатный процесс расширения рабочего тела, представленный показателем m и, кроме этого, перепадом давлений $\Delta P_a = P_1^* - P_2$ или $\Delta P_a = P_1^* - P_3$, характеризует основные газодинамические потери, возникающие в процессе взаимодействия газодинамических сопротивлений с потоком, в результате чего затрачивается механическая работа по их преодолению (отрывные течения и др.), которая приводит к снижению заторможенного давления на выходе потока P_2^* или P_3^* (рис. 1). В связи с этим из-за того же перепада давлений ΔP_a появляется внутренняя теплота, возникающая в потоке из-за преобразования газодинамических потерь, которая

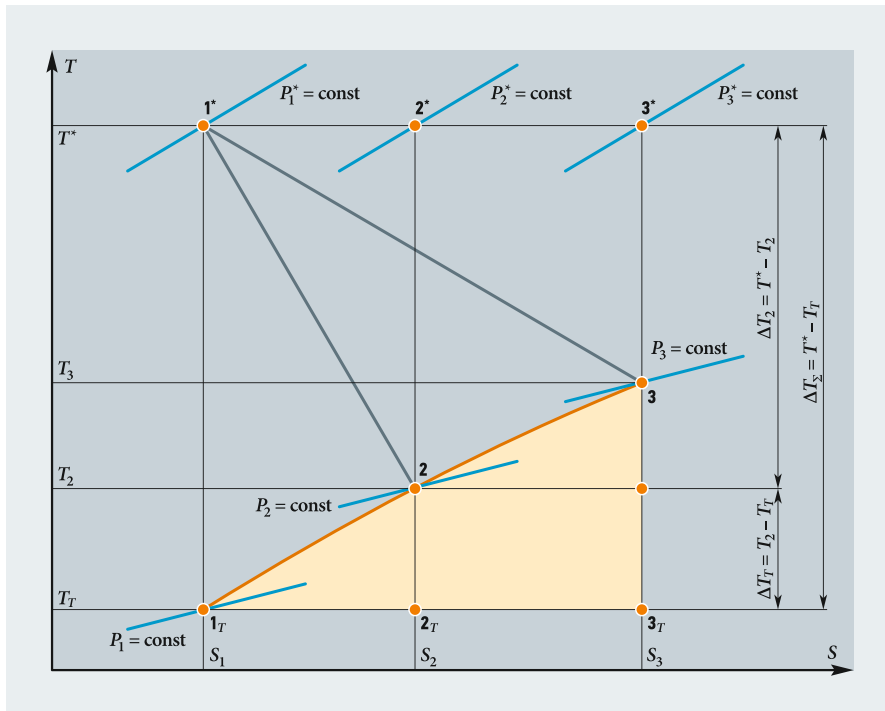


Рис. 2. T–S-диаграмма расширения газа в адиабатном потоке

и усваивается рабочим телом. Помимо этого, тот же перепад ΔP_a в адиабатном процессе расширения рабочего тела в открытой системе характеризует ещё и основную долю необратимой части газодинамических потерь в потоке.

Изоэнтروпный процесс расширения рабочего тела в потоке характеризуется отсутствием газодинамических потерь, а также перепадом заторможенного и статического давлений на выходе из канала, представляющими величину располагаемой полезной работы, которая может реализоваться в располагаемую кинетическую энергию, то есть в действительную скорость потока в том же сечении канала. Кроме этого, с точки зрения термодинамики, перепад давлений ΔP представляет собой обратимую часть адиабатного процесса расширения рабочего тела в потоке.

Теоретический перепад абсолютных статических давлений ΔP_T соответствует разнице давлений между статическим давлением в адиабатном потоке P_2 и статическим теоретически достижимым давлением в изоэнтропном потоке P_T ($\Delta P_T = P_2 - P_T$). Превышение статического давления P_2 в адиабатном потоке над теоретически достижимым давлением в изоэнтропном потоке P_T возникает из-за трения и отрывных течений в канале, в котором расположены газодинамические сопротивления, в результате чего возникает механическое взаимодействие сопротивлений с потоком, что приводит к появлению механической работы $dl_{г.ам}$. Работа $dl_{г.ам}$ трансформируется в теплоту

$\Delta q_{г.ам}$ и усваивается потоком, в связи с чем увеличивается внутренняя энергия u_2 или u_3 , характеризующая статическими температурой T_2 или T_3 , то есть происходит термическое взаимодействие газодинамических сопротивлений с потоком. Поэтому с увеличением перепада давлений ΔP_T будет расти и результирующий коэффициент газодинамических потерь в адиабатном потоке ξ_a . Помимо этого, с точки зрения термодинамики перепад давлений ΔP_T в адиабатном процессе расширения рабочего тела характеризует меньшую долю необратимой части газодинамических потерь в потоке (рис. 1).

В связи с вышеизложенным можно сказать, что газодинамические потери, характеризующие коэффициентами ξ , в большей степени зависят от перепада заторможенных давлений ΔP^* , характеризующего как прямое механическое взаимодействие газодинамических сопротивлений с потоком, так и второстепенное термическое влияние, которые создают газодинамические потери, преобразованные в теплоту из-за увеличения внутренней энергии u_2 .

На основании краткого термогазодинамического анализа, выполненного с целью выяснения влияния газодинамических сопротивлений на параметры потока, можно оценить работу, затрачиваемую на преодоление газодинамических сопротивлений, а также элементарное количество теплоты, возникающее из-за преобразования газодинамических потерь в теплоту в адиабатном процессе.

Изоэнтропный процесс расширения газа в потоке характеризуется отсутствием газодинамических потерь, а также перепадом заторможенного и статического давлений на выходе из канала

Работа расширения $l_{г.расш}$ при механическом взаимодействии сопротивлений с потоком в адиабатном процессе открытой системы определится по выражению:

$$l_{г.расш} = Pd\theta = \frac{k-1}{k-m} \delta q_{г.ам}, \quad (6)$$

где $\delta q_{г.ам}$ — элементарное количество теплоты, возникающее в связи с преобразованием газодинамических потерь при механическом взаимодействии с потоком; $Pd\theta$ — работа расширения рабочего тела в открытой системе.

Элементарное количество теплоты $dq_{г.ам}$, характеризующее механическое влияние газодинамических сопротивлений на параметры адиабатного потока, можно определить по зависимостям [2]:

$$\delta q_{г.ам} = c_{ам} \Delta T = \frac{k \xi_{ам}}{k \xi_{ам} + 1} P d\theta \quad \text{и} \quad (7)$$

$$\delta q_{г.ам} = c_p \Delta T_T, \quad (8)$$

где $c_{ам} = \xi_{ам} c_p$ — удельная теплоёмкость адиабатного процесса расширения при механическом взаимодействии газодинамических сопротивлений с адиабатным потоком; $\xi_{ам}$ — коэффициент газодинамических потерь при механическом воздействии газодинамических сопротивлений на поток; $\Delta T = T^* - T_2$ — перепад заторможенной и статической температур на выходе адиабатного потока; $\Delta T_T = T_2 - T_T$ — перепад статических температур в адиабатном потоке относительно изоэнтропного уровня T_T .

Далее необходимо рассмотреть вопрос о термическом взаимодействии газодинамических сопротивлений в канале с рабочим телом в адиабатном процессе расширения открытой системы, которое приводит как к увеличению внутренней энергии S_2 или S_3 в выходном сечении потока, так и к снижению заторможенного давления P_2^* или P_3^* на его выходе.

На первом этапе возникновения газодинамических потерь происходит только прямое механическое воздействие газодинамических сопротивлений в канале на параметры рабочего тела, которое приводит как к снижению действительной скорости потока θ_d относительно теоретической θ_T , так и к снижению заторможенного давления P_2^* или P_3^* на выходе потока относительно давления входа P_1^* .



Механическая работа по преодолению газодинамических сопротивлений в канале преобразуется в теплоту на первом этапе, а усваивается она потоком на втором этапе, который становится как бы продолжением прямого механического воздействия газодинамических сопротивлений в канале на рабочее тело в потоке, то есть появляется возможность условно выделить дополнительный этап косвенного термического влияния газодинамических сопротивлений на параметры потока.

Результатом второго этапа (усвоения потоком теплоты, возникшей от преобразования газодинамических потерь) является увеличение внутренней энергии рабочего тела S_2 или S_3 , характеризующейся увеличением статической температуры T_2 или T_3 и статического давления P_2 или P_3 относительно изоэнтропного уровня T_T и P_T . Увеличение температуры T_2 или T_3 и давления P_2 или P_3 , с учётом постоянства температуры заторможенного пото-

ка $T^* = \text{const}$, приведёт к снижению как действительной скорости ϑ_d , так и заторможенных давлений P_2^* или P_3^* в выходном сечении потока.

В связи этим можно сказать, что суммарные затраты энергии на преодоление потоком газодинамических сопротивлений в канале, можно разделить на две следующие категории:

В заключение можно сказать, что механическая работа, затрачиваемая потоком в адиабатной открытой системе на преодоление газодинамических сопротивлений в канале, полностью преобразуется в теплоту и усваивается газом, в результате чего снижается действительная скорость (относительно теоретической)

1. Основные затраты энергии на совершение работы в потоке за счёт механического воздействия на рабочее тело газодинамических сопротивлений, которые приводят к снижению заторможенного давления на выходе потока P_2^* по сравнению с заторможенным давлением на входе P_1^* .

2. Дополнительные затраты энергии создаёт термическое воздействие на рабочее тело преобразованной (из газодинамических потерь) теплоты, которое увеличивает в выходном сечении потока как внутреннюю энергию S_2 (характеризуемую температурой T_2), так и статическое давление P_2 (относительно теоретического P_T), тем самым способствуя возникновению режима течения при $T^* = \text{const}$.



В заключение можно сказать, что механическая работа, затрачиваемая потоком в адиабатной открытой системе на преодоление газодинамических сопротивлений в канале, полностью преобразуется в теплоту и усваивается газом, в результате чего снижается действительная скорость ϑ_d (относительно теоретической ϑ_T) и заторможенное давление P_2^* в выходном сечении потока. Одновременно с этим механическая работа, преобразованная в теплоту $dq_{г.а.}$, увеличивает внутреннюю энергию S_2 (характеризующую температурой T_2), термически воздействуя на увеличение давления P_2 . ●



1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1969. 824 с.
2. Балашов А.А. Техническая термодинамика. Ч. 2: Основы термогазодинамики открытых систем. — Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. 101 с.
3. Вулис Л.А. Термодинамика газовых потоков. — М.: Госэнергоиздат, 1950. 305 с.
4. Егоров Я.А. Показатель процесса изменения параметров газа в потоке // Двигатели внутреннего сгорания, 1982. №35. С. 43–49.
5. Жуковский В.С. Термодинамика / Под ред. А.А. Гухмана. — М.: Энергоатомиздат, 1983. 304 с.
6. Зысина В.А. Техническая термодинамика потока: моногр. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1977. 157 с.
7. Мамонтов М.А. Некоторые случаи течения газов. — М.: Оборонгиз, 1951. 490 с.
8. Теплотехника: учеб. для вузов. Изд. 5-е, стер. / В.Н. Луканин, К.М. Камфер, М.Г. Шатров и др.; под ред. В.Н. Луканина. — М.: Высшая школа, 2006. 671 с.

References — see page 94.

Gas dynamic and thermal losses in the adiabate process of expansion of the open system. Pp. 70–74.

Andrey A. Balashov, PhD, Professor; **Maxim E. Brjakotin**, PhD, Associate Professor; **Constantine V. Mamchur**, postgraduate student, the Department of Internal Combustion Engines (ICE), Polzunov Altai State Technical University (AltSTU, Barnaul city)

1. Abramovich G.N. *Prikladnaja gazovaja dinamika* [Applied gas dynamics]. Moscow. Nauka ["The Science" Publishers]. 1969. 824 p. [In Russian]
2. Balashov A.A. *Tekhnicheskaja termodinamika. Ch. 2: Osnovy termogazodinamiki otkrytyh sistem* [Technical thermodynamics. Part 2. Basics of thermogas dynamics of open systems]. Barnaul. *Izd-vo AltGTU* [Publishing House of Polzunov Altai State Technical University]. 2014. 101 p. [In Russian]
3. Vulis L.A. *Termodinamika gazovyh potokov* [Thermodynamics of gas flows]. Moscow. Gosenergoizdat [State publishing house of literature on the energy industry of the USSR ("Gosenergoizdat" Publishers)]. 1950. 305 p. [In Russian]
4. Egorov Ja.A. *Pokazatel' processa izmenenija parametrov gaza v potoke* [Indicator of the process of changing the parameters of gas in the stream]. *Dvigateli vnutrennego sgoranija* ["Internal combustion engines" Magazine]. 1982. No. 35. Pp. 43–49. [In Russian]
5. Zhukovskij V.S. *Termodinamika* [Thermodynamics]. Edited by A.A. Guhman. Moscow. *Jenergoatomizdat* [Publishing House of Energy and Nuclear Industry of the USSR ("Energoatomizdat" Publishers)]. 1983. 304 p. [In Russian]
6. Zysin V.A. *Tekhnicheskaja termodinamika potoka: monographia* [Technical thermodynamics of flow. A monograph]. Leningrad. *Izd-vo Leningrad. un-ta* [Publishing House of Leningrad State University]. 1977. 160 p. [In Russian]
7. Mamontov M.A. *Nekotorye sluchai techenija gazov* [Some cases of gas flow]. Moscow. *Oborongiz* [State publishing house of defense industry literature of the USSR ("Oborongiz" Publishers)]. 1951. 490 p. [In Russian]
8. Lukanin V.N., Shatrov M.G. et al. *Teplotekhnika: ucheb. dlja vuzov* [Heat Engineering. A textbook for universities]. Edited by V.N. Lukanin. Moscow. *Vysschaja shkola* ["Higher education" Publishing House]. 2006. 671 p. [In Russian]