

Изотермический процесс расширения газа в открытой термодинамической системе

Рецензия эксперта на статью получена
12.07.2019 [Expert review on the article
received on July 12, 2019].

При проектировании, отработке и модернизации систем вентиляции и кондиционирования воздуха, а также впускных и выпускных каналов с клапанами систем газообмена тепловых двигателей широко используется метод статической продувки. С помощью этого метода обычно стремятся снизить до минимально возможного уровня газодинамическое сопротивление газовоздушных трасс упомянутых систем с учётом конструктивных особенностей их проточных элементов.

Снижение газодинамических потерь в газовоздушных трассах упомянутых систем относительно достигнутого современного уровня — процесс достаточно трудоёмкий и длительный, требующий создания специальных моделей для ускоренной отработки геометрических размеров их проточных частей. Необходимы также специальные продувочные установки и измерительные системы для определения расходных характеристик, причём как отдельных участков, так и системы в целом. Для того, чтобы воспользоваться методом статической продувки, необходимо иметь:

- низконапорную установку для продувки воздухом впускных и выпускных каналов с клапанами;
- методику обработки результатов статической продувки воздухом для открытых адиабатических систем.

Адиабатическая методика, которая применяется при обработке результатов низконапорной статической продувки газовоздушных каналов воздухом используется потому, что температурный режим продувки находится в пределах, близких к температуре окружающей среды ($T^* = 20-30^\circ\text{C}$), а давление воздуха на входе в продуваемый канал не превышает $P_1^* \leq 0,115 \text{ МПа}$.

Для выявления картины течения газа по газовоздушному тракту в открытой системе без совершения внешней работы необходимо определиться с термодинамическими процессами, происходящими при расширении рабочего тела в потоке

Цель настоящей работы заключается в уточнении и углублении представления об адиабатном процессе расширения реального газа в открытой термодинамической системе [2].

Общая формулировка адиабатного процесса расширения для закрытых и открытых термодинамических систем гласит, что адиабатными называются процессы, происходящие в энергетически изолированной системе материальных тел без обмена системы теплотой или работой с окружающей средой [10]. Этой формулировки достаточно для закрытой системы с идеальным или реальным газом, а также для открытой системы с идеальным газом [1], но недостаточно для открытой системы с реальным газом. В процессе адиабатного расширения появляется внутренний теплоприток, как результат взаимодействия газодинамических сопротивлений с реальным газовым потоком. Этот приток теплоты не упоминается в классической формулировке адиабатного процесса расширения для различных термодинамических систем.

Для выявления картины течения газа по газовоздушному тракту в открытой системе без совершения внешней работы прежде всего необходимо определиться с термодинамическими процессами, происходящими при расширении рабочего тела в потоке [3, 7].

УДК 536.7. Научные специальности: 05.23.03, 05.04.02.

Изотермический процесс расширения рабочего тела в открытой термодинамической системе

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

С целью определения изменения статических и заторможенных параметров газа в газовоздушных трассах систем вентиляции, кондиционирования воздуха, а также во впускных и выпускных каналах с клапанами систем газообмена тепловых двигателей, необходимо выполнить краткий анализ адиабатного процесса расширения газа в открытой термодинамической системе, в результате которого показать, что механическое взаимодействие газодинамических сопротивлений с газом приводит к изменению заторможенных параметров потока и постоянству заторможенной температуры. Это способствует возникновению изотермического режима течения при постоянстве температуры заторможенного потока $T^* = \text{const}$ с соблюдением условия адиабатичности.

Ключевые слова: адиабатный процесс, газодинамическое сопротивление, заторможенные параметры потока, термодинамическая система.

UDC 536.7. Numbers of scientific speciality: 05.23.03, 05.04.02.

Isothermal expansion process of the working fluid in an open thermodynamic system

Andrei A. Balashov, Doctor of Technical Sciences, Professor; Alexey G. Kuzmin, PhD, Assistant Professor; Vladimir A. Sinitsyn, Doctor of Technical Sciences, Professor; Konstantin V. Mamchur, graduate student, the Department of Internal Combustion Engines (ICE), Polzunov Altai State Technical University (AltSTU, Barnaul city)

In order to determine changes in the static and inhibited parameters of the working fluid in the gas-air routes of the ventilation, air conditioning systems, intake and exhaust channels with valves of the gas exchange systems of heat engines, it is necessary to perform a brief analysis of the adiabatic expansion process of the working fluid in an open thermodynamic system, which will show, that the mechanical interaction of gas-dynamic resistance with the flow of the working fluid leads to a change in the inhibited flow parameters and the constancy of the inhibited temperature. This contributes to the occurrence of an isothermal flow regime with a constant temperature of the inhibited flow $T^* = \text{const}$ while observing the adiabatic condition.

Key words: adiabatic process, gas-dynamic resistance, hindered flow parameters, thermodynamic system.



При анализе процессов расширения рабочего тела в открытой системе без внешнего теплообмена с окружающей средой за базовый процесс принимается, как правило, адиабатный. Однако в этом случае следует учесть, что формулировка адиабатичности процесса расширения газа в открытой системе требует отсутствия только внешнего теплообмена с окружающей средой, но не требует учёта дополнительно возникающего внутреннего теплопритока. Это происходит потому, что достаточно сложно отразить в формулировке влияние внутренней теплоты на общий характер процесса и аргументировано обосновать его с термодинамической точки зрения.

Вместе с тем обоснование общего характера развития процесса расширения газа в открытой термодинамической системе без внешнего теплообмена с окружающей средой в учебной литературе выглядит достаточно противоречиво.

С целью выявления этой противоречивости необходимо разграничить взаимодействия газодинамических сопротивлений с реальным газом в открытой системе, используя два варианта:

- влияние взаимодействия на статические параметры рабочего тела по температуре T_2 и давлению P_2 в выходном сечении адиабатного потока;
- влияние взаимодействия на энергетический баланс в потоке при расширении рабочего тела в открытой системе.

Первый вариант влияния дополнительно можно подразделить ещё на два этапа:

- первый этап — влияние взаимодействия на статическую температуру T_2 ;
- второй этап — влияние взаимодействия на статическое давление P_2 .

По первому этапу авторы учебников и научных статей по термодинамике сходятся на том, что в связи с увеличением энтропии в адиабатном процессе расширения [5] увеличивается и внутренняя энергия u_2 реального газа на выходе потока, которая характеризуется статической температурой T_2 .

Обоснование общего характера развития процесса расширения газа в открытой термодинамической системе без внешнего теплообмена с окружающей средой в учебной литературе выглядит противоречиво. С целью выявления этого противоречия необходимо разграничить взаимодействие газодинамических сопротивлений с реальным газом в открытой системе

По второму этапу в связи с изменением статического давления P_2 в выходном сечении потока при увеличении энтропии существует несколько интерпретаций, но в конечном итоге все авторы приходят к выводу, что статическое давление P_2 в выходном сечении потока будет располагаться на изобаре $P_T = \text{const}$ [1, 3, 5, 6].

По второму варианту дело обстоит несколько сложнее, так как картину течения реального газа по газоздушному тракту в открытой системе, согласно литературным данным, можно представить следующим образом.

«Адиабатный поток, преодолевая газодинамические сопротивления, совершает работу l_r , при этом теплота q_r , остаю-

щаяся в потоке, частично восстанавливает кинетическую энергию, затраченную сначала в количестве, эквивалентном l_r , и лишь оставшаяся часть q_r не может быть использована для создания скорости, в связи с относительным возрастанием работы вытеснения и внутренней энергии в выходном сечении...» Так трактуется процесс расширения газа в открытой системе в работе [5].

В работе [4] трактуется, что «...действительный процесс истечения газа через сопло сопровождается трением частиц газа о стенки сопла и другими сопротивлениями (например, вихреобразованием), которые снижают скорость выходящего из сопла газа и уменьшают его кинетическую энергию. Потерянная кинетическая энергия вновь превращается в тепло, вследствие чего температура и теплосодержание протекающего газа повышаются по сравнению с теми, которые соответствуют адиабатическому расширению. Таким образом, потерянная в сопле кинетическая энергия меньше работы трения. Это объясняется тем, что часть работы трения в процессе расширения успевает вновь превратиться в кинетическую энергию. Эта часть называется возвращённым теплом».

В работе [9] говорится, что «...течение сжимаемой жидкости при наличии трения не будет изоэнтропным, так как из-за действия сил трения происходит диссипация (рассеяние) механической энергии и превращение части её в тепло, в результате чего внутренняя энергия, энтальпия и энтропия рабочего тела возрастают. Тепло трения, при отсутствии теплообмена с окружающей средой, усваивается потоком, при этом часть тепла трения идёт на работу расширения и преобразуется в энергию движения рабочего тела. Остальная часть тепла представляет собой потерю работы (кинетической энергии)».

Таким образом, в результате анализа приведённых работ можно заключить, что при соблюдении условия адиабатичности остающаяся в потоке теплота q_r «частично восстанавливает кинетическую энергию» [5] или «потерянная в сопле кинетическая энергия меньше работы трения» [4], или «часть теплоты трения преобразуется в энергию движения рабочего тела» [9]. Оставшаяся часть теплоты «не может быть использована для создания скорости» [5] или «часть работы трения успевает вновь превратиться в кинетическую энергию и эта часть называется возвращённым теплом» [4], или «остальная часть теплоты представляет потерю работы (кинетической энергии)» [9].



Как видно из приведённых работ, авторы делят располагаемую работу l_r в открытой системе, преобразованную в теплоту q_r , на две части, одна из которых восстанавливает кинетическую энергию [5] или преобразуется в энергию движения рабочего тела [9], а другая оставшаяся часть теплоты не может быть использована для создания скорости потока [5] или успевает вновь превратиться в кинетическую энергию [4], или оставшаяся часть теплоты — это потерянная работа [9].

Располагая такими сведениями, авторы практически бездоказательно делят преобразованную из газодинамических потерь теплоту в потоке q_r на две части. Причём если первую часть ещё можно как-то обосновать, то вторая часть не выдерживает серьёзной критики. Поэтому необходимо более детально разобраться в этом вопросе.

Как известно, только при условии роста энтропии в адиабатном потоке будут расти внутренняя энергия u_2 и энтальпия i_2 на выходе потока [5], характеризующие абсолютной статической температурой T_2 . Этот рост T_2 приведёт к снижению кинетической энергии потока из-за уменьшения действительной разности температур ΔT_d , формирующей действительную скорость истечения рабочего тела W_{2d} , относительно вероятной разности ΔT_r , формирующей теоретическую скорость истечения рабочего тела W_{2dT} , так как в этом случае $\Delta T_r > \Delta T_d$, здесь $\Delta T_r = T^* - T_r$ — теоретический перепад абсолютных температур между изоэнтропно заторможенной T^* в адиабатном потоке и статической теоретически возможной T_r в изоэнтропном процессе открытой системы; $\Delta T_d = T^* - T_2$ — действительный перепад абсолютных температур между изоэнтропно заторможенной T^* и статической температурой T_2 на выходе адиабатного потока.

Тогда согласно уравнению энергии рост статической температуры T_2 приведёт к снижению действительной скорости истечения рабочего тела W_{2d} , что и позволяет стабилизировать на постоянном уровне заторможенную температуру в потоке $T^* = \text{const}$:

$$T^* = T_2 + \frac{W_{2d}^2}{2c_p}. \quad (1)$$

Однако, если не выполнить условия адиабатичности, то есть не исключить внешний теплообмен с окружающей средой в открытой системе, то невозможно будет удерживать на постоянном уровне заторможенную температуру $T^* = \text{const}$. Это не позволит рассматривать процесс расширения рабочего тела в открытой системе по заторможенным параметрам потока как частный случай изотермического процесса при $T^* = \text{const}$.

Из сказанного следует, что необходимо учесть внутренний теплоприток в реальное рабочее тело потока в открытой системе с учётом изотермического процесса расширения.

Как следствие, расширение рабочего тела в открытой системе можно характеризовать тремя термодинамическими процессами (рис. 1):

1. Изотермический процесс (частный случай), происходящий при постоянной температуре заторможенного потока $T^* = \text{const}$, изображается усечённой односторонней гиперболой $1^*-2^*-3^*$.

Уравнение изотермического процесса при $T^* = \text{const}$:

$$P_1^* \vartheta_1^* = P_2^* \vartheta_2^*,$$

где P_1^* — абсолютное давление заторможенного потока на входе; P_2^* — абсолютное давление заторможенного потока на выходе; ϑ_1^* — удельный объём по заторможенным параметрам на входе потока; ϑ_2^* — удельный объём по заторможенным параметрам на выходе потока.

2. Адиабатный процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой, изображается гиперболой, выходящими из одной и той же точки 1^*-2 или 1^*-3 и проходящими более круто по отношению к изотерме. Уравнение адиабатного процесса:

$$P_1^* (\vartheta_1^*)^m = P_2^* (\vartheta_2^*)^m,$$

где m — показатель адиабатного процесса расширения в открытой системе.

3. Изоэнтропный процесс (теоретически вероятный) происходящий без теплообмена с окружающей средой и без газодинамических потерь, то есть при постоянной энтропии $S = \text{const}$, изображается усечёнными параболами 2^*-2 или 3^*-3 , проходящими более круто по отношению к изотерме и адиабате.

Уравнение изоэнтропного процесса:

$$P_2^* (\vartheta_2^*)^k = P_2 (\vartheta_2)^k,$$

где k — показатель изоэнтропного процесса.

Таким образом, используя уравнение изотермического процесса расширения, по заторможенным параметрам потока в открытой системе с внутренним теплообменом, возникающим как результат механического взаимодействия газодинамических сопротивлений с рабочим телом потока при соблюдении условий адиабатичности и преобразования газодинамических потерь в теплоту, можно обосновано считать изотермический процесс частным случаем процесса расширения реального рабочего тела в открытой термодинамической системе при постоянстве заторможенной температуры $T^* = \text{const}$. Термодинамика (как и газодинамика) оперирует двумя абсолютными температурами потока:

- T^* — абсолютная температура заторможенного потока;
- T — абсолютная статическая температура в потоке.

Следовательно, уравнениями изотермического процесса можно считать $T = \text{const}$ или $T^* = \text{const}$, а также $dT = 0$ или $dT^* = 0$, а с учётом уравнения состояния — $P\vartheta = \text{const}$ или $P^*\vartheta^* = \text{const}$.

В изотермическом процессе расширения по заторможенным параметрам потока при $T^* = \text{const}$ количество теплоты $q_{г.изт}$ равно работе расширения $l_{г.расш}$ и располагаемой работе $l_{г.расп}$, поэтому можно записать:

$$q_{г.изт} = l_{г.расш} = l_{г.расп}, \quad (2)$$

где $q_{г.изт}$ — количество теплоты, преобразованное из газодинамических потерь в изотермическом процессе расширения рабочего тела; $l_{г.расш}$ — работа расширения рабочего тела в изотермическом процессе; $l_{г.расп}$ — располагаемая работа в изотермическом процессе.

Для определения $q_{\text{г.изт}}$, $l_{\text{г.расш}}$ и $l_{\text{г.расп}}$ можно воспользоваться зависимостями:

$$\begin{aligned} q_{\text{Г.ИЗТ}} &= RT^* \ln \left(\frac{P_1^*}{P_2^*} \right) = RT^* \xi_{\text{ИМ}} \ln \left(\frac{P_1^*}{P_2^*} \right) = \\ &= RT^* \xi_{\text{ИМ}} \frac{k}{k-1} \ln \left(\frac{T^*}{T_2} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\xi_{\text{им}}$ — коэффициент газодинамических потерь при механическом взаимодействии газодинамических сопротивлений с реальным рабочим телом потока в открытой системе; R — удельная газовая постоянная; P_2 — абсолютное статическое давление в выходном сечении потока; T_2 — абсолютная статическая температура в выходном сечении потока.

Изменение энтропии $S_{\text{им}}$ в изотермическом процессе по заторможенным параметрам потока при $T^* = \text{const}$ можно определить по выражению:

$$\Delta S_{\text{им}} = R \ln \left(\frac{P_1^*}{P_2^*} \right). \quad (4)$$

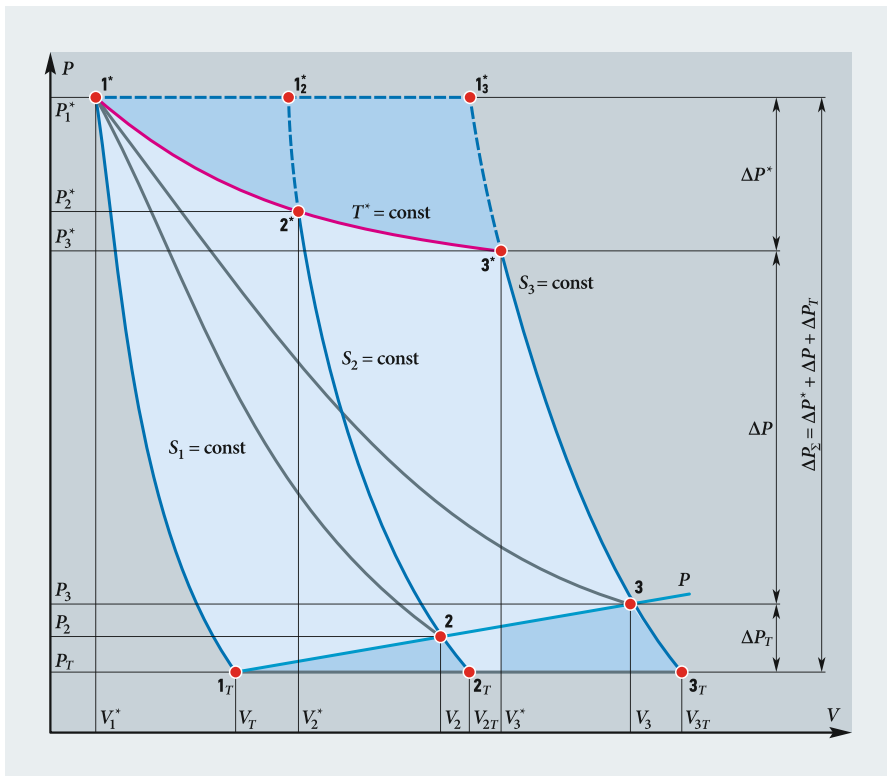
Для установления взаимосвязи в открытой системе между статическими температурными параметрами, характеризующимися абсолютной температурой T_2 , и параметрами по заторможенному давлению P_2^* и статическому давлению P_2 в выходном сечении потока необходимо решить совместно два уравнения изотропного процесса расширения в открытой системе — $S_1 = \text{const}$ и $S_2 = \text{const}$ (причём $S_2 > S_1$), между которыми расположены адиабата 1^*-2 и изотерма 1^*-2^* , а также газодинамические сопротивления с которыми взаимодействует реальное рабочее тело, создавая газодинамические потери (рис. 1).

В результате совместного решения этих уравнений [2], с учётом условия изотермичности при $T^* = \text{const}$ и уравнения состояния, получим:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_1^* P_2}{P_2^* P_T} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (5)$$

где T_2 — абсолютная статическая температура на выходе адиабатного потока; T_T — абсолютная статическая температура на выходе изоэнтропного потока; P_2 — абсолютное статическое давление в адиабатном процессе расширения реального рабочего тела в выходном сечении потока; P_T — абсолютное теоретическое статическое давление в изоэнтропном процессе расширения рабочего тела в потоке.

Из выражения (5) следует, что в качестве базовых параметров в этой зависимости нужно принять абсолютные давление P_T и температуру T_T в изоэнтропном процессе расширения рабочего тела, то есть параметры, при которых $dS = 0$ или $S_1 = S_2 = \text{const}$.



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

Однако, приняв эти параметры за базовые, получим, что отношение статических температур в выходном сечении потока — левая часть выражения (5) — не должно быть равно единице ($T_2/T_1 \neq 1$).

В процессе расширения участвует реальное рабочее тело в открытой системе, которое, взаимодействуя с газодинамическими сопротивлениями в потоке, совершает работу. Эта работа, преобразуясь в теплоту, одновременно увеличивает как внутреннюю энергию в выходном сечении адиабатного потока u_2 , характеристикой которой является статическая температура T_2 , так и статическое давление P_2 на выходе адиабатного потока, которое входит в правую часть выражения (5) в виде отношения P_2/P_T , не равного единице ($P_2/P_T \neq 1$). Равенство единице отношения $P_2/P_T = 1$ означает равенство $P_2 = P_T$, следовательно, процесс расширения уже не реального, а идеального рабочего тела в выходном сечении адиабатного потока, характеризруемый статическим давлением $P_2 = P_T$, станет изэнтропным (без учёта термического влияния газодинамических потерь на статическое давление $P_2 = P_T$ в выходном сечении потока [6]).

Разность давлений с увеличением энтропии в открытой системе равна нулю ($\Delta P_T = P_2 - P_T = 0$), следовательно, статическое давление P_2 расположено на линии изобары $P_T = \text{const}$ [4–6, 9], и термического влияния на статическое давление P_2 на выходе потока не будет оказано.

Без учёта величины $P_2/P_T = 1$ в правой части выражения (5) будем иметь:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_1^*}{P_2^*} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (6)$$

Анализируя левую часть выражения (6), прежде всего необходимо отметить, что в связи с увеличением энтропии внутренняя энергия u_2 , характеризуемая отношением статических температур T_2/T_1 , будет увеличиваться за счёт увеличения величины T_2 .

Правая часть выражения (6), характеризуемая отношением заторможенных давлений P_1^*/P_2^* , также будет увеличиваться с увеличением энтропии, но только за счёт снижения заторможенного давления P_2^* на выходе потока при условии постоянства заторможенной температуры $T^* = \text{const}$. Снижение заторможенного давления P_2^* на выходе потока является результатом механического взаимодействия газодинамических сопротивлений с реальным рабочим телом в изотермическом процессе при $T^* = \text{const}$.

В итоге можно сказать, что в учебниках по термодинамике результат анализа адиабатного процесса расширения реального рабочего тела в открытой системе по статическому давлению P_2 в выходном сечении потока выдаётся в виде того, что статическое давление P_2 будет расположено на изобаре $P_T = \text{const}$ [4–6, 9] и с увеличением энтропии будет развиваться изобарно.

В этом случае развитие статического давления P_2 по мере увеличения энтропии по изобаре $P_T = \text{const}$ равносильно тому, что на выходе потока будет $P_2 = P_T$, и термического воздействия на статическое давление P_2 в сторону его увеличения не происходит. Выражение (5), преобразуясь в выражение (6), потеряет в правой части отношение P_2/P_T .

Отсутствие отношения P_2/P_T приведёт к тому, что действительная скорость истечения $W_{2д}$, характеризующаяся перепадом давления $\Delta P = P_2^* - P_2$ в потоке, будет определяться теоретическим перепадом давления $\Delta P_T = P_2^* - P_T$ в потоке, то есть $\Delta P_T > \Delta P$ или $P_T/P_2^* < P_2/P_2^*$. Это, в свою очередь, приведёт к тому, что действительная скорость истечения $W_{2д}$ будет меньше вероятной скорости истечения $W_{2дТ}$ ($W_{2д} < W_{2дТ}$).

Механическое взаимодействие газодинамических сопротивлений с газом в открытой системе, при условии соблюдения адиабатичности и преобразования газодинамических потерь в теплоту, всегда приводит как к увеличению энтропии, так и к изменению заторможенных и статических параметров на выходе потока. Изменение заторможенных параметров на выходе потока заключается в снижении заторможенного давления P_2^* относительно заторможенного давления на входе P_1^* , при условии постоянства заторможенной температуры $T^* = \text{const}$. Изменение статических параметров заключается в одновременном увеличении абсолютной статической температуры T_2 и абсолютного статического давления P_2 на выходе потока.

Одновременное увеличение T_2 и P_2 происходит за счёт располагаемой работы, преобразованной в теплоту.

Затраты теплоты на увеличение статического давления от изоэнтропного уровня P_T до адиабатного P_2 приводят к снижению изоэнтропного перепада давлений $\Delta P = P_2^* - P_2$ относительно вероятного $\Delta P_T = P_2^* - P_T$, то есть $\Delta P_T > \Delta P$. Подведённое дополнительное количество теплоты, затрачиваемое на увеличение адиабатного статического давления P_2 относительно изоэнтропного P_T , можно рассматривать как дополнительное тепловое (термическое) сопротивление, которое приводит к снижению действительной скорости $W_{2д}$ относительно вероятной $W_{2дТ}$.

В процессе расширения реального рабочего тела в открытой системе, таким образом, можно выделить две сферы взаимодействия газодинамических сопротивлений с реальным рабочим телом в открытой системе:



1. Механическое взаимодействие, результатом которого является располагаемая работа по преодолению газодинамических сопротивлений, преобразованная в теплоту.

2. Термическое взаимодействие, результатом которого является увеличение статических температуры T_2 и давления P_2 относительно изоэнтропного уровня T_T и P_T и появление дополнительного термического сопротивления в потоке.

Механическое взаимодействие газодинамических сопротивлений с газом в открытой системе, при условии соблюдения адиабатичности и преобразования газодинамических потерь в теплоту, всегда приводит как к увеличению энтропии, так и к изменению заторможенных и статических параметров на выходе потока. Изменение заторможенных параметров на выходе потока заключается в снижении заторможенного давления относительно давления на входе, при условии постоянства заторможенной температуры

Необходимо заметить, что обнаружить дополнительное термическое сопротивление в потоке при действительных скоростях истечения ниже величины $W_{2д} = 50$ м/с не представляется возможным, так как их величина лежит в пределах погрешности счета вычислительных устройств.

Проведённые расчёты показали, что до скорости истечения $W_{2д} = 320$ м/с величина дополнительного термического

сопротивления в потоке не превысила 10% от общей суммы газодинамических сопротивлений.

В заключении отметим, что в адиабатном процессе расширения реального рабочего тела в открытой системе можно выделить, как частный случай, изотермический процесс по заторможенным параметрам реального рабочего тела при постоянной температуре заторможенного потока $T^* = \text{const}$.

В связи с этим формулировку адиабатного процесса расширения реального газа в открытой системе можно уточнить и расширить в следующем виде: «адиабатно-изотермическим называется равновесный термодинамический процесс в открытой системе, протекающий без внешнего теплообмена с окружающей средой при постоянной температуре заторможенного потока $T^* = \text{const}$ ».

1. Андрущенко А.И. Основы технической термодинамики реальных процессов. — 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. Жирицкий Г.С. Газовые турбины авиационных двигателей / Г.С. Жирицкий, В.И. Локай, М.К. Максимова и др.; под ред. проф. Г.С. Жирицкого. — М.: Оборонгиз, 1963. 608 с.
5. Жуковский В.С. Термодинамика / Под ред. А.А. Гухмана. — М.: Энергоатомиздат, 1983. 304 с.
6. Кирилин В.А. Техническая термодинамика: учеб. для вузов. Изд. 4-е, перераб. / В.А. Кирилин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. — М.: Энергоатомиздат, 1983. 416 с.
7. Мамонтов М.А. Некоторые случаи течения газов. — М.: Оборонгиз, 1951. 490 с.
8. Рудой Б.П. Газовая динамика ДВС. — Уфа: Изд-во УАИ им. Серго Орджоникидзе, 1983. 52 с.
9. Троян Е.Н. Техническая термодинамика. Истечение газов и паров. Идеальные циклы тепловых двигателей и установок: учеб. пособ. — Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1997. 140 с.
10. Чарный И.А. Основы газовой динамики. — М.: Гостехиздат, 1961. 200 с.

References — see page 95.

Isothermal expansion process of the working fluid in an open thermodynamic system. Pp. 75–79.

Andrei A. Balashov, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Alexey G. Kuzmin**, PhD, Assistant Professor; **Vladimir A. Sinitsyn**, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Konstantin V. Mamchur**, graduate student, the Department of Internal Combustion Engines (ICE), Polzunov Altai State Technical University (AltSTU, Barnaul city)

1. Andriushenko A.I. *Osnovy tehnikeskoy termodinamiki real'nykh processov* [Fundamentals of technical thermodynamics of real processes]. Moscow. *Vyssshaya shkola* ["Higher education" Publishing House]. 1975. 264 p. [In Russian]
2. Balashov A.A. *Tekhnicheskaya termodinamika. Ch. 2: Osnovy termogazodinamiki otkrytykh 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 gazovykh 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. Zhirickij G.S., Lokaj V.I., Maksutova M.K. et al. *Gazovye turbiny aviacionnykh dvigatelej* [Gas turbines of aircraft engines]. Edited by Prof. G.S. Zhirickij. Moscow. *Oborongiz* [State publishing house of defense industry literature of the USSR ("Oborongiz" Publishers)]. 1963. 608 p. [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. Kirilin V.A., Sychev V.V., Shejndlin A.E. *Tekhnicheskaya termodinamika: ucheb. dlja vuzov* [Technical thermodynamics: A textbook for universities]. 4th edition, rev. Moscow. *Jenergoatomizdat* [Publishing House of Energy and Nuclear Industry of the USSR ("Energoatomizdat" Publishers)]. 1983. 416 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. Rudoj B.P. *Gazovaja dinamika DVS* [Gas dynamics of the internal combustion engine]. Ufa. *Izd-vo UAI im. Sergo Ordzhonikidze* [Publishing House of Ufa State Aviation Technical University]. 1983. 52 p. [In Russian]
9. Trojan E.N. *Tekhnicheskaya termodinamika. Istechenie gazov i parov. Ideal'nye cikly teplovykh dvigatelej i ustanovok: ucheb. posob.* [Technical thermodynamics. Gas and vapor exhaust. Ideal cycles of heat engines and installations: A textbook]. Barnaul. *Izd-vo AltGTU* [Publishing House of Polzunov Altai State Technical University]. 1997. 140 p. [In Russian]
10. Charnyj I.A. *Osnovy gazovoj dinamiki* [Basics of gas dynamics]. Moscow. *Gostoptekhizdat* [State scientific and technical publishing house of oil and mining literature of the USSR ("Gostoptekhizdat" Publishers)]. 1961. 200 p. [In Russian]