

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ТЕЛА В ОТКРЫТОЙ АДИАБАТНОЙ СИСТЕМЕ

А.А. Балашов, Б.Ю. Голев

Проведен краткий анализ адиабатного процесса расширения рабочего тела в открытой термодинамической системе с целью определения теплоемкости адиабатного процесса C_a , показателя адиабаты m и коэффициента газодинамических потерь ξ , в результате которого получены выражения для определения перечисленных параметров рабочего тела в адиабатном потоке.

Ключевые слова: теплоемкость, показатель адиабаты, показатель изоэнтропы, открытая система, термодинамический процесс, газодинамические потери, адиабатный процесс.

Основное условие равновесного адиабатного процесса расширения рабочего тела – это отсутствие внешнего теплообмена с окружающей средой, а дополнительное, но необходимое – это постоянство теплоемкости в процессе. К адиабатным процессам относят еще и те, которые протекают настолько быстро, что вследствие тепловой инерции системы изменение состояния рабочего тела, связанное с теплообменом, практически не наблюдается [3, 5].

Прежде всего, необходимо уточнить понятие адиабатичности термодинамического процесса в открытой системе, т.к. отсутствие внешнего теплообмена рабочего тела с окружающей средой в этом процессе, влечет за собой постоянство энтропии $S_1=S_2=const$, то есть автоматически накладываются условия изоэнтропности процесса, но это может быть только в закрытых термодинамических системах с идеальным или реальным рабочим телом, а также в открытых идеально – адиабатических системах [1, 5, 6]. Причем предположение, об изоэнтропности процесса с реальным рабочим телом в закрытой системе, основывается на допущении малости газодинамических потерь, пренебрегая которыми приходят к обоснованию этого предположения, то есть к $\Delta S=0$.

Однако об адиабатичности термодинамического процесса в открытой системе этого сказать нельзя, поскольку адиабатичность с изоэнтропностью может сочетаться только в идеально-адиабатическом процессе, так как расширяясь по идеальной адиабате энтропия газа остается неизменной, что и служит доказательством изоэнтропности [3, 5].

В реальном же адиабатном процессе расширения рабочего тела в открытой системе, присутствует еще и внутренний теплообмен (не упоминаемый в формулировке) появ-

ляющийся за счет выделения теплоты при преодолении потоком газодинамических сопротивлений. Поэтому, рассматривать адиабатические процессы расширения в закрытых и открытых системах при отсутствии внешнего теплообмена необходимо в следующих случаях:

– первый случай – закрытая адиабатическая система с идеальным или реальным рабочим телом, а также открытая система с идеальным рабочим телом, в которой процессы происходят без газодинамических потерь;

– второй случай – открытая адиабатическая система с реальным рабочим телом и газодинамическими потерями [1, 2].

Для описания процесса расширения газа в открытой термодинамической системе можно воспользоваться уравнениями первого закона термодинамики для адиабатного и изоэнтропного процессов расширения с учетом равенства заторможенных энтальпий на входе и выходе потока, а также уравнения состояния.

Газодинамические потери преобразованные в теплоту, вызывающие внутренний теплообмен в открытой адиабатной термодинамической системе, описываются известными дифференциальными уравнениями:

$$\delta q_r = C_v \cdot dT + P \cdot d\vartheta; \quad (1)$$

$$\delta q_r = C_p \cdot dT - \vartheta \cdot dP; \quad (2)$$

$$\delta q_r = C_a \cdot dT; \quad (3)$$

$$\delta q_r = T dS; \quad (4)$$

$$\delta q_r = \xi W \cdot dW, \quad (5)$$

где: q_r , ξ , C_p , C_v , C_a , P , T , ϑ , S , W – соответственно удельная теплота, коэффициент газодинамических потерь; удельные теплоемкости при постоянном давлении, объеме и адиабатного процесса; абсолютное давление

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ТЕЛА В ОТКРЫТОЙ АДИАБАТНОЙ СИСТЕМЕ

и температура; удельный объем, энтропия и скорость потока.

Совместное решение этих уравнений осуществляется с целью получения зависимостей для показателя адиабатного процесса расширения m , теплоемкости процесса C_a и коэффициента газодинамических потерь ξ для выяснения и анализа влияния внутреннего и внешнего теплообмена в открытой термодинамической системе.

Решая совместно (1) и (3), получим

$$C_a \cdot dT = C_v \cdot dT + P \cdot d\vartheta, \quad (6)$$

откуда $(C_a - C_v) \cdot dT = P \cdot d\vartheta. \quad (7)$

Решая совместно уравнения (2) и (3), получим

$$C_a \cdot dT = C_p \cdot dT - \vartheta \cdot dP, \quad (8)$$

откуда $(C_a - C_p) \cdot dT = -\vartheta \cdot dP. \quad (9)$

Разделив уравнение (9) на зависимость (7), будем иметь

$$\frac{C_a - C_p}{C_a - C_v} = -\frac{dP}{P} \cdot \frac{\vartheta}{d\vartheta}. \quad (10)$$

Обозначим $\frac{C_a - C_p}{C_a - C_v} = m, \quad (11)$

где: m – показатель адиабатного процесса в открытой системе [4].

Откуда после интегрирования выражения (10) с учетом показателя m будем иметь уравнение адиабатного процесса расширения в открытой термодинамической системе

$$P \cdot \vartheta^m = const. \quad (12)$$

Используя зависимость (11) и принимая во внимание, что $C_p = k \cdot C_v$, можно записать

$$C_a = C_p \cdot \frac{m - k}{k \cdot (m - 1)} \quad (13)$$

или $C_a = C_v \cdot \frac{m - k}{m - 1}. \quad (14)$

Далее решая совместно уравнения (3) и (5) с учетом (13), получим

$$\delta q_r = \frac{k - m}{k \cdot (m - 1)} W \cdot dW, \quad (15)$$

обозначим $\xi = \frac{k - m}{k \cdot (m - 1)}, \quad (16)$

откуда $m = \frac{k \cdot (\xi + 1)}{k \cdot \xi + 1}, \quad (17)$

где: ξ – коэффициент газодинамических потерь.

Подставив в зависимость (13) выражение из (16) для ξ , будем иметь теплоемкость адиабатного процесса

$$C_a = -\xi \cdot C_p. \quad (18)$$

Если осуществить другой подход к определению теплоемкости адиабатного процесса, то следует, прежде всего, рассмотреть работу

расширения в адиабатном потоке [7], которая может быть представлена выражением

$$P \cdot d\vartheta = \frac{k - 1}{k - m} \cdot \delta q_r, \quad (19)$$

а располагаемая работа

$$\vartheta \cdot dP = m \cdot P \cdot d\vartheta. \quad (20)$$

Подставив выражение (19) в зависимость (20) будем иметь

$$\vartheta \cdot dP = \frac{m \cdot (k - 1)}{k - m} \cdot \delta q_r. \quad (21)$$

Заменив в зависимости (21) показатель адиабаты m на его выражение (17) получим

$$\vartheta \cdot dP = \frac{\xi + 1}{\xi} \cdot \delta q_r. \quad (22)$$

Уравнение первого закона термодинамики с учетом (22) может быть записано как

$$\delta q_r = di + \frac{\xi + 1}{\xi} \cdot \delta q_r, \quad (23)$$

откуда $(1 - \frac{\xi + 1}{\xi}) \cdot \delta q_r = di$ или в

$$\text{конечном итоге } \delta q_r = -\xi \cdot di. \quad (24)$$

Если раскрыть зависимость (24) с учетом теплоемкости адиабатного процесса в открытой системе C_a согласно зависимости (3), то можем записать, что

$$C_a \cdot dT = -\xi \cdot C_p \cdot dT, \quad (25)$$

откуда получим зависимость эквивалентную выражению (6)

$$C_a = -\xi \cdot C_p. \quad (26)$$

Таким образом, другой подход к определению теплоемкости адиабатного процесса C_a в открытой термодинамической системе привел к тем же результатам.

Теплоемкость C_a в этом случае определяется с помощью коэффициента газодинамических потерь ξ , который может быть получен по выражению (16), но при его определении необходимо знать показатель адиабатного процесса расширения рабочего тела в открытой термодинамической системе m , который, в свою очередь, определяется из (12) в виде

$$m = \frac{\ln p_2 / p_1^*}{\ln \vartheta_1^* / \vartheta_2} \quad (27)$$

Подставив m из (27) в зависимость (16) с учетом равенства заторможенных энтальпий

$$i_1^* = i_2^* \quad (28)$$

и допущения $C_p = Const$, будем иметь

$$T_1^* = T_2^*, \quad (29)$$

и кроме этого, используя адиабатические зависимости для отношения статических и заторможенных температур и давлений, а также уравнение Клапейрона, получим выражение для коэффициента газодинамических потерь ξ , который определяется как отношение логарифмов заторможенных и статических давлений в потоке по следующей зависимости [1] $\xi = \ln \frac{P_2^*}{P_1^*} / \ln \frac{P_2}{P_2^*}$. (30)

Равнозначный коэффициент ξ можно определить и по выражению, которое учитывает разницу квадратов скоростей истечения через заторможенную T^* , статическую T_2 и теоретически достижимую температуру T_T

$$\xi = \frac{W_T^2 - W_D^2}{W_D^2} = \frac{T^* - T_T - T^* + T_2}{T^* - T_2} = \frac{\Delta T_T}{\Delta T}, \quad (31)$$

где: $\Delta T_T = T_2 - T_T$ – перепад абсолютных статических температур в выходном сечении адиабатного потока T_2 и теоретически достижимой в изэнтропном процессе T_T ;

$\Delta T = T^* - T_2$ – перепад абсолютных заторможенной T^* и статической температуры на выходе потока T_2 в адиабатном процессе.

С целью проверки и подтверждения правильности предпосылок и сделанных выводов, необходимо дополнительно выполнить анализ выражения для показателя адиабатного процесса расширения в открытой термодинамической системе m , которое представлено выражением (11). Подставив в (11) вместо C_a выражение (26), будем иметь:

$$m = \frac{C_a - C_p}{C_a - C_v} = \frac{-\xi \cdot C_p - C_p}{-\xi \cdot C_p - C_p / \kappa} = \frac{\kappa \cdot (\xi + 1)}{\kappa \cdot \xi + 1} \quad (32)$$

Полученная зависимость (32) эквивалентна выражению (17) по которому определяется равнозначный показатель адиабаты m .

Помимо этого следует сказать, что такая же зависимость была получена А. Стодола еще в 1924 году [8]. Он решил эту задачу для политропного процесса расширения рабочего тела в открытой системе с внешним и внутренним теплообменом с показателем процесса n , с целью определения доли кинетической энергии расходуемой на преодоление газодинамических сопротивлений.

В этой статье ставится такая же задача для адиабатного процесса расширения рабочего тела в открытой системе, но только с внутренним теплообменом и показателем процесса m , преследуя ту же цель что и в политропном процессе. Разница заключается в показателях адиабатного m и политропного

n процессов, которые характеризуют внутренних и суммарный теплообмен в потоке рабочего тела.

Для адиабатного процесса в открытой системе показатель процесса m будет равен:

$$m = \kappa - \kappa \cdot (\kappa - 1) \cdot \frac{\delta q_r}{p \cdot d\vartheta}, \quad (33)$$

где: δq_r – элементарное количество теплоты, образующееся в адиабатном потоке за счет преобразования газодинамических потерь (внутренний теплоприток);

$p \cdot d\vartheta$ – работа расширения рабочего тела в адиабатной открытой системе;

κ – показатель изэнтропного процесса расширения рабочего тела.

Для политропного процесса в открытой системе показатель процесса n будет равен

$$n = \kappa - \kappa \cdot (\kappa - 1) \cdot \frac{\delta q_r \pm \delta q_{внеш}}{P \cdot d\vartheta}, \quad (34)$$

где: $\delta q_{внеш}$ – количество внешней теплоты в политропном потоке, подведенное к нему или отведенное от него за счет других источников [7].

Суммарное количество теплоты в политропном процессе открытой системы складывается из теплоты, образующейся при преодолении рабочим телом газодинамических сопротивлений и теплоты, принудительно подведенной или отведенной от него в потоке, т. е.

$$\delta q_{\Sigma} = \delta q_r \pm \delta q_{внеш}$$

Ориентируясь на адиабатный процесс расширения газа в открытой системе с присутствием только внутреннего теплообмена, и добавив к нему внешний, можно записать условия политропного процесса расширения газа в открытой термодинамической системе без совершения внешней работы в потоке

$$\alpha_T \cdot i_1^* = i_2^*, \quad (35)$$

где: i_1^* – энтальпия заторможенного потока во входном сечении;

i_2^* – энтальпия заторможенного потока в выходном сечении;

α_T – коэффициент внешнего теплообмена в потоке, равный $\alpha_T = \frac{i_2^*}{i_1^*}$.

Анализируя выражение (35) можно сказать, что:

– при $\alpha_T = 1$, получится $i_1^* = i_2^*$, т.е. это выражение соответствует адиабатно-изэнтропному процессу расширения рабочего тела в открытой системе;

– при $\alpha_T > 1$ получится $i_2^* > i_1^*$, т.е. это выражение соответствует политропному процессу расширения рабочего тела в открытой

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ТЕЛА В ОТКРЫТОЙ АДИАБАТНОЙ СИСТЕМЕ

системе без внешней работы, но с внутренним и внешним подводом теплоты в потоке;

– при $\alpha_T < 1$ получится $i_2^* < i_1^*$,

т. е. это выражение характеризует политропный процесс расширения рабочего тела в открытой системе, но с внутренним подводом теплоты и с внешним ее отводом.

При рассмотрении этих случаев течения рабочего тела, при $\alpha_T = 1$, $\alpha_T > 1$ и $\alpha_T < 1$ (т. е. адиабатного и двух политропных), можно найти объединяющий их признак – это внутренний подвод теплоты за счет преобразования газодинамических потерь δq_T в потоке, который появляется вне зависимости от того какой термодинамический процесс в открытой системе реализуется, т.е. присутствует или отсутствует внешний подвод теплоты. Внешний отвод или подвод теплоты в политропном процессе расширения газа, по сравнению с адиабатным, может несколько изменить картину течения рабочего тела в потоке, так как из газодинамики известно, что подвод теплоты в дозвуковой области ($M < 1$) будет ускорять поток, а отвод теплоты в этой же области будет замедлять его.

Таким образом, можно констатировать, что как в адиабатных, так и в политропных потоках процессы расширения рабочего тела в открытых системах будут происходить с подводом внутренней теплоты, поэтому структура зависимости для определения показателей процессов m и n будет одной и той же, что в выражении А.Стодолы, что и в выражениях (32) или (17), только величины параметров входящие в эти зависимости будут несколько отличаться.

В результате проведенного анализа адиабатного процесса расширения рабочего тела в открытой термодинамической системе с целью определения теплоемкости C_a , показателя адиабаты m и коэффициента газодинамических потерь ξ можно констатировать, что удельная теплоемкость адиабатного процесса C_a в открытой термодинамической

системе может быть определена по выражениям (26) или (18), показатель адиабаты m может быть определен по равнозначным выражениям (32) или (17), а коэффициент газодинамических потерь ξ по равнозначным зависимостям (16), (30) или (31).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балашов, А. А. Газодинамические потери в адиабатных потоках поршневых двигателей [Текст] / А. А. Балашов // Ползуновский вестник. – 2007. – № 4. – С. 18–23.
2. Балашов, А. А. Изменение энтропии и газодинамических потерь в элементах системы газообмена поршневых ДВС [Текст] / А. А. Балашов, И. А. Карпов, Р. А. Вебер // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. Научный журнал. – 2008. – №1. – С. 202–204.
3. Вулис, Л. А. Термодинамика газовых потоков [Текст] / Л. А. Вулис. – Москва; Ленинград : Госэнергоиздат, 1950. – 305 с.
4. Егоров, Я. А. Показатель процесса изменения параметров газа в потоке [Текст] / Я. А. Егоров // Двигатели внутреннего сгорания. – 1982. – Вып. 35. – С. 43–49.
5. Жуковский, В. С. Термодинамика [Текст] / В. С. Жуковский ; под ред. А. А. Гухмана. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 304 с.
6. Зысин, В. А. Техническая термодинамика потока [Текст] / В. А. Зысин. – Изд-во Ленинград. ун-та, 1977. – 160 с.
7. Мамонтов, М. А. Некоторые случаи течения газа по трубам, насадкам и проточным сосудам [Текст] / М. А. Мамонтов.– Москва: Оборон-пром, 1951. – 490 с.
8. Stodola, A. Dampf-und Gasturbenen. 6 Aufl., Berlin, Springer, 1924. – 1109 S.

Балашов А.А., доктор техн. наук, доцент, раб. тел. (3852)-36-75-86, сот. 8-909-502-5180, aa_balashov10@mail.ru – Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова.

Голев Б.Ю., кандидат техн. наук, раб. тел. (4922)–53-87-36, сот. 8-910-771-1702, boris_golev@mail.ru – Общество с ограниченной ответственностью “Завод инновационных продуктов «Концерн тракторные заводы»”, г. Владимир.