

## ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ОТКРЫТОЙ АДИАБАТИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

А.А. Балашов, А.В. Капишников, К.В. Мамчур

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, г. Барнаул

*В статье рассматриваются термогазодинамические потери, вызывающие внутренний теплообмен в открытых адиабатных системах, который влияет на параметры рабочего тела в потоке, а также способствует возникновению режима течения при постоянной заторможенной температуре  $T^* = \text{Const}$  и появлению дополнительного термического сопротивления.*

**Ключевые слова:** изотермический, адиабатный, заторможенный, теплообмен, изоэнтропный, газодинамический, энтропия, абсолютная.

## THERMOGASODYNAMIC LOSSES IN THE OPEN ADIABATIC THERMODYNAMIC SYSTEM

A. A. Balashov, A.V. Kapishnikov, K.V. Mamchur

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul

*The article considers the thermo gas dynamic losses that cause internal heat exchange in open adiabatic systems, which affects the parameters of the working fluid in the flow, and also promotes the appearance of a flow regime at a constant retarded temperature  $T^* = \text{Const}$  and the appearance of additional thermal resistance.*

**Keywords:** isothermal, adiabatic, inhibited, heat exchange, isentropic, gas-dynamic, entropy, absolute.

Как известно, процесс расширения рабочего тела в закрытых и открытых термодинамических системах без внешнего теплообмена с окружающей средой при постоянной теплоемкости, называют адиабатическим.

Однако следует уточнить, что в открытых системах адиабатичность процесса расширения рабочего тела требует, как и обычно, только отсутствия внешнего теплообмена при постоянной теплоемкости, но при этом умалчивает о внутреннем теплообмене, возникающем из-за преобразования газодинамических потерь в теплоту, т.е. не ограничивается постоянством энтропии в потоке, поэтому адиабатичность и постоянство энтропии сосуществуют только в изоэнтропном процессе называемом еще идеальным-адиабатическим.

Газодинамические потери, вызывающие внутренний теплообмен в адиабатических открытых системах, оказывают влияние на параметры рабочего тела в потоке, т.е. способствуют возникновению режима течения при постоянной температуре заторможенного

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

Движущийся поток рабочего тела в открытой системе, как известно, характеризуется двумя абсолютными температурами:

- абсолютная термодинамическая (статическая) температура потока  $T$ ;
- абсолютная температура изоэнтропно-заторможенного потока  $T^*$ .

Температура  $T^*$  достигается при изоэнтропной трансформации кинетической энергии в энтальпию, т.е. температура  $T$  увеличивается на преобразованную по температуре скоростную составляющую.

Поскольку  $T^*$  больше  $T$  на конечную величину, то 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, поэтому снижается заторможен-

## ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ОТКРЫТОЙ АДИАБАТИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

ное давление  $P_2^*$  и увеличивается внутренняя энергия  $u_2$  отсчитываемая от и изэнтропного уровня  $u_T$ , и поэтому создается тепловое сопротивление [4].

В связи с этим без учета факторов, связанных с конечной скоростью движения рабочего тела, особенностью внутреннего теплообмена возникающего в 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 затратами работы на преодоление газодинамических сопротивлений, будет иметь место снижение заторможенного давления по потоку. Это обстоятельство скажется, прежде всего, на уменьшении скорости потока относительно теоретически достижимой  $W_T$ , которое приведет к появлению дополнительной теплоты [4], влияние которой проявится в том, что вместо теоретического адиабатного процесса будет рассматриваться действительный [5].

Однако упомянутое дополнительное термическое влияние газодинамических сопротивлений на скорость рабочего тела не исключает прямого механического воздействия их на скорость потока.

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, т.е. в адиабатном потоке изменение кинетической энергии должно определяться суммой двух работ

$$wdw = -\mathcal{G}dp - dl_r, \quad (1)$$

где  $w dw$  – изменение кинетической энергии потока;

$\mathcal{G}dp$  – располагаемая работа в адиабатном процессе расширения;

$dl_r$  – работа по преодолению газодинамических сопротивлений.

Располагаемая работа в адиабатном процессе расширения определится по выражению

$$l_{расп.} = \mathcal{G} dp = \frac{m}{m-1} \cdot R \cdot (T^* - T_2), \quad (2)$$

где  $l_{расп.}$  – располагаемая работа в адиабатном процессе;

$m$  – 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  $dq_{r.ат}$ , которое будет усвоено потоком и создаст основное механическое сопротивление, а также дополнительное термическое сопротивление.

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

$$m = \kappa - (\kappa - 1) \cdot \frac{\delta q_{r.ат}}{P \cdot d\mathcal{G}}, \quad (3)$$

откуда

$$\delta q_{r.ат} = \frac{\kappa - m}{\kappa - 1} P \cdot d\mathcal{G}, \quad (4)$$

где  $\kappa$  – показатель изэнтропного процесса расширения в открытой системе;

$\delta q_{r.ат}$  – элементарное количество теплоты в потоке возникающее из-за дополнительного преобразования газодинамических потерь;

$P \cdot d\mathcal{G}$  – работа расширения рабочего тела в открытой системе.

Кроме этого, элементарное количество теплоты  $\delta q_{r.ат}$  характеризующее термическое влияние газодинамических сопротивлений на параметры потока, можно определить и по другим равнозначным зависимостям представленным в работе [2]:

$$\delta q_{r.ат} = c_a \Delta T \quad \text{и} \quad \delta q_{r.ат} = c_p \Delta T_T, \quad (5)$$

где  $c_a = \xi_{ам} \cdot c_p$  – удельная теплоемкость адиабатного процесса;

$\xi_{ам}$  – коэффициент газодинамических потерь характеризующий механическое взаимодействие газодинамических сопротивлений с потоком;

$c_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении;

$\Delta T = T^* - T_2$  – перепад заторможенной и статической температуры на выходе адиабатного потока;

$\Delta T_T = T_2 - T_T$  – перепад статических температур в адиабатном потоке относительно изэнтропного уровня  $T_T$ .

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

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

– дополнительные потери, возникающие за счет преобразования газодинамических потерь в теплоту, характеризующую перепадом статических давлений  $\Delta P_T = P_2 - P_T$ , которая усваивается потоком и создает добавочное тепловое сопротивление.

Кроме этого необходимо добавить, что в этом же процессе адиабатного расширения в открытой системе присутствуют суммарные потери, как результат взаимодействия основных и дополнительных газодинамических потерь, но характеризующихся в этом случае температурными параметрами потока, в частности перепадом статических температур  $\Delta T_T = T_2 - T_T$ .

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

$\xi_\alpha$  – 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  $\xi_\alpha$  может быть представлен в виде суммы коэффициентов газодинамических потерь, полученных как при прямом механическом взаимодействии потока с сопротивлениями в канале  $\xi_{ам}$ , так и при косвенном термическом взаимодействии тех же сопротивлений с потоком рабочего тела  $\xi_{ат}$ . Он представляется зависимостью:

$$\xi_\alpha = \xi_{ам} + \xi_{ат}.$$

Перечисленные коэффициенты  $\xi_\alpha$ ,  $\xi_{ам}$ ,  $\xi_{ат}$  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 более детальный анализ зависимостей для определения коэффициентов  $\xi_\alpha$ ,  $\xi_{ам}$ ,  $\xi_{ат}$  приведен в [2, с. 58-66].

К сказанному необходимо добавить, что прямое механическое воздействие газодинамических сопротивлений на рабочее тело в открытой адиабатной системе, непосредственно скажется на снижении заторможенного давления и уменьшении внешней кинетической энергии (действительной скорости) в выходном сечении потока, косвенное термическое влияние – на увеличении внутренней энергии (характеризуемой температурой  $T_2$ ) и появлении дополнительного теплового сопротивления, а оба вместе – на общем характере адиабатного процесса расширения рабочего тела в открытой системе [5].

Таким образом, на диаграмме работы в координатах  $P-V$  представлен график (рисунок 1) адиабатного процесса расширения рабочего тела в открытой системе, который состоит из трех процессов в виде:

– из процесса при постоянной заторможенной температуре  $T^* = \text{Const}$  (точки  $1^*-2^*-3^*$ ), уравнение процесса –  $P_1^* \cdot \vartheta_1^* = P_2^* \cdot \vartheta_2^*$ ;

– адиабатного процесса расширения (точки  $1^*-2$  или  $1^*-3$ ) с показателем адиабаты  $m \neq 1$ , уравнение процесса –  $P_1^* \cdot \vartheta_1^{*m} = P_2 \cdot \vartheta_2^m$ ;

– изэнтропного процесса расширения (точки  $2^* - 2$  или  $3^* - 3$ ) с показателем изэнтропии  $k$ , уравнение процесса –  $P_2^* \cdot \vartheta_2^{*k} = P_2 \cdot \vartheta_2^k$ .

Изотермический процесс расширения рабочего тела представленный температурой  $T^* = \text{Const}$  и, кроме этого, перепадом заторможенных давлений  $\Delta P^* = P_1^* - P_2^*$ , 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 в выходном сечении потока  $P_2^*$  или  $P_3^*$  и возникновению режима течения  $1^*-2^*-3^*$  при  $T^* = \text{Const}$  (рисунок 1). В связи с этим, из-за того же перепада давлений  $\Delta P^*$  появляется внутренняя теплота, возникающая в потоке из-за преобразования газодинамических потерь, которая и усваивается

## ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ОТКРЫТОЙ АДИАБАТИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

ется рабочим телом. Помимо этого, тот же перепад  $\Delta P^*$  в изотермическом процессе расширения рабочего тела в открытой системе, характеризует еще и основную долю необратимой части газодинамических потерь в потоке.

Адиабатный процесс расширения рабочего тела характеризуется возникновением газодинамических потерь в открытой системе из-за взаимодействия газодинамических сопротивлений в канале с рабочим телом в потоке, показатель адиабаты  $m$  в процессе расширения может изменяться в зависимости от режима течения в диапазоне  $1 \leq m \leq \kappa$ .

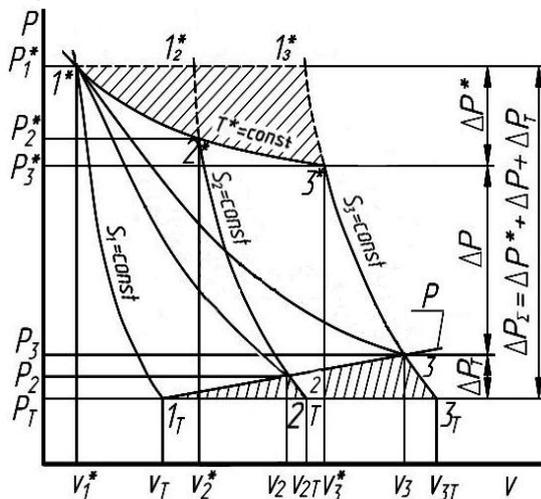


Рисунок 1 – Диаграмма  $P - V$  расширения рабочего тела в адиабатном потоке

Теоретический перепад абсолютных статических давлений  $\Delta P_T$  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 отрывных течений и вихреобразования в канале, в котором расположены газодинамические сопротивления, в результате чего возникает механическое взаимодействие сопротивлений в канале с потоком, что приводит к появлению механической работы  $\delta l_{r,am}$ . Работа  $\delta l_{r,am}$  трансформируется в теплоту  $\delta q_{r,am}$  и усваивается потоком, в связи с этим снижается заторможенное давление  $P_2^*$  в выходном сечении потока и увеличивается

внутренняя энергия  $u_2$ , характеризующаяся статической температурой  $T_2$ , т.е. происходит термическое взаимодействие газодинамических сопротивлений с потоком. Поэтому с увеличением перепада давлений  $\Delta P_T$  будет расти и результирующий коэффициент газодинамических потерь в адиабатном потоке  $\xi_a$ .

В заключении можно сказать, что при механическом взаимодействии газодинамических сопротивлений в канале с движущимся рабочим телом, возникают основные газодинамические потери, преобразование которых в теплоту, усваиваемую потоком, приводит к появлению дополнительного термического сопротивления, которое в меньшей степени, чем основные потери, все же снижает располагаемую работу и действительную скорость потока, увеличивая тем самым суммарные газодинамические потери.

### 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: учеб. пособие / А.А.Балашов; Алт. гос. тех. ун. им. И.И.Ползунова –Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2014 – 101 с.
3. Егоров, Я.А. Показатель процесса изменения параметров газа в потоке / Двигатели внутреннего сгорания -1982.- Вып. 35.-с.43-49.
4. Зысин, В.А. Техническая термодинамика потока / В.А. Зысин. – Изд-во Ленинград. ун-та, 1977. – 160 с.
5. Мамонтов, М.А. Некоторые случаи течения газа. / М.А. Мамонтов.- М. : Оборонпром, 1951.-490 с.
6. Рудой, Б.П. Газовая динамика ДВС / Б.П. Рудой. - Уфа : изд. УАИ им. Серго Орджоникидзе, 1983.-52с.
7. Теплотехника: учебник для вузов / В.Н. Луканин, М.Г.Шатров и др. : под ред. В.Н. Луканина.- 5-е изд. стер.-М.: Высшая школа, 2006.-671с.

**Балашов Андрей Алексеевич**, д.т.н., профессор, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, e-mail: aa\_balashov10@mail.ru;

**Капишников Артём Витальевич**, магистрант, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, +7-923-164-4446;

**Мамчур Константин Витальевич**, магистрант, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, e-mail: konstantin.mamchur@mail.ru