

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И АНАЛИЗА РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ АДИАБАТНОГО ПОТОКА

А.А. Балашов, Г.В. Пыжанкин

Представлены зависимости газодинамических потерь от различных параметров потока с разделением их на механическое и термическое воздействие на сопротивление в каналах.

Article presents the dependence gas-dynamic losses on various parameters of stream with division into mechanical and thermal force to resistance in the canals.

В приложение к открытым термодинамическим системам, т. е. потоку рабочего тела, термодинамика вынуждена рассматривать одномерные течения. В этом отношении она в значительной степени приближена к газовой динамике, так как области их применения, по-видимому, нужно разграничивать характером рассматриваемых воздействий. При этом необходимо отметить, что в газовой динамике наибольшее значение имеет изоэнтропный или идеально – адиабатный процесс расширения рабочего тела в потоке [1], который предполагает отсутствие, как внешнего теплового воздействия, так и работы сил, затрачиваемых на преодоление газодинамических сопротивлений. В термодинамике потока рабочего тела этот процесс рассматривается как идеализированный базовый процесс, с которым сопоставляются в дальнейшем адиабатный и политропный процессы расширения рабочего тела в открытых системах при определении газодинамических потерь.

Однако, в этом случае, необходимо учитывать, что законы, которым подчиняются газы, а также термодинамические процессы, по которым они развиваются, настолько сложны, что для их аналитического выражения некоторые авторы, в ряде случаев, вводят достаточно произвольные допущения, которые приводят к неверным результатам. Так, в качестве одной из основных зависимостей при определении располагаемой работы или скорости истечения в термодинамике и в газодинамике потока, широко используется формула Сен-Венана и Вантцеля, полученная для изоэнтропного процесса с помощью интегрирования зависимости для приращения внешней кинетической энергии рабочего тела. Формальное использование этой формулы для определения критического отношения

давлений в канале приводит к грубым ошибкам, так как на самом деле зависимость, полученная для этой цели из формулы Сен-Венана и Вантцеля, свидетельствует о том, что критическое отношение давлений зависит только от природы газа, т. е. определяется без учета влияния газодинамических потерь.

На необходимость учитывать влияние газодинамических потерь при определении критического отношения давлений указывают как теория, так и опытные исследования ряда авторов [2]. Попытка же учесть это влияние путем слабо аргументированной замены показателя изоэнтропы k на показатель адиабаты m в открытой системе приводит к увеличению ошибки, ибо на самом деле, как известно, с увеличением газодинамических сопротивлений показатель адиабаты m в потоке из-за внутреннего теплопритока в газ уменьшается, а также уменьшается и величина критического отношения давлений. Поэтому замена k на m в упомянутой формуле приводит к обратным результатам. Так, при $m = k$ критическое отношение давлений для воздуха, как известно, равно 0,529, а при $m = 1$ оно увеличивается до 0,603. Поэтому метод замены показателя изоэнтропы k на показатель адиабаты m в открытой термодинамической системе в формуле Сен-Венана и Вантцеля не только не приближает расчетную зависимость к опыту, но приводит к обратным результатам – к увеличению ошибки при определении критического отношения давлений.

Следует также отметить, что в вопросе о выборе показателя адиабаты для открытых термодинамических систем до сих пор нет единой точки зрения. Некоторые авторы рекомендуют принимать $m = 1,05$, а другие – $m = 1,25 \div 1,35$ [1].

Как известно из уравнения энергии для открытых адиабатных систем, газодинамические сопротивления, введенные в поток, оказывают двойное влияние на течение газа. Из этого уравнения следует, что удельная работа, затрачиваемая на преодоление газодинамических сопротивлений δl_r , влияет на изменение внешней кинетической энергии газа, т. е. оказывает непосредственное механическое влияние на действительную скорость газа в выходном сечении потока. Из другого уравнения можно установить, что изменение полной энергии газа в потоке определяется не только механическим влиянием газодинамических сопротивлений на течение газа через работу δl_r , но также и термическим влиянием сопротивлений в канале, благодаря выделяющемуся удельному количеству теплоты δq_r , которое воспринимается и усваивается текущим газом [2]. Механическое влияние газодинамических потерь скажется непосредственно на величине внешней кинетической энергии, термическое влияние – на изменении внутренней энергии, а оба вместе – на характере термодинамического процесса.

Большое значение имеют вопросы, связанные с определением коэффициента расхода μ и коэффициента газодинамических потерь ξ . Известно, что почти все авторы исходят из того, что коэффициент расхода μ термодинамической системы – величина, не зависящая от отношения давлений. Это способствовало тому, что в общем случае неверно выражается зависимость между расходом газа и отношением давлений. В связи с этим необходимо выполнить анализ различных условий движения газа и дать обоснованные зависимости, как для коэффициента газодинамических потерь ξ , так и для коэффициента расхода μ .

Все безразмерные коэффициенты, параметры и показатели термодинамического процесса, характеризующие с разных сторон открытую систему, не обладают одним свойством, очень необходимым при анализе потока на отдельных участках термодинамической системы – свойством аддитивности.

Свойством аддитивности обладает, как известно, параметр состояния, называемый энтропией S . Как правило, в технической термодинамике необходимо знать приращение энтропии ΔS , а не саму энтропию.

С целью определения ΔS желательно получить формулу, которая бы отражала зависимость приращения энтропии от безразмерных параметров потока, таких как безразмерная скорость, характеризующая критерием Маха M , и газодинамических потерь, характеризующих коэффициентом ξ . Используя свойство аддитивности энтропии, можно выделять в общей проточной системе характерные участки и определять параметры потока отдельно для каждого из них.

Не менее важным является вопрос об определении параметров состояния рабочего тела, показателя процесса расширения, а также безразмерных коэффициентов, характеризующих течение в открытой системе в политропном процессе, так как этот процесс описывает течение с внешним теплообменом, т. е. реальный процесс. На основании выше изложенного можно сказать, что прежде всего, необходимо рассмотреть адиабатный термодинамический процесс, который протекает в открытой системе без совершения внешней работы.

При определении и оценке газодинамических потерь в основных элементах газоздушных трактов поршневых ДВС (впускные и выпускные каналы с клапанами, продувочные и выпускные окна и др.) как правило (как уже упоминалось) используют коэффициенты газодинамических потерь ξ и расхода μ , а также изменение энтропии ΔS .

Коэффициент газодинамических потерь в адиабатном потоке может быть определен по нескольким равнозначным зависимостям [3]:

$$\xi = \frac{k-m}{k \cdot (m-1)} = \frac{1}{\varphi^2} - 1 = \frac{\Delta T_r}{\Delta T} = \frac{\ln \frac{P_1^*}{P_2^*}}{\ln \frac{P_2^*}{P_2}} =$$

$$= \frac{2}{(k-1) \cdot M^2} \cdot \left(1 - \frac{1}{\Delta S / C_p}\right), \quad (1)$$

изменение энтропии по выражениям:

$$\Delta S = C_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = R \cdot \left(\ln \frac{P_1^*}{P_2^*} + \ln \frac{P_2}{P_1} \right) =$$

$$C_p \cdot \ln \left[\frac{2}{2 - \varepsilon \cdot M^2 (k-1)} \right], \quad (2)$$

а коэффициент расхода по формуле:

$$\mu = \varphi \cdot \sigma \cdot e^{\Delta S / k \cdot R}, \quad (3)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И АНАЛИЗА РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ АДИАБАТНОГО ПОТОКА

где k, m, φ, σ – соответственно показатели изотропного и адиабатного процессов расширения газа в потоке; коэффициент скорости; коэффициент восстановления полного давления; P_1^*, P_2^*, P_2 – абсолютные заторможенные и статические давления в адиабатном потоке в сечениях 1-1 и 2-2; P_T, T_T – теоретически достижимые статическое давление и статическая температура в изотропном процессе расширения газа в потоке; R, C_p – газовая постоянная и удельная теплоемкость при постоянном давлении; M и e – число Маха и основание натуральных логарифмов.

Анализируя представленные зависимости, для ξ, M и ΔS следует сказать, что коэффициенты ξ и M можно определить как по температурным параметрам, так и параметрам давления в потоке. Для изменения энтропии ΔS , которую можно также определить с учётом температур и давлений в потоке (2), можно выделить выражение, которое показывает на суммарное воздействие на ΔS различных способов, а именно:

$$\Delta S = R \cdot \ln \frac{P_1^*}{P_2^*} + R \cdot \ln \frac{P_2}{P_T}. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что измерение энтропии ΔS в адиабатном потоке (как было упомянуто выше) складывается из двух составляющих [2, 3]:

- первая составляющая в правой части выражения свидетельствует о том, что газодинамические сопротивления, находящиеся в проточном канале, механически воздействуют на поток, снижая заторможенное давление P_2^* относительно P_1^* ;

- вторая составляющая свидетельствует о термическом воздействии на поток из-за преобразования газодинамических потерь в теплоту образовавшуюся за счёт механического воздействия тех же аэродинамических сопротивлений в канале, увеличивая тем самым статическое давление в адиабатном потоке P_2 относительно изотропного уровня P_T .

Таким образом, выражение (4) можно переписать:

- обозначив ΔS через ΔS_a – изменение энтропии в адиабатном потоке;
- первый член правой части обозначить через

$$\Delta S_{am} = R \cdot \ln \frac{P_1^*}{P_2^*}, \quad (5)$$

где ΔS_{am} – изменение энтропии за счёт механического воздействия на поток газодинамических сопротивлений;

– второй член зависимости правой части обозначить через

$$\Delta S_{at} = R \cdot \ln \frac{P_2}{P_T}, \quad (6)$$

где ΔS_{at} – изменение энтропии за счёт термического воздействия газодинамических сопротивлений на поток.

В итоге получаем, что при адиабатном процессе расширение газа в открытой системе:

$$\Delta S_a = \Delta S_{am} + \Delta S_{at}. \quad (7)$$

Разделив правую и левую части выражения (4) на $R \cdot \ln \frac{P_1^*}{P_2^*}$, будем иметь:

$$\frac{\Delta S_a}{R \cdot \ln \frac{P_1^*}{P_2^*}} = \frac{\ln \frac{P_2^*}{P_2}}{\ln \frac{P_1^*}{P_2^*}} + \frac{\ln \frac{P_2}{P_T}}{\ln \frac{P_1^*}{P_2^*}}. \quad (8)$$

Анализируя выражение (8) можно сказать, что первый член в правой части этой зависимости есть не что иное, как коэффициент газодинамических потерь, приведенный в выражении (1), а именно [4]:

$$\xi = \frac{\ln \frac{P_2^*}{P_2}}{\ln \frac{P_1^*}{P_2^*}}. \quad (9)$$

Тогда по аналогии с формулой (5) можно сказать, что коэффициент « ξ » в выражении (9) есть коэффициент газодинамических потерь возникающий от механического воздействия газодинамических сопротивлений в канале ξ_{am} . То же самое можно сказать и о втором члене правой части выражения (8), что это будет коэффициент газодинамических потерь от термического воздействия сопротивлений в канале на поток, т.е.

$$\xi_{at} = \frac{\ln \frac{P_2}{P_T}}{\ln \frac{P_1^*}{P_2^*}}. \quad (10)$$

И, соответственно, суммарный коэффициент газодинамических потерь от механического и термического воздействий сопротивлений на поток в этом случае можно определить из выражения (8)

$$\xi_a = \frac{\Delta S_a}{R \cdot \ln \frac{P_1^*}{P_2^*}}. \quad (11)$$

В итоге получим, что в адиабатном потоке

$$\xi_a = \xi_{am} + \xi_{am}. \quad (12)$$

Таким образом, определяя коэффициент газодинамических потерь по выражению (9)

$$\xi_{am} = \frac{\ln P_1^* / P_T}{\ln P_2^* / P_2}. \quad (13)$$

мы определяем только коэффициент ξ_{am} , а термическую добавку ξ_{am} в этом случае не учитываем.

Подтверждение этому можно найти, анализируя графики, представленные на рисунках 1 и 2. На этих графиках приведено изменение статических и заторможенных параметров адиабатного потока воздуха в зависимости от изменения энтропии, а также изменение потерь и расхода от безразмерного комплекса $\xi \cdot M^2$ [1].

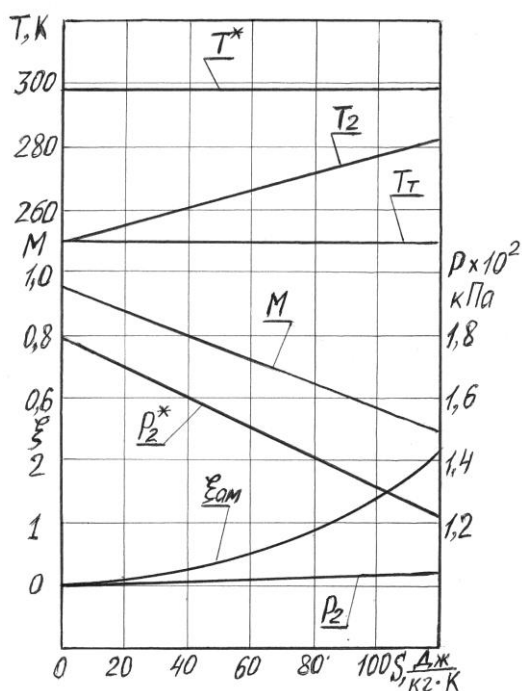


Рисунок 1 – Изменение параметров потока от энтропии ξ

Увеличение коэффициента газодинамических потерь ξ и энтропии S приводит к достаточно резкому снижению заторможенных давлений на выходе потока P_2^* и M , характеризующего безразмерную скорость в выходном сечении, при постоянных затормо-

женных давлений P_1^* и температуре T^* на входе потока (рис.1). Снижение P_2^* и числа Маха M характеризует механическое воздействие газодинамических сопротивлений, находящихся в проточных каналах, на параметры потока. Чем это снижение будет резче, тем больше будут газодинамические потери. Кроме этого проявление механического воздействия газодинамических сопротивлений на параметры движущегося рабочего тела выражается ещё и в увеличении статических температуры T_2 и давления P_2 относительно изэнтропного уровня T_T и P_T , что и приводит к появлению некоторого количества теплоты в потоке из-за преобразования газодинамических потерь. Чем выше будут статические температура T_2 и давление P_2 на выходе потока, тем большее количество аэродинамических сопротивлений будет участвовать в создании газодинамических потерь (рис. 1).

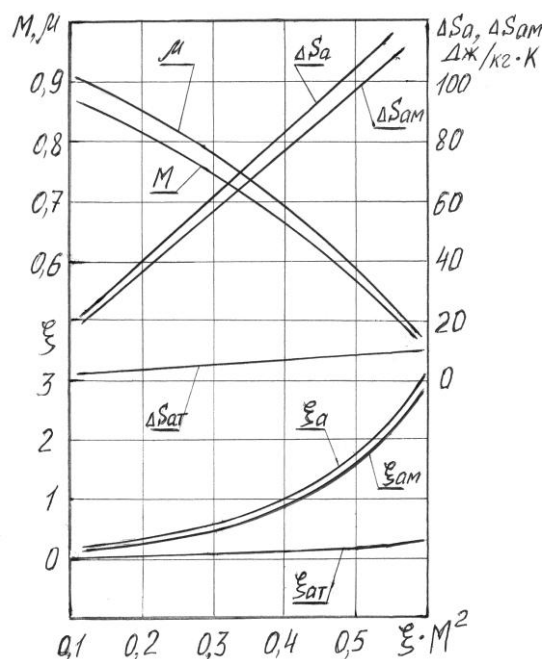


Рисунок 2 – Изменение параметров потока от безразмерного комплекса $\xi \cdot M^2$

Увеличение безразмерного комплекса $\xi \cdot M^2$ приводит к увеличению газодинамических потерь, характеризуемых коэффициентом ξ , и снижению безразмерной скорости на выходе потока характеризуемой числом Маха M , это и определяет более существен-

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И АНАЛИЗА РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ АДИАБАТНОГО ПОТОКА

ное влияние газодинамических потерь по сравнению с безразмерной скоростью характеризующей кинетическую составляющую потока (рис. 2).

Тоже самое можно сказать и об изменении коэффициентов газодинамических потерь.

Следует заметить, что все зависимости, по которым можно определить изменение энтропии и газодинамические потери, как в термодинамике, так и в газодинамике учитывают только механическое влияние сопротивлений в канале на поток, т.е. $\Delta S_{ам}$ и $\Delta \xi_{ам}$.

Суммарные газодинамические потери, характеризующиеся коэффициентом ξ_a , а также изменение энтропии $\Delta S_{ат}$ и коэффициента $\xi_{ат}$, характеризующих газодинамические потери от термического воздействия на параметры потока, по существующим зависимостям не определяются.

Использование $\Delta S_{ам}$ и $\xi_{ам}$ приводит к тому, что результаты расчётов занижаются, т.к. $\Delta S_a > \Delta S_{ам}$ и $\xi_a > \xi_{ам}$ на величину тер-

мического воздействия газодинамических сопротивлений на параметры потока (рис.2). Хотя ΔS_a можно определить через температурные параметры потока. Поэтому для полного учёта газодинамических потерь в адиабатном потоке необходимо в дальнейшем использовать вышеупомянутые зависимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров, Я. А. Показатель процесса изменения параметров газа в потоке / Я.А. Егоров // Двигатели внутреннего сгорания. – 1982. – Вып. 35. – С. 43-49.
2. Мамонтов, М. А. Некоторые случаи течения газа по трубам, насадкам и проточным сосудам / М.А. Мамонтов. – М.: Оборонгиз, 1951. – С. 28-60.
3. Балашов, А. А. Совершенствование расходных характеристик газоздушных трактов поршневых двигателей внутреннего сгорания: дис. ... докт. техн. наук / А.А.Балашов – Барнаул, 2008. – 395 с.
4. Балашов, А. А. Характер изменения энтропии и коэффициентов расхода в каналах газоздушных трактов поршневых ДВС/ А.А. Балашов, Р.А. Вебер, И.А. Карпов // Ползуновский вестник. – 2008. – №4. – С.63-68.