

Анализ адиабатного процесса расширения рабочего тела в открытой термодинамической системе с помощью тепловой диаграммы в $T-S$ -координатах

Рецензия эксперта на статью получена 29.12.2018 [Expert review on the article received December 29, 2018].

Рассмотрим процесс расширения рабочего тела в адиабатической открытой системе с газодинамическими потерями с привлечением, для наглядности, тепловой диаграммы в $T-S$ -координатах (рис. 1 и 2). Адиабатичность процесса расширения рабочего тела в открытой термодинамической системе требует только отсутствия теплообмена с внешней средой и постоянства теплоёмкости, но не требует постоянства энтропии, поэтому адиабатичность совмещается с постоянством энтропии в потоке только в изоэнтронном процессе, называемом ещё «идеально-адиабатическим».

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

В курсах по теплотехнике [1, 6] имеются разделы, посвящённые течению газов, однако в них излагаются главным образом идеально-адиабатические процессы, по существу являющиеся предметом газовой динамики. Специфические же вопросы термодинамики — это преобразование располагаемой работы в адиабатном процессе во внутреннюю теплоту в открытых системах, возникающую из-за взаимодействия газодинамических сопротивлений в канале с потоком рабочего тела, не затрагиваются или затрагиваются в минимальном объёме.

В связи с этим раздел термодинамики, посвящённый расширению рабочего тела в открытой адиабатной термодинамической системе, потеряет в значительной степени практический смысл, если не будет учитывать все воздействия, которым подвергается реальный поток.

Обнаружить последствия воздействия на поток газодинамических сопротивле-

ний в открытой системе можно с помощью термодинамического и газодинамического анализов, то есть тепловое сопротивление, которое при обычной трактовке вопроса может рассматриваться как своеобразное явление, не требующее объяснения его физической сущности.

Без учёта факторов, связанных с конечной скоростью движения рабочего тела, особенностью теплообмена в движущемся потоке и использованием в анализах и расчётах изоэнтронно заторможенных параметров, термодинамический анализ становится неполным и не отражает общих закономерностей преобразования энергии

С учётом сказанного, на наш взгляд, для более наглядного представления результатов целесообразно вначале выполнить термодинамический анализ адиабатного процесса расширения рабочего тела в открытой системе с привлечением тепловой диаграммы в координатах $T-S$. Затем расширить его, с целью более углублённого обоснования преобразований в потоке, за счёт привлечения некоторых теоретических зависимостей.

На рис. 1 и 2 представлен идеально-адиабатический процесс (то есть процесс без газодинамических потерь), который изображается вертикальными отрезками, расположенными между точками 1^* и 1_T или изобарами P_1^* и P_T при постоянной энтропии $S_1 = \text{const}$. Также показаны адиабатические процессы, которые изображаются пунктирными и прямыми отрезками 1^*-2 и 1^*-3 при изменяющейся энтропии $\Delta S \neq 0$, то есть с газодинамическими потерями.

Поскольку изобары в $T-S$ -диаграмме имеют наклон в сторону оси абсцисс,

УДК 536.7. Научная специальность: 05.04.02.

Анализ адиабатного процесса расширения рабочего тела в открытой термодинамической системе с помощью тепловой диаграммы в $T-S$ -координатах

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

В статье анализируется адиабатный процесс расширения рабочего тела с газодинамическими потерями в открытой термодинамической системе с привлечением тепловой диаграммы в $T-S$ -координатах, дополнительно к этому для расширения и углубления анализа используются некоторые теоретические термодинамические зависимости.

Ключевые слова: адиабатный, изоэнтронный, газодинамический, теплообмен, заторможенный, термодинамический, сопротивление.

UDC 536.7. Number of scientific specialty: 05.04.02.

Analysis of the adiabatic process of expansion of the working body in the open thermodynamic system by thermal diagrams $T-S$ -coordinates

Andrei A. Balashov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Internal Combustion Engines; **Maxim E. Bryakotin**, PhD, Associate Professor of the Department of the Internal Control Engine; **Konstantin V. Mamchur**, PhD student, Altai State Technical University named after I. I. Polzunov (Barnaul city)

The article analyzes the adiabatic process of expanding the working fluid with gas-dynamic losses in an open thermodynamic system involving thermal diagrams in $T-S$ -coordinates, in addition to this, some theoretical thermodynamic dependences are used to expand and deepen the analysis.

Key words: adiabatic, isentropic, gas-dynamic, heat exchange, inhibited, thermodynamic, resistance.

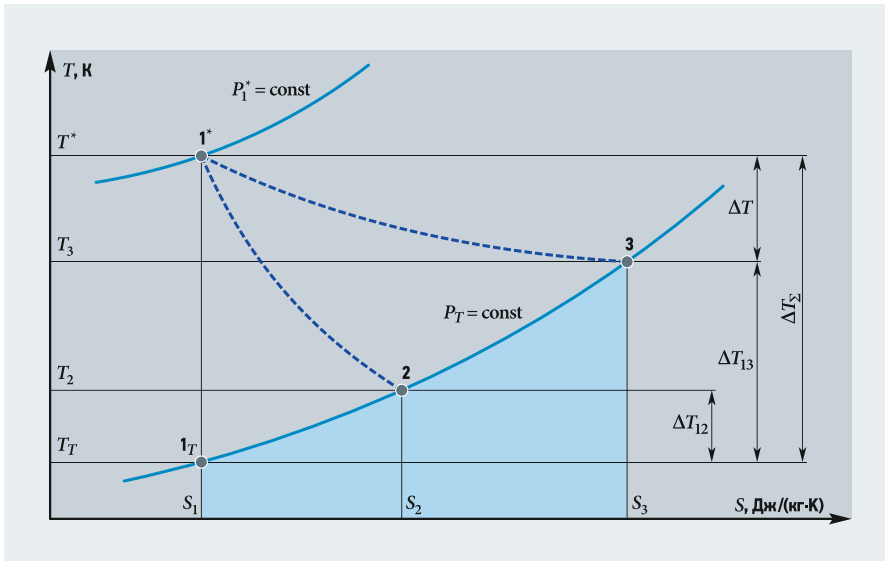


Рис. 1. Диаграмма адиабатного процесса расширения рабочего тела в T - S -координатах [1, 3, 6]

поэтому $T_3 > T_2 > T_T$, и, таким образом, в процессе течения газа с потерями реализуется разность температур $[(T^* - T_2)$ или $(T^* - T_3)]$ меньшая, чем в случае обратимого идеально-адиабатического (изоэнтального) течения без потерь при максимальном перепаде $(T^* - T_T)$ (рис. 1 и 2).

Следовательно, действительная скорость рабочего тела W_d на выходе из канала при течении с потерями будет меньше, чем теоретическая W_T при течении без потерь. В этом случае абсолютные статические температуры рабочего тела на выходе из канала при течении с потерями будут обозначены как T_2 или T_3 .

Увеличение температур T_2 и T_3 относительно теоретической температуры T_T , в связи с преобразованием газодинамических потерь в теплоту, влечёт за собой уве-

личение произведений $\{P_2\vartheta_2\}$ или $\{P_3\vartheta_3\}$ согласно уравнению Клапейрона и, соответственно, приведёт к увеличению как статических давлений на выходе потока P_2 или P_3 , так и удельных объёмов ϑ_2 или ϑ_3 .

Поэтому давления P_2 или P_3 не должны располагаться на изобаре $P_T = \text{const}$, как это представлено на диаграмме (рис. 1) [1, 3, 6], а должны перейти на другой уровень статических давлений представленных на диаграмме (рис. 2), где $P_3 > P_2 > P_T$ [2].

В связи с этим статическим температурам в движущемся потоке будет соответствовать множество удовлетворяющих состояний при соблюдении основного условия $T^* = \text{const}$, то есть $T_2 = \text{const}$, $T_3 = \text{const}$ и т.д.

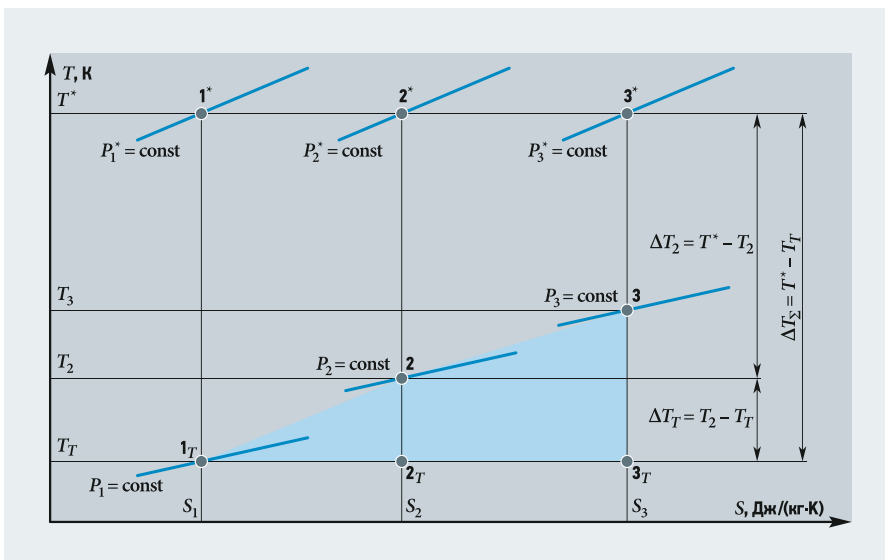


Рис. 2. Диаграмма адиабатного процесса расширения рабочего тела в T - S -координатах [2] (T^* — абсолютная заторможенная температура в адиабатном потоке; T_2 и T_3 — абсолютные статические температуры на выходе потока; T_T — абсолютная статическая теоретическая температура в идеально-адиабатическом процессе расширения рабочего тела)

Установить среди них то состояние, которое соответствует искомому решению, можно только с помощью другой координаты. В предельно-идеальном или теоретически возможном случае другая координата определяется из условия $S_1 = S_2 = S_3 = \text{const}$. Однако в действительном потоке энтропия возрастает, так что $S_2 = S_1 + \Delta S_1$ или $S_3 = S_1 + \Delta S_2$, где ΔS_1 и ΔS_2 — приращение энтропии на участке от исходного сечения до текущего.

Приращение энтропии ΔS в адиабатном потоке является не причиной, а следствием его движения, поэтому определяется только внутренними потерями, зависящими от газодинамических сопротивлений, расположенных в канале. Чем они меньше, тем меньше ΔS и тем меньше действительный процесс расширения отклоняется от изоэнтального.

Действительная скорость рабочего тела на выходе из канала при течении с потерями будет меньше, чем теоретическая при течении без потерь

Анализируя адиабатный процесс расширения рабочего тела с потерями в открытой термодинамической системе по диаграмме T - S , выделим три характерных перепада температур ΔT_T , ΔT_2 и ΔT_Σ (рис. 1 и 2), где:

- $\Delta T_T = T_2 - T_T$ — перепад статических температур в адиабатном потоке относительно изоэнтального уровня T_T ;
- $\Delta T_2 = T^* - T_2$ — разница абсолютных заторможенной и статической температуры в адиабатном потоке;
- $\Delta T_\Sigma = T^* - T_T = \Delta T_2 - \Delta T_T$ — перепад абсолютных заторможенной и теоретической температуры в изоэнтальном потоке.

В этом случае прежде всего необходимо отметить, что заторможенная температура рабочего тела в адиабатном потоке автоматически поддерживается постоянной, то есть $T^* = \text{const}$.

Это значит, что в процессе адиабатного расширения в открытой термодинамической системе присутствует ещё и режим расширения рабочего тела при постоянной заторможенной температуре $T^* = \text{const}$, который может быть представлен выражением $P_1^*\vartheta_1^* = P_2^*\vartheta_2^*$, тогда как адиабатный процесс расширения рабочего тела в открытой системе представляется совсем другой зависимостью: $P_1^*\vartheta_1^{*m} = P_2^*\vartheta_2^{*m}$, где ϑ_1^* и ϑ_2^* — удельные объёмы на входе и выходе потока; m — показатель адиабатного процесса расширения рабочего тела.

Если решить эти уравнения совместно, то получим те же зависимости, которые уже имеем. Однако в этом случае появляется возможность определить элементарное количество теплоты, но только от одного механического взаимодействия газодинамических сопротивлений с потоком с учётом уравнения состояния при $T^* = \text{const}$.

Тогда элементарное количество теплоты, образующееся в процессе расширения реального рабочего тела при постоянной заторможенной температуре в открытой термодинамической системе, будет равно как работе расширения, так и располагаемой работе, и будет выглядеть следующим образом:

$$q_{\text{гип}} = l_{\text{р.расп}} = l_{\text{р.расп}} = RT^* \ln \left(\frac{P_1^*}{P_2^*} \right),$$

где $q_{\text{гип}}$ — элементарное количество теплоты; $l_{\text{р.расп}}$ — работа расширения; $l_{\text{р.расп}}$ — располагаемая работа; P_1^* — абсолютное заторможенное давление во входном сечении; P_2^* — абсолютное заторможенное давление в выходном сечении; T^* — абсолютная температура заторможенного потока; R — удельная газовая постоянная.

Можно считать, что краткий термодинамический анализ адиабатного процесса расширения рабочего тела в открытой системе с привлечением тепловой диаграммы в координатах $T-S$ выполнен, но его следует расширить с целью более углублённого изучения преобразований в потоке, то есть за счёт привлечения некоторых теоретических зависимостей.

Теоретические зависимости, учитывающие газодинамические потери, вызывающие внутренний теплообмен при



адиабатном расширении газа в потоке, описываются известными дифференциальными уравнениями:

$$\Delta q_r = c_v \Delta T + P \Delta \vartheta, \quad (1)$$

$$\Delta q_r = c_p \Delta T - \vartheta \Delta P, \quad (2)$$

$$\Delta q_r = c_a \Delta T, \quad (3)$$

$$\Delta q_r = \xi W \Delta W, \quad (4)$$

где q_r , c_p , c_v , c_a , P , T , ϑ , S , W и ξ — соответственно, удельная теплота газодинамических потерь, удельные теплоёмкости при постоянном давлении, объёме и адиабатного процесса, абсолютные давление и температура, удельный объём, удельная энтропия, скорость газа в потоке и коэффициент газодинамических потерь.

Совместное решение этих уравнений осуществляется с целью определения показателя адиабатного процесса расширения рабочего тела в потоке m , коэффициента газодинамических потерь ξ , удельной теплоёмкости адиабатного процесса c_a и коэффициента внутреннего теплообмена в адиабатном потоке ψ .

Решая совместно (1) и (3), а также (2) и (3), получим показатель адиабатного про-

цесса расширения рабочего тела в открытой термодинамической системе [2–4]:

$$m = \frac{c_a - c_p}{c_a - c_v} = \frac{\ln \left(\frac{P_1^*}{P_2} \right)}{\ln \left(\frac{\vartheta_2}{\vartheta_1^*} \right)}, \quad (5)$$

где P_1^* — абсолютное давление заторможенного потока на входе в сечении 1–1; P_2 — абсолютное статическое давление в выходном сечении потока 2–2; ϑ_1^* — удельный объём, определяемый по параметрам заторможенного потока в сечении 1–1; ϑ_2 — удельный объём, определяемый по статическим параметрам потока в сечении 2–2; m — показатель адиабатного процесса расширения рабочего тела в потоке. Кроме этого, равнозначный показатель m можно получить и другими путями, которые приведены в литературных источниках [1–5]:

$$m = \frac{k(\xi + 1)}{k\xi + 1} = \frac{k}{k - (k - 1)k\varphi^2} = k - (k - 1) \frac{\delta q_r}{P d\vartheta}, \quad (6)$$

где ξ — коэффициент газодинамических потерь; k — показатель изоэнтальпического процесса в открытой системе; φ — коэффициент скорости; δq_r — элементарное количество теплоты, образовавшейся в потоке за счёт преобразования газодинамических потерь; $\Delta \vartheta$ — работа расширения рабочего тела.

Обозначим $\Delta q_r / (P \Delta \vartheta) = \psi$, где ψ — коэффициент внутреннего теплообмена в адиабатном потоке. Тогда выражение (6) будет выглядеть так: $m = k - (k - 1)\psi$.

Используя выражения (1–6), после несложных преобразований получим:

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{k - m}{k - 1}; \quad \psi = \frac{k\xi}{k\xi + 1}; \\ \psi &= m k \varphi^2; \quad \psi = m \frac{\xi}{\xi + 1}, \end{aligned} \quad (7)$$

а также:

$$m = k - (k - 1) \frac{k\xi}{k\xi + 1}; \quad m = \psi k \frac{\xi + 1}{\xi}. \quad (8)$$



Статическую теоретически достижимую температуру в адиабатном потоке T_T определим по выражению, приведённому в [2], с использованием термических параметров потока (рис. 2) $\xi = \Delta T_T / \Delta T$, откуда после преобразования будем иметь:

$$T_T = T_2 - \xi \Delta T = (\xi + 1)T_2 - \xi T^*, \quad (9)$$

причём в данной формуле:

- T^* — температура заторможенного потока;
- $\Delta T = T^* - T_2$ — перепад заторможенной и статической температур в адиабатном потоке.

Кроме того, коэффициент газодинамических потерь ξ можно определить с использованием показателя адиабаты m , приведённом в [2]:

$$\xi = \frac{k - m}{k(m - 1)}. \quad (10)$$

Используя зависимость (5) и принимая во внимание, что $c_p = k c_v$, получим выражение для определения удельной теплоёмкости c_a адиабатного процесса:

$$c_a = c_p \frac{m - k}{k(m - 1)} = c_v \frac{m - k}{m - 1} = -\xi c_p, \quad (11)$$

где c_p — удельная теплоёмкость при постоянном давлении; c_v — удельная теплоёмкость при постоянном объёме.

Увеличение абсолютной температуры T_2 и T_3 в адиабатном процессе расширения рабочего тела относительно её изоэнтропного уровня T_T вызвано наличием газодинамических потерь, которые, преобразуясь, увеличивают внутреннюю энергию, и определяют её суммарную необратимую часть в адиабатном потоке.

Анализируя изменения показателей адиабатного m и изоэнтропного k процессов расширения рабочего тела в открытой системе, а также коэффициентов газодинамических потерь ξ , удельной теплоёмкости c_a и коэффициента внутреннего теплообмена ψ в адиабатном потоке, как с помощью тепловой диаграммы в координатах $T-S$, так и приведённых зависимостей, говорит о том, что элементарное количество теплоты, возникающее в потоке как результат преобразования газодинамических потерь, состоит из двух составляющих — механической и термической.

Вывод

Таким образом, анализ адиабатного процесса расширения рабочего тела в открытой термодинамической системе с помощью тепловой диаграммы в $T-S$ -координатах и приведённых зависимостей говорит о том, что рост изменения энтропии ΔS обеспечивается за счёт роста количества теплоты, образующегося в результате преобразования механической энергии в потоке в теплоту (отрывные течения и др.), которая усваивается текущим рабочим телом. За счёт этого увеличиваются статические параметры в выходном сечении потока и возникает дополнительное термическое сопротивление (рис. 2). ●

1. Андриященко А.И. Основы технической термодинамики реальных процессов: Учеб. пос. для вузов. — М.: Высшая школа, 1975. 264 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. Мамонов М.А. Некоторые случаи течения газов. — М.: Оборонгиз, 1951. 490 с.
6. Луканин В.Н., Шатров М.Г. и др. Теплотехника: Учеб. для вузов / Под ред. В.Н. Луканина. — М.: Высшая школа, 2006. 671 с.

Analysis of the adiabatic process of expansion of the working body in the open thermodynamic system by thermal diagrams T – S -coordinates. Pp. 50–55.

Andrei A. Balashov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Internal Combustion Engines; **Maxim E. Bryakotin**, PhD, Associate Professor of the Department of the Internal Control Engine; **Konstantin V. Mamchur**, PhD student, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov (Barnaul city)

1. Andriushchenko A.I. *Osnovy tekhnicheskoy termodinamiki real'nykh processov: Ucheb. pos. dlja vuzov* [Fundamentals of technical thermodynamics of real processes. A textbook for universities]. Moscow. Vysshaya shkola ["High school" Publishing House]. 1975. 264 p.
2. Balashov A.A. *Tekhnicheskaya termodinamika: Chast' 2. Osnovy termogazodinamiki otkrytykh sistem* [Technical thermodynamics: Part 2. Basics of thermogas dynamics of open systems]. Barnaul. Izd-vo AltGTU [Publishing House of the Altai State Technical University]. 2014. 101 p.
3. Vulis L.A. *Termodinamika gazovykh potokov* [Thermodynamics of gas flows]. Moscow. Gosenergoizdat ["Gosenergoizdat" Publishing House (State Publishing House of the Energy Industry)]. 1950. 305 p.
4. Egorov Ja.A. *Pokazatel' processa izmeneniya parametrov gaza v potoke* [Indicator of the process of changing the parameters of gas in the stream]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* ["Internal combustion engines" Magazine]. 1982. No. 35. Pp. 43–49.
5. Mamontov M.A. *Nekotoryye sluchai techeniya gazov* [Some cases of gas flow]. Moscow. Oborongiz ["Oborongiz" Publishing House (State publishing house of defense industry)]. 1951. 490 p.
6. Lukanin V.N., Shatrov M.G. et al. *Teplotekhnika: Ucheb. dlja vuzov* [Heat Engineering: A textbook for universities]. Pod red. V.N. Lukanina [Ed. by V.N. Lukanin]. Moscow. Vysshaya shkola ["High school" Publishing House]. 2006. 671 p.