

РАЗДЕЛ 2. МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.311

АНАЛИЗ АДИАБАТНО-ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РАСШИРЕНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА В ГАЗОВОЗДУШНЫХ ТРАССАХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

А.А. Балашов, К.В. Мамчур, В.А. Сеницын

В данной статье проведен краткий анализ термодинамических процессов расширения реального рабочего тела в открытой системе с привлечением диаграмм в $P-V$ и $T-S$ координатах, с помощью которых показано, что взаимодействие газодинамических сопротивлений с потоком, при соблюдении условия адиабатичности, приводит к возникновению (как частный случай) изотермического режима течения при постоянной заторможенной температуре $T^ = Const$ и появлению дополнительного термического сопротивления в потоке. Представлены характеристики двух способов взаимодействия газодинамических сопротивлений с реальным рабочим телом по заторможенным параметрам потока при постоянной заторможенной температуре $T^* = Const$. Первый способ характеризуется механическим взаимодействием газодинамических сопротивлений с реальным рабочим телом, влияющим на статические параметры в выходном сечении потока. Вторым способом характеризуется термическим взаимодействием газодинамических сопротивлений с рабочим телом потока в адиабатном процессе. Доказано, при расширении реального рабочего тела в открытой системе, что основное воздействие газодинамических сопротивлений на параметры потока - механическое, которое создает условия к появлению изотермического процесса расширения реального рабочего тела по заторможенным параметрам при постоянной заторможенной температуре потока $T^* = Const$ (при соблюдении адиабатичности). Показано, что формулировка адиабатного процесса расширения реального рабочего тела в открытой термодинамической системе без совершения внешней работы может быть уточнена и расширена.*

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

Для выявления картины течения рабочего тела по газозвоздушному тракту в открытой системе без совершения внешней работы прежде всего необходимо определиться с термодинамическими процессами, по которым происходит расширение рабочего тела в потоке.

За базовый процесс расширения рабочего тела в открытой термодинамической системе без внешнего теплообмена с окружающей средой примем адиабатический процесс. Следует уточнить, что адиабатичность процесса расширения рабочего тела в теплоизолированном потоке требует отсутствия только внешнего теплообмена, но не требует даже упоминания о внутреннем теплообмене, поэтому только при условии отсутствия внешнего теплообмена рабочего тела с окружающей средой может возникнуть (как частный случай) изотермический процесс при постоянстве заторможенной, но не статической, температуры потока.

В связи с этим процесс расширения в открытой адиабатической системе с внутренним теплообменом, возникающим в потоке реаль-

ного рабочего тела при постоянстве заторможенной температуры $T^* = Const$, можно считать изотермическим. В сущности, это частный случай изотермического процесса расширения рабочего тела при постоянной температуре заторможенного потока $T^* = Const$, поддержание которой на этом уровне осуществляется за счет теплоты, преобразованной из газодинамических потерь с соблюдением условия адиабатичности. В конечном итоге результатом этого процесса является снижение заторможенного давления P_2^* на выходе потока по сравнению с давлением входа P_1^* .

Изотермический и адиабатический термодинамические процессы взаимосвязаны между собой в выходном сечении потока с помощью изоэнтропного процесса расширения идеального рабочего тела в открытой термодинамической системе без внешнего и внутреннего теплообмена при постоянной энтропии и теплоемкости (рисунок 1), т.е. это в сущности теплоизолированный поток реального рабочего тела без газодинамических потерь.

Прежде всего необходимо уточнить, что изоэнтروпный поток в открытой термодинамической системе – это чистая термодинамическая идеализация процесса расширения рабочего тела в потоке [2, 4].

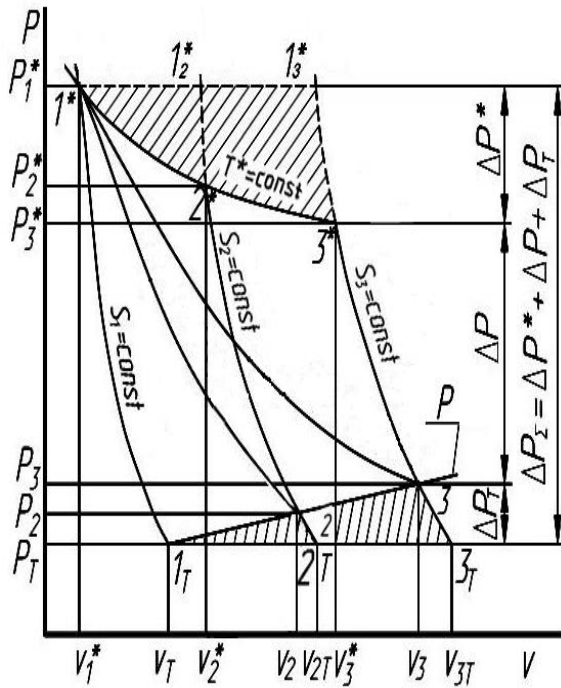


Рисунок 1 – Диаграмма P-V расширения рабочего тела в адиабатном потоке

В термодинамике потока этот идеализированный процесс необходим как база сравнения с адиабатным процессом расширения реального рабочего тела в открытых системах при определении газодинамических потерь, изменения энтропии и других параметров.

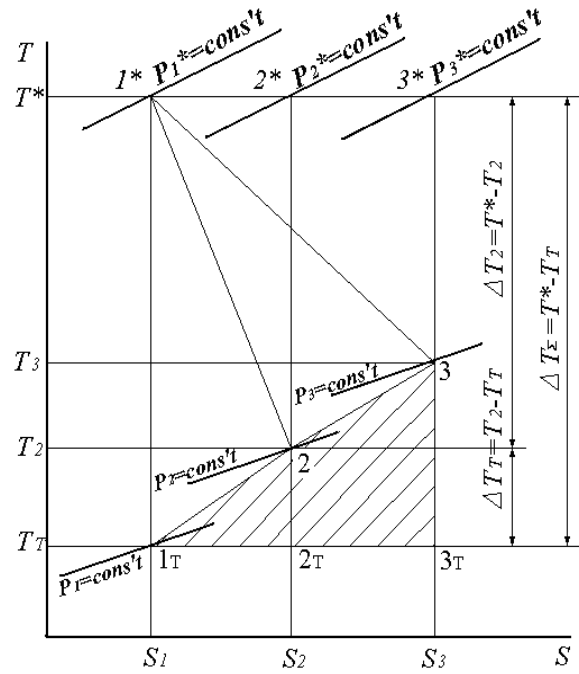


Рисунок 2 – Диаграмма T-S расширения рабочего тела в адиабатном потоке

Таким образом, процесс расширения рабочего тела в открытой термодинамической системе без внешнего, но с внутренним теплообменом, при постоянной теплоемкости включает в себя (если так представить) как бы три термодинамических процесса, а именно (рисунки 1 и 2):

– адиабатный – базовый процесс, кривые 1* – 2 или 1* – 3,

уравнение процесса – $P_1^* \cdot \vartheta_1^{*m} = P_2 \cdot \vartheta_2^m$ или $P_1^* \cdot \vartheta_1^{*m} = P_3 \cdot \vartheta_3^m$, где m – показатель адиабаты в открытой системе [3];

– изотермический – (как частный случай) процесс при $T^* = Const$, гипербола 1* – 2* – 3*, уравнение процесса – $P_1^* \cdot \vartheta_1^* = P_2 \cdot \vartheta_2^* = P_3 \cdot \vartheta_3^*$;

– изоэнтропные – объединяющие процессы, кривые 1* – 1_T или 2* – 2 или 3* – 3, уравнения процессов – $P_1^* \cdot \vartheta_1^{*k} = P_T \cdot \vartheta_T^k$; $P_2^* \cdot \vartheta_2^{*k} = P_2 \cdot \vartheta_2^k$;

$P_3^* \cdot \vartheta_3^{*k} = P_3 \cdot \vartheta_3^k$, где k – показатели изоэнтропы.

Для установления связи параметров рабочего тела в открытой термодинамической системе, между выбранными контрольными сечениями 1*–1_T ($S_1 = Const$) и 2*–2 ($S_2 = Const$) или 3*–3 ($S_3 = Const$), запишем уравнения адиабатного (1), изотермического (при $T^* = Const$) (2) и изоэнтропных процессов (3 и 4), имея ввиду при этом, что между контрольными изоэнтропными сечениями S_1 и S_2 или S_3 расположены газодинамические сопротивления, влияющие на параметры рабочего тела в процессе расширения:

$$P_1^* \cdot \vartheta_1^{*m} = P_2 \cdot \vartheta_2^m; \quad (1)$$

$$P_1^* \cdot \vartheta_1^* = P_2 \cdot \vartheta_2^*; \quad (2)$$

$$P_2^* \cdot \vartheta_2^{*k} = P_2 \cdot \vartheta_2^k; \quad (3)$$

АНАЛИЗ АДИАБАТНО-ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
РАСШИРЕНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА В ГАЗОВОЗДУШНЫХ ТРАССАХ
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

$$P_1^* \cdot \vartheta_1^{*K} = P_T \cdot \vartheta_T^K, \quad (4)$$

где P_1^* , P_2^* , P_3^* — абсолютные давления заторможенного потока в сечениях 1–1 и 2–2 или 3–3;

ϑ_1^* , ϑ_2^* , ϑ_3^* — удельные объемы, определяемые по параметрам заторможенного потока в сечениях 1—1 и 2—2 или 3–3;

ϑ_2 , ϑ_3 , ϑ_T — удельные объемы, определяемые по статическим и теоретическим параметрам потока в сечениях 2—2 или 3–3;

P_2 , P_3 , P_T — абсолютные статические и теоретически достижимое давления в выходном сечении потока;

m — показатель адиабатного процесса расширения реального рабочего тела в открытой системе;

K — показатель изэнтропного процесса расширения в открытой системе.

В этом случае следует отметить, что уравнения адиабатного (1) и изотермического (2) при $T^* = Const$ процессов учитывают влияние газодинамических сопротивлений, а уравнения (3) и (4) их не учитывают, но при этом уравнение (3) является как бы итоговым, после преодоления рабочим телом газодинамических сопротивлений между сечениями $S_1 = Const$ и $S_2 = Const$, результатом которого явилось снижение заторможенного давления на выходе до P_2^* относительно давления на входе P_1^* , а также увеличения статических как давления P_2 относительно теоретического P_T , так и температуры T_2 относительно теоретической T_T (рисунки 1 и 2).

Совместное решение системы уравнений (1 - 4) при различных комбинациях с целью определения температурных параметров потока с учетом адиабатичности и изотермичности процесса при $T^* = Const$, а также уравнения состояния, приводит к получению обобщенного выражения для определения температурных параметров через параметры потока по давлению [2]:

$$\frac{T_1^{*2}}{T_T \cdot T_2} = \left(\frac{P_1^*}{P_T} \cdot \frac{P_2^*}{P_2} \right)^{\frac{K-1}{K}}, \quad (5)$$

где T^* — абсолютная температура заторможенного потока в адиабатном и изотермическом процессах расширения рабочего тела;

T_2 — абсолютная статическая температура на выходе адиабатного потока;

T_T — абсолютная теоретическая статическая температура в изэнтропном процессе расширения.

С целью дальнейшего уточнения взаимодействия газодинамических сопротивлений с реальным рабочим телом в открытой системе необходимо совместно решить два изэнтропных уравнения (3) и (4), между контрольных сечений которых расположены газодинамические сопротивления, влияющие на параметры, входящие в зависимость (3).

Сопоставляя выражения (3) и (4) с учетом адиабатичности, а также изотермичности при $T^* = Const$ и уравнения состояния [1], получим:

$$\frac{T_2}{T_T} = \left(\frac{P_1^* \cdot P_2}{P_2^* \cdot P_T} \right)^{\frac{K-1}{K}} \quad (6)$$

Увеличение абсолютных температур T_2 или T_3 в адиабатном процессе расширения рабочего тела относительно их изэнтропного уровня T_T (левая часть выражения 6, рисунок 2) вызвано присутствием газодинамических сопротивлений, которые механически взаимодействуя с реальным рабочим телом, снижают заторможенные давления до уровня P_2^* или P_3^* на выходе потока относительно давления на входе P_1^* , совершая таким образом механическую работу, которая будучи преобразованной в теплоту, при соблюдении условия адиабатичности, создает предпосылки для появления (как частный случай) изотермического процесса расширения реального рабочего тела при постоянной температуре $T^* = Const$. Усвоенная реальным рабочим телом теплота увеличивает как внутреннюю энергию u_2 или u_3 в адиабатном процессе, характеризуемую статическими температурами T_2 или T_3 , так и статические давления P_2 или P_3 относительно их изэнтропного уровня T_T и P_T , а также характеризует суммарные газодинамические потери по температурным параметрам адиабатного потока (рисунок 2).

Левая часть выражения (6) представляет собой суммарные газодинамические потери, характеризуемые температурными параметрами потока, а правая часть — те же газодинамические потери, но только по параметрам давления в потоке как в изотермическом, так и в адиабатном процессах, которые представляют два вида воздействия газодинамических сопротивлений на параметры потока.

Подводя итог сказанному, можно констатировать, что левая часть зависимости (6),

представленная отношением статических температур (T_2/T_T), характеризует суммарные газодинамические потери в адиабатном и в изотермическом процессах, которые в правой части этого же выражения представлены параметрами по давлению в потоке, характеризующими два способа взаимодействия газодинамических сопротивлений с реальным рабочим телом в открытой системе [5]:

первый способ – это механическое взаимодействие газодинамических сопротивлений с рабочим телом потока в изотермическом процессе при $T^* = Const$, характеризуемое отношением заторможенных давлений (P_1^*/P_2^*);

второй способ – это термическое взаимодействие газодинамических сопротивлений с рабочим телом потока в адиабатном процессе, характеризуемое отношением статических давлений (P_2/P_T).

Для дальнейшего расширения взаимосвязи параметров рабочего тела в открытой термодинамической системе с внутренним теплообменом между выбранными контрольными сечениями 1^*-1_T ($S_1 = Const$) и 2^*-2_T ($S_2 = Const$) или $1_3^*-3_T$ ($S_3 = Const$) необходимо рассмотреть изменение энтропии как в адиабатном, так и изотермическом процессах расширения в открытой системе (рисунок 1).

Из выражения (6) следует, что в качестве базовых параметров в этой зависимости можно принять статические, теоретически достижимые в изоэнтропном процессе расширения рабочего тела, абсолютные давление P_T и температуру T_T , т. е. параметры, при достижении которых выдерживается условие $dS = 0$ или $S_1 = S_2 = Const$.

Изменение энтропии при совершении термодинамических процессов расширения в какой-либо открытой системе определяется по выражению:

$$dS = \frac{\delta Q}{T}, \quad (7)$$

где dS – приращение энтропии;

δQ – увеличение элементарного количества теплоты в открытой системе за счет преобразования газодинамических потерь;

T – базовая абсолютная термодинамическая температура процесса.

Увеличение элементарного количества теплоты δQ в адиабатном процессе расширения реального рабочего тела в открытой системе будет происходить за счет преобразо-

вания газодинамических потерь в теплоту, характеристикой которой является статическая температура T_2 по сравнению с температурой T_T .

Выражение (7) в этом случае можно записать в виде:

$$dS = \frac{\delta Q_r}{T}, \quad (8)$$

где δQ_r – элементарное количество теплоты, образующееся в адиабатном процессе расширения рабочего тела за счет преобразования газодинамических потерь.

В этом случае элементарное количество теплоты (с учетом принятых допущений) можно представить как

$$\delta q_r = c_p \cdot dT, \quad (9)$$

где $\Delta T_T = T_2 - T_T$.

Тогда выражение (7) можно записать в виде:

$$ds = -c_p \cdot dT_T / T_T \quad (10)$$

Интеграл выражения (10):

$$\int_{S_1}^{S_2} ds = -c_p \cdot \int_{T_2}^{T_T} \frac{dT_T}{T_T} \quad (11)$$

Интегрируя выражение (11) в обозначенных пределах, получим

$$S_2 - S_1 = \Delta S = C_p \cdot \ln T_2 / T_T. \quad (12)$$

С учетом зависимости (6) выражение (12) для суммарного приращения энтропии примет вид

$$\Delta S_{ap} = c_p \cdot \ln \left(\frac{P_1^*}{P_2^*} \cdot \frac{P_2}{P_T} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = R \cdot \left(\ln \frac{P_1^*}{P_2^*} + \ln \frac{P_2}{P_T} \right) \quad (13)$$

Преобразуем выражение (13):

$$\Delta S_{ap} = c_p \cdot \ln \left[\frac{2}{2 - \xi \cdot M^2 \cdot (\kappa - 1)} \right], \quad (14)$$

где ξ – коэффициент газодинамических потерь; M – число Маха.

Таким образом, в адиабатном процессе расширения рабочего тела в открытой термодинамической системе осуществляется двойное воздействие на его параметры, а именно: основное влияние – механическое, которое приводит к снижению заторможенного давления в выходном сечении потока и возникновению изотермического процесса расширения

АНАЛИЗ АДИАБАТНО-ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
РАСШИРЕНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА В ГАЗОВОЗДУШНЫХ ТРАССАХ
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

рабочего тела при постоянной температуре заторможенного потока $T^* = Const$, дополнительное – термическое, за счет которого создается тепловое сопротивление из-за преобразования газодинамических потерь в изотермическом процессе в теплоту адиабатного процесса, приводящее к увеличению в выходном сечении потока статических температуры T_2 и давления P_2 относительно их изоэнтропного уровня T_T и P_T .

В связи с этим возникает необходимость отображать в зависимостях, таких как изменение энтропии ΔS и энтальпии Δi , коэффициентов газодинамических потерь ξ и расхода μ , а также и в некоторых других, способы взаимодействия газодинамических сопротивлений с реальным рабочим телом потока – механический, термический или результирующий. Поэтому для обозначения упомянутых способов влияния газодинамических сопротивлений на параметры потока предлагается использовать нижние индексы, такие как:

- индекс «**ар**» – характеризует результирующий (механический + термический) способ воздействия газодинамических сопротивлений на параметры адиабатного потока;
- индекс «**им**» – характеризует механический способ влияния тех же сопротивлений на параметры изотермического потока;
- индекс «**ат**» – характеризует термический способ влияния тех же сопротивлений на параметры адиабатного потока.

В этом случае необходимо выполнить анализ влияния газодинамических сопротивлений на изменение энтропии в адиабатно – изотермическом потоке с помощью выражения (13), а именно:

$$\Delta S_{ар} = R \cdot \ln \frac{P_1^*}{P_2^*} + R \cdot \ln \frac{P_2}{P_T}, \quad (15)$$

где $\Delta S_{ар}$ – суммарное изменение энтропии, возникающее в связи с преобразованием работы расширения рабочего тела в изотермическом процессе при $T^* = Const$ в теплоту адиабатного потока из-за увеличения статических температуры и давления.

Первое слагаемое правой части выражения (15) можно представить как

$$\Delta S_{им} = R \cdot \ln \frac{P_1^*}{P_2^*} \quad (16)$$

где $\Delta S_{им}$ – изменение энтропии за счет механического воздействия газодинамических сопротивлений в канале на изотермический поток реального рабочего тела при $T^* = Const$,

R – удельная газовая постоянная.

Если при одном и том же давлении на входе в канал P_1^* заторможенное давление на выходе из канала P_2^* будет уменьшаться, то изменение энтропии $\Delta S_{ам}$ будет увеличиваться и в пределе, когда $P_2^* \rightarrow P_2$ и $T_2 \rightarrow T^*$, а $W_0 \rightarrow 0$, вся располагаемая энергия потока будет расходоваться только на преодоление газодинамических сопротивлений.

Второе слагаемое правой части выражения (15) можно представить как

$$\Delta S_{ат} = R \cdot \ln \frac{P_2}{P_T}, \quad (17)$$

где $\Delta S_{ат}$ – изменение энтропии за счет термического воздействия газодинамических сопротивлений на параметры потока в изотермическом процессе, преобразованных в теплоту адиабатного процесса расширения рабочего тела.

При $P_2 \rightarrow P_T$ и $\Delta P_T \rightarrow 0$ изменение энтропии от термического воздействия газодинамических сопротивлений в канале на движущийся поток будет также стремиться к нулю, т.е. $\Delta S_{ат} \rightarrow 0$.

При увеличении механического воздействия газодинамических сопротивлений в канале на движущийся поток будет расти изменение энтропии $\Delta S_{ам}$, что в свою очередь приведет к увеличению энтропии $\Delta S_{ат}$, возникающей при преобразовании газодинамических потерь в теплоту, которая усваивается потоком, термически воздействуя на него при соблюдении условия адиабатности, создавая таким образом дополнительное тепловое сопротивление, и, кроме этого, к увеличению суммарной энтропии в адиабатно – изотермическом потоке $\Delta S_{ар}$. Поэтому результирующее изменение энтропии в открытой термодинамической системе, согласно выражениям (16) и (17), будет складываться из изотермической – механической и адиабатной – тепловой составляющих энтропии в адиабатном потоке:

$$\Delta S_{ар} = \Delta S_{им} + \Delta S_{ат} \quad (18)$$

Результирующее элементарное количество внутренней теплоты, образующееся в открытой термодинамической системе в связи с преобразованием газодинамических потерь в адиабатно – изотермическом процессе, можно

записать (по аналогии с энтропией) в следующем виде:

$$dq_{r.ap} = dq_{r.им} + dq_{r.ат}, \quad (19)$$

где $dq_{r.ap}$ – элементарное результирующее (суммарное) количество внутренней теплоты, преобразованное из газодинамических потерь в процессе расширения реального рабочего тела в потоке;

$dq_{r.им}$ – элементарное количество внутренней теплоты образующееся в открытой термодинамической системе в изотермическом процессе при $T^* = Const$, как результат механического взаимодействия газодинамических сопротивлений в канале с реальным рабочим телом потока;

$dq_{r.ат}$ – элементарное количество внутренней теплоты образующееся в открытой термодинамической системе в результате преобразования газодинамических потерь в изотермическом процессе при $T^* = Const$ в теплоту адиабатного процесса, создавая при этом, за счет увеличения статического давления P_2 , дополнительное термическое сопротивление в потоке.

Количество теплоты $q_{r.ap}$ в адиабатно-изотермическом процессе при $T^* = Const$, возникающее из-за преобразования газодинамических потерь в теплоту, может быть определено по следующим равнозначным выражениям:

$$q_{r.ap} = c_a \cdot \Delta T = \xi_{ap} \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad (20)$$

где c_a – теплоемкость адиабатного процесса;
 c_p – теплоемкость при постоянном давлении;

ξ_{ap} – суммарный (результатирующий) коэффициент газодинамических потерь в адиабатном процессе расширения рабочего тела в потоке;

$\Delta T = T^* - T_2$ – перепад температур в адиабатном процессе расширения рабочего тела в потоке

Количество теплоты, располагаемая работа и работа расширения в изотермическом процессе при $T^* = Const$, возникающие из-за преобразования газодинамических потерь в теплоту, определяются по равнозначным выражениям:

$$q_{r.изт.} = l_{r.расп} = l_{r.расш} = R \cdot T^* \cdot \ln \frac{P_1^*}{P_2^*}$$

$$= R \cdot T^* \cdot \xi_{им} \cdot \ln \frac{P_2^*}{P_2} = c_p \cdot T^* \cdot \xi_{им} \cdot \ln \frac{T^*}{T_2}, \quad (21)$$

где $q_{r.изт.}$ – количество теплоты в изотермическом процессе, преобразованное из газодинамических потерь при $T^* = Const$;

$l_{r.расп}$ – располагаемая работа в изотермическом процессе;

$l_{r.расш}$ – работа расширения в изотермическом процессе;

T^* – абсолютная температура заторможенного потока;

T_2 – абсолютная статическая температура на выходе потока;

P_1^* – абсолютное давление заторможенного потока на его входе;

P_2^* – абсолютное давление заторможенного потока на его выходе;

$\xi_{им}$ – коэффициент газодинамических потерь, характеризующий механическое взаимодействие газодинамических сопротивлений с рабочим телом потока;

R – удельная газовая постоянная.

Помимо этого, количество внутренней теплоты $q_{r.им}$, образующееся в адиабатной открытой термодинамической системе как результат механического взаимодействия газодинамических сопротивлений в канале с рабочим телом потока, может быть определено по следующим равнозначным зависимостям:

$$q_{r.им} = c_{им} \cdot \Delta T = \xi_{им} \cdot c_p \cdot \Delta T = \frac{K \cdot \xi_{им}}{K \cdot \xi_{им} + 1} \cdot P \cdot d\vartheta = c_p \cdot \Delta T_T, \quad (22)$$

где $P \cdot d\vartheta$ – работа расширения рабочего тела в адиабатном потоке;

$\Delta T_T = T_2 - T_T$ – перепад статических температур в адиабатном и изоэнтальпическом процессах расширения рабочего тела в потоке.

Суммарное количество внутренней теплоты $q_{r.ap}$ в адиабатной открытой термодинамической системе, возникающее в связи с механическим и термическим взаимодействием газодинамических сопротивлений с реальным рабочим телом потока, распределяется следующим образом:

– основная часть – характеризуется механическим взаимодействием газодинамических сопротивлений с реальным рабочим телом, в результате чего возрастает внутренняя энергия на выходе потока u_2 (характеризуемая статической температурой T_2), относительно теоретической внутренней

АНАЛИЗ АДИАБАТНО-ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РАСШИРЕНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА В ГАЗОВОЗДУШНЫХ ТРАССАХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

энергии u_T (характеризуемой теоретической температурой T_T);

– меньшая часть - характеризуется термическим взаимодействием газодинамических сопротивлений с реальным рабочим телом, в результате чего возрастает статическое давление на выходе потока P_2 относительно изоэнтропного уровня P_T .

Тогда, количество внутренней теплоты $q_{r.ат}$, образующееся в адиабатной открытой термодинамической системе как результат термического взаимодействия газодинамических сопротивлений с потоком, может быть определено по следующим зависимостям:

$$q_{r.ат} = c_{ат} \cdot \Delta T = \xi_{ат} \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad (23)$$

где $c_{ат}$ – теплоемкость рабочего тела способствующего в адиабатном процессе возникновению термического сопротивления, т.е. увеличению статического давления на выходе потока P_2 ;

$\xi_{ат}$ – коэффициент газодинамических потерь в открытой системе, характеризующий дополнительные газодинамические потери, возникающие в связи с увеличением статического давления P_2 на выходе потока относительно изоэнтропного давления P_T .

В заключении можно сказать, что формулировка адиабатного процесса расширения реального рабочего тела в открытой термодинамической системе без совершения внешней работы, которая приводится в технической литературе по термодинамике [4, 6], учитывает лишь отсутствие внешнего теплообмена, не затрагивая внутреннего, который оказывает дополнительное влияние на параметры потока.

Таким образом, формулировку адиабатного процесса расширения реального рабочего тела в открытой термодинамической системе без совершения внешней работы в виде, в котором она приводится в современной технической литературе, по мнению авторов, следует уточнить и расширить: адиабатно – изотермическим называется равновесный процесс расширения реального рабочего тела в открытой системе, протекающий без тепло-

обмена с окружающей средой при постоянстве температуры заторможенного потока $T^* = \text{Const}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балашов А. А. Газодинамические потери в адиабатных потоках поршневых двигателей / А. А. Балашов // Ползуновский вестник. – 2007. – №4. – С. 18-23.
2. Балашов А.А. Техническая термодинамика. Часть 2. Основы термогазодинамики открытых систем /А. А. Балашов; Алт. гос. тех. ун-т им. И.И. Ползунова – Барнаул. – Изд-во АлтГТУ, 2014. - 101 с.
3. Вулис Л.А. Термодинамика газовых потоков /Л.А. Вулис. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1950. – 305 с.
4. Егоров Я.А. Показатель процесса изменения параметров газа в потоке /Я.А.Егоров //Двигатели внутреннего сгорания.– 1982. Вып.35. – С. 43–49.
5. Жуковский В.С. Термодинамика: под. А.А. Гухмана/ В.С. Жуковский – М.: Энергоатомиздат, 1983. 304с.
6. Зысин В.А. Техническая термодинамика потока/В.А.Зысин. –Изд.- Ленинград. ун – та, 1977. – 160 с.
7. Кириллин В.А. Техническая термодинамика /В.А Кириллин, В.В. Сычёв, А.К. Шейндлин. – М.: «Энергоиздат», 1983.– 416 с.
8. Погорелов В.И. Газодинамические расчеты пневматических приводов /В.И. Погорелов.– Л.: Машиностроение, 1971. – 184 с.
9. Мамонтов М.А. Некоторые случаи течения газа/ М.А.Мамонтов.–Оборонгиз, 1951. – 490 с.10. Теплотехника: учеб. для вузов /В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.–М.: Высш. шк., 2006. – 671 с.
11. Ястржембский А.С. Техническая термодинамика /А.С. Ястржембский.– М.: Л.: Госэнергоиздат, 1960.– 495 с.

Балашов Андрей Алексеевич – д.т.н., доцент кафедры ДВС ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, e-mail: aa_balashov10@mail.ru, тел. (3852)36–75–86.

Мамчур Константин Витальевич – магистрант каф. ДВС ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, гр. 8ЭМ–62, e-mail: konstantin.mamchur@mail.ru, тел. раб.502217, тел.8–903911–66–87.

Синицын Владимир Александрович – д.т.н., профессор каф. ДВС ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, e-mail: prorektor_agtu@mail.ru, тел. (3852) 36–75–86.