

ОБЩАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВНУТРЕННЕ НЕОБРАТИМЫХ ПРОЦЕССОВ

Г. И. ФУКС

1

Обратимый процесс расширения от начального состояния (p_1, T_1) изображен в T - S -диаграмме линией $1-2_0$ (рис. 1). Подведенная теплота q , внешняя работа l_0 и изменение параметров состояния связаны соотношением

$$q = i_{2_0} - i_1 + l_0. \quad (1)$$

Наличие внутренней необратимости (трение, неравновесность рабочего тела и прочее) при том же подводе тепла q даст получение работы $l_n < l_0$. При этом

$$q = i_{2_n} - i_1 + l_n, \quad (2)$$

где

$i_{2_n} > i_{2_0}$ — энтальпия рабочего тела в конце необратимого процесса.

Почленное вычитание (2) из (1) дает потерю работы от необратимости

$$\Delta' l_n = l_0 - l_n = i_{2_n} - i_{2_0}. \quad (3)$$

Если на основе эксперимента или расчетным путем найдено значение $\Delta' l_n$, то по этому соотношению находится работа реального процесса l_n и значения параметров состояния в конце процесса. Сделаем теперь предположение, что необратимый процесс протекает настолько медленно, что его можно считать равновесным. Для этого процесса подведенная к рабочему телу теплота q' и внешняя работа l' будут связаны соотношением

$$q' = i_{2_n} - i_1 + l'. \quad (4)$$

Почленное вычитание (2) из (4) даст количество теплоты, выделяющейся от необратимости

$$\Delta q_n = q' - q = l' - l_n. \quad (5)$$

Если величина Δq_n известна из опыта или подсчитана, то по этому соотношению вычисляются значения q и l_n . Величины $\Delta' l_n$ и Δq_n не равны друг другу. Как видно из рис. 1, величина Δq_n измеряется суммой площадок $\alpha \sim \text{пл. } 1-2_n-2_0-1$ и $\beta \sim \text{пл. } 2_0-2_n-b-a-2_0$. Величина $\Delta' l_n$ в соответствии с (3) — площадью β .

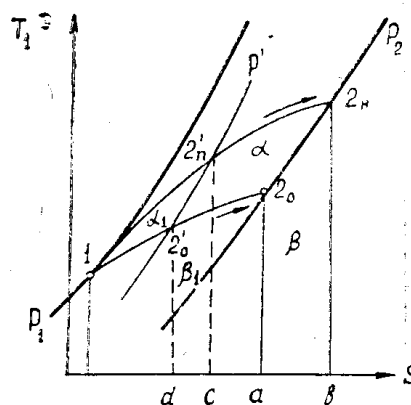


Рис. 1.

Если задана закономерность потери работы от необратимости в функции от давления рабочего тела $\Delta' l_n = f(p)$, то можно найти для любого промежуточного давления p' значение $\Delta' l_n$. Тогда для этого давления $i'_{2n} = i'_{2o} + \Delta' l_n$. Это даст возможность найти значение i'_{2n} . Таким образом можно найти ряд точек линии $1-2_n$, а затем значения α и β . Таким образом определяется тепловыделение от необратимости реального процесса

$$\Delta q_n = \alpha + \beta.$$

Вместо абсолютных значений можно использовать для расчета относительные величины

$$\frac{\Delta' l_n}{l_o}, 1 - \frac{\Delta' l_n}{l_o}, \frac{\Delta q_n}{q'}, 1 - \frac{\Delta q_n}{q'}.$$

Расчеты особенно просто проводить по $i-s$ -диаграмме, в которой значения β будут измеряться отрезками по оси ординат.

2

Обратимый процесс сжатия рабочего тела от давления p_1 до $p_2 > p_1$ изображен на рис. 2 в $T-s$ -диаграмме. Подведенная к рабочему телу теплота q и работа l_0 связаны соотношением (1). Но в этом случае работа затрачивается, $l_0 < 0$.

Удобнее использование соотношения

$$(-l_o) = i_{2o} - i_1 - q, \quad (6)$$

где $(-l_o) > 0$, т. е. затрачиваемая работа дается положительным числом. При наличии внутренней необратимости затрачиваемая работа $(-l_n) > (-l_o)$. При этом

$$(-l_n) = i_{2n} - i_1 - q. \quad (7)$$

Почленное вычитание (6) из (7) дает добавочное значение затрачиваемой от необратимости работы

$$\Delta l_n = (-l_n) - (-l_o) = i_{2n} - i_{2o}. \quad (8)$$

Если реальный необратимый процесс протекает достаточно медленно, то его можно

считать равновесным. Подведенное тепло q' будет измеряться площадью $1-2_n-b-a-1$. В обратимом процессе $1-2_o$ подведенная теплота q измеряется площадью $1-2_o-c-d-1$. Разность их, измеряемая площадью треугольника $d-2_o-2_n = \alpha$, дает избыточно подведенное тепло в необратимом процессе сжатия

$$\Delta q_n = p' - q. \quad (9)$$

Для процесса $1-2_n$

$$(-l') = i_{2n} - i_1 - q'. \quad (10)$$

Почленное вычитание (10) из (7) с учетом (9) дает

$$(-l_n) - (-l') = \Delta q_n. \quad (11)$$

Если, кроме исходного процесса $1-2_o$, задана потеря работы от необратимости $\Delta'(l_n)$, то из (8) находятся величины $(-l_n)$ и i_{2n} . Если

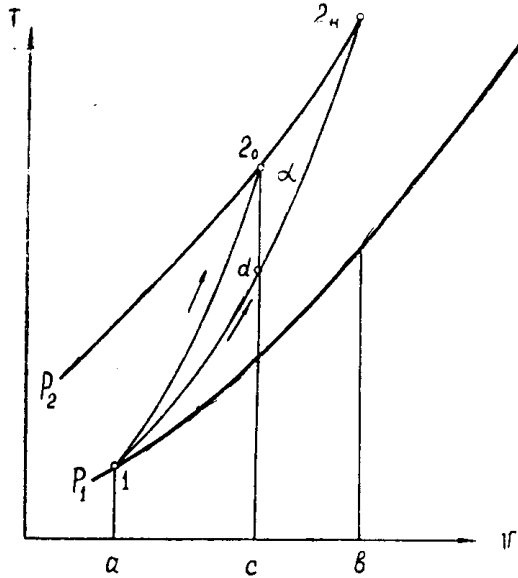


Рис. 2.

же необратимый процесс сжатия считается равновесным, то это равносильно задаче линии 1—2_n. Считая, кроме того, известной величину тепловыделения от необратимости Δq_n , из (9) определяется подводимая от внешних источников теплота

$$q = q' - \Delta q_n, \quad (12)$$

а из (11) затрата работы в необратимом процессе

$$(-l_n) = (-l') + \Delta q_n. \quad (13)$$

Сопоставление выражений (3) и (8) указывает, что влияние необратимости в необратимых процессах расширения и сжатия различно. В процессах расширения вследствие необратимости получается меньше работы, чем в обратимом процессе. При сжатии необратимость реального процесса приводит к увеличению затрачиваемой работы. Возможен предельный случай необратимого процесса расширения, при котором работа его будет равна нулю, что соответствует условию

$$i_{2n} - i_{2o} = l_o.$$

В процессах необратимого сжатия увеличение необратимости может происходить безгранично, сопровождаясь соответственным увеличением затраты работы. Это объясняется тем, что во всех необратимых процессах имеет место одностороннее превращение работы в теплоту.

В заключение отметим, что указанные выше приемы расчета могут быть использованы также для расчета работы необратимых процессов W_n (без учета работы наполнения и выталкивания). Для этого во всех написанных выше расчетных соотношениях следует заменить величины энтальпии i на соответственные значения внутренних энергий рабочего тела u , а при расчетах по диаграммам пользоваться линиями постоянных объемов.

3

В работе [1] приводится методика расчета необратимых процессов идеального газа, считая процесс равновесным. Для расчета используют отношение получаемого при расширении газа работы к сумме этой же величины с работой, затраченной на преодоление сил трения. Одновременно вводится второй коэффициент, равный сумме подведенного тепла к сумме этого тепла с теплом, выделяющимся при трении. С помощью этих двух показателей равновесный реальный процесс газ с трением приводится к некоторому условному политропическому процессу. Этот прием не может считаться общим. Действительно, в дальнейшем при рассмотрении необратимых процессов паров этот прием не используется.

Некоторые частные случаи расчета необратимых процессов имеются в [2]. В обоих указанных работах возбуждает сомнение рассмотрение необратимого изохорного процесса. Внутренняя необратимость может иметь место лишь при взаимопревращении тепла и работы. В изохорном процессе тепло затрачивается только на изменение внутренней энергии рабочего тела. Это особенно четко ясно из [2], где в качестве необратимого изохорного процесса рассматривается процесс расширения в пустоту. Рассмотрение необратимых политропических процессов идеального газа приведено также в [3] и [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Андрущенко. Основы технической термодинамики реальных газов. «Вышая школа», 1967.
2. М. П. Вукалович, И. И. Новиков. Техническая термодинамика, «Энергия», 1968.
3. В. Траупель. Тепловые турбомашины, Т. 1, ГЭИ, 1961.
4. А. В. Лапшин. Расчеты необратимых политропных процессов. Изв. вузов, «Энергетика», 1966, № 4.