

УДК 621.165.51

Скляров В.П.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО ПАРА ПРИ НЕРАВНОВЕСНОМ РАСШИРЕНИИ В ПАРОВЫХ ТУРБИНАХ

Вопрос определения КПД влажнопаровых ступеней турбин связан, помимо всего прочего, с точностью определения основных термодинамических параметров влажного пара (давления  $P$ , термодинамической температуры  $T$ , степени сухости  $x$ , удельного объема).

За последней ступенью турбины пар может находиться в одном из трех состояний:

- перегретом;
- насыщенном;
- переохлажденном.

Перегретый пар характеризуется повышенной температурой относительно температуры насыщения. Влажность такого пара равна нулю.

Насыщенный пар имеет температуру, равную температуре насыщения, а его влажность равна или близка к диаграммной.

Температура переохлажденного пара всегда ниже температуры насыщения, а влажность либо равна нулю (полное переохлаждение), либо значительно ниже диаграммной (частичное переохлаждение). По мере нарастания переохлаждения, в паровом потоке всегда образуется некоторое количество влаги, однако, теплоты, выделяющейся при этом, не достаточно, чтобы нагреть пар до температуры насыщения. Как правило, при расширении в проточной части турбины до возникновения спонтанной конденсации влажность пара остается близкой к нулю [1]. Поэтому состояние частичного переохлаждения в проточной части турбины можно рассматривать как переходное, существующее в течение очень короткого времени при скачке конденсации, когда влажность возрастает от нуля до, практически, диаграммной. В данной работе рассматривается только случай полностью переохлажденного пара.

Для построения процесса расширения пара в  $i,S$ -диаграмме необходимо знать значения энтальпии  $i''$  и энтропии  $S$  в конечной точке процесса.

Если в зоне перегретого пара достаточно определить только температуру пара и давление, то в зоне ниже линии насыщения в случае равновесного процесса расширения необходимо знать еще степень сухости (или влажность) пара. В случае неравновесного расширения (расширения с переохлаждением) для построения процесса в  $i,S$ -диаграмме необходимо знать значения энтальпии и энтропии пара в метастабильном состоянии ( $i''_m, S_m$ ).

Реальные процессы расширения в проточной части турбины вблизи линии насыщения, как правило, протекают с переохлаждением [1,2]. Поэтому важно уметь определять термодинамические параметры переохлажденного пара. Величина переохлаждения пара в проточной части турбины может достигать 35 °С. Переохлаждение пара может сохраняться и за последней ступенью турбины, достигая 10–15 °С [3]. Степень сухости переохлажденного пара остается равной единице вплоть до возникновения спонтанной конденсации. Благодаря этому обстоятельству можно рассчитать значения энтальпии и энтропии переохлажденного пара.

Однако, для этого необходимо знать значения теплоты фазового перехода для переохлажденного пара. В таблицах теплофизических свойств воды и водяного пара [4,5] приведены значения теплоты испарения (фазового перехода) только на линии насыщения.

Поскольку давление переохлажденного пара выше, чем давление насыщенного пара при температуре, соответствующей переохлажденному пару, то значения теплоты фазового перехода для насыщенного и переохлажденного пара при одной и той же температуре будут различны.

Например, давление насыщенного пара при температуре  $20^{\circ}\text{C}$   $P_s \approx 2,3$  кПа (удельный объем  $v'' = 57,833$  м<sup>3</sup>/кг), а давление пара, переохлажденного на  $35^{\circ}\text{C}$  и имеющего такую же температуру ( $20^{\circ}\text{C}$ ), соответственно равно  $P_m \approx 15,7$  кПа, т.е. в  $\approx 7$  раз больше (удельный объем  $v'' = 8,532$  м<sup>3</sup>/кг). Измерить значение теплоты фазового перехода переохлажденного пара не представляется возможным. Из всех необходимых параметров можно измерить только давление пара и его температуру [3]. Рассмотрим каким образом, измерив давление и температуру пара, можно определить значение теплоты фазового перехода переохлажденного пара расчетным путем.

Теплота фазового перехода насыщенного пара

$$r = i_s'' - i',$$

где  $i_s''$  – энтальпия насыщенного пара при давлении насыщения  $P_s$  (табличное значение);  $i'$  – энтальпия воды, нагретой до температуры насыщения;

Аналогично, теплота фазового перехода переохлажденного пара

$$r_m = i_{sm}'' - i_{tm}', \quad (1)$$

где  $i_{sm}''$  – энтальпия переохлажденного пара;  $i_{tm}'$  – энтальпия воды, нагретой до температуры переохлажденного пара.

Для пояснения формулы (1) рассмотрим процесс получения переохлажденного пара, показанный на рисунке 1. При нагреве воды от  $0^{\circ}\text{C}$  до температуры  $t_s$  (точка 1) ее энтальпия  $i_s' = c_p' \cdot t_s$ , где  $c_p'$  – средняя теплоемкость воды в интервале температур  $0^{\circ}\text{C} - t_s$ . При достижении температуры  $t_s$  вода испаряется, в результате чего образуется сухой насыщенный пар, а энтальпия увеличивается на величину теплоты испарения –  $r_s$  (точка 2), т.е. энтальпию сухого насыщенного пара можно записать как

$$i_s'' = i_s' + r_s.$$

Если понизить температуру пара до  $t_m$ , но так, чтобы конденсация не происходила и пар оставался сухим (точка 3), его энтальпия уменьшится на величину  $\Delta i''$

$$\Delta i'' = c_{pm} (t_s - t_m),$$

где  $c_{pm}$  – средняя теплоемкость пара в интервале температур  $t_s - t_m$ .

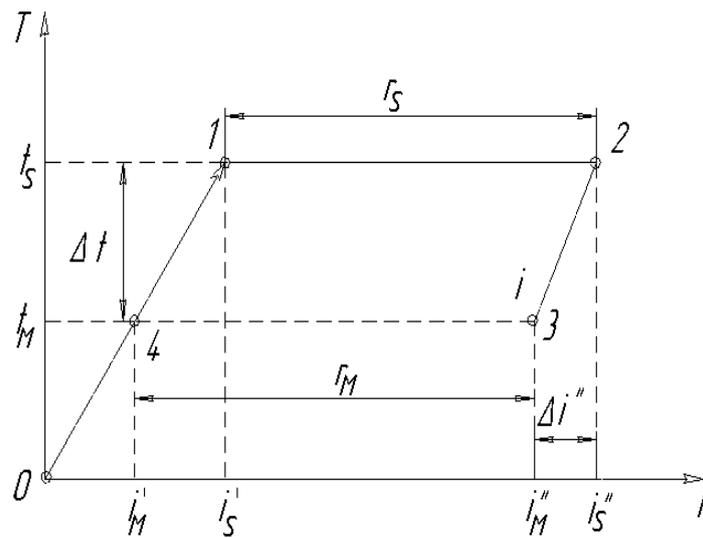


Рисунок 1 – Процесс получения переохлажденного пара

Таким образом, в точке 3 имеем переохлажденный пар, энтальпия которого

$$i_m'' = i_s'' - \Delta i''$$

или

$$i_m'' = i_s'' - c_{pM}(t_s - t_m). \quad (2-a)$$

Проведем мысленный эксперимент. Допустим, что нам удалось после нагрева воды до температуры  $t_m$ , испарить воду при том же давлении  $P_s$ . Для испарения воды в этом случае потребуется другое количество тепла –  $r_m$ . В результате получим пар с той же температурой и с тем же давлением, что и в предыдущем случае, т.е. переохлажденный пар.

В этом случае энтальпия пара

$$i_m'' = i_m' + r_m. \quad (2-б)$$

Поскольку параметры пара в точке 3 не зависят от способа получения пара, уравнения (2а) и (2б) тождественны.

Таким образом, теплота фазового перехода переохлажденного пара может быть определена как

$$r_m = i_s'' - c_p' \cdot t_m - c_{pM}(t_s - t_m) = i_s'' - i_m' - c_{pM}(t_s - t_m). \quad (3)$$

Уравнение (3) позволяет определить теплоту фазового перехода переохлажденного пара, используя табличные значения  $i_s''$  – энтальпии пара на линии насыщения для заданного давления и теплоемкостей воды  $c_p'$  и пара  $c_p$ . В качестве примера на рис. 2

приведены зависимости теплоты фазового перехода водяного пара при разных давлениях от величины переохлаждения  $\Delta T_{\text{пер}}$ .

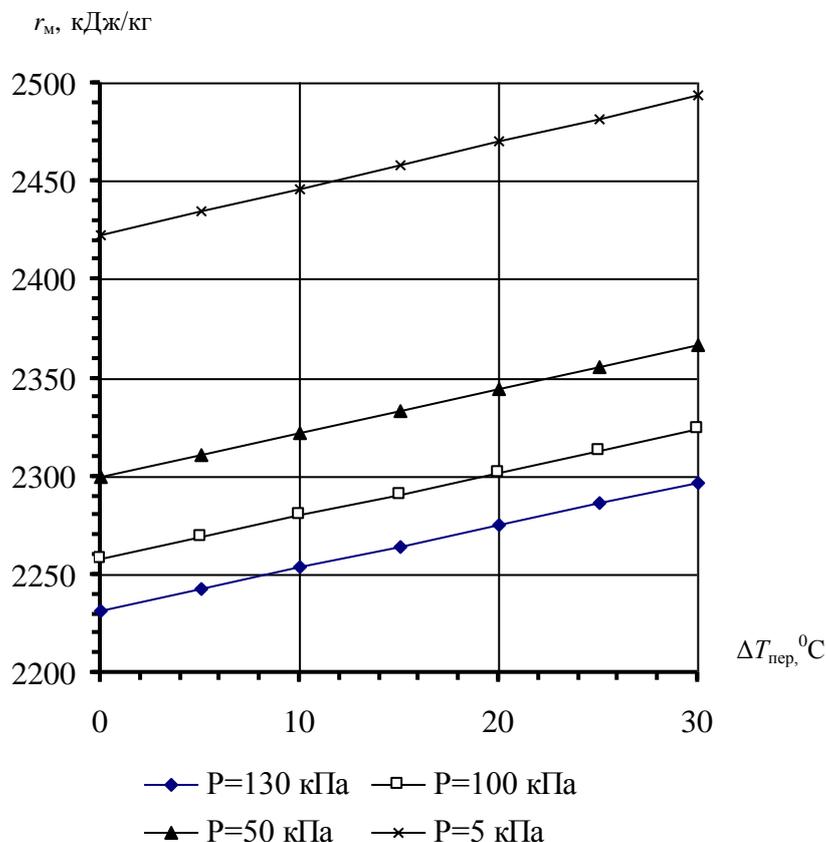


Рисунок 2 – Зависимость теплоты фазового перехода  $r_m$  водяного пара от величины переохлаждения при  $P = \text{const}$  для разных давлений

Из рис. 2 видно, что при величине переохлаждения  $30^\circ\text{C}$  теплота фазового перехода возрастает на  $\sim 65$  кДж/кг во всем приведенном диапазоне давлений (130–5 кПа).

В паровых турбинах зона влажного пара располагается в области давлений 130–3 кПа. Теплоемкость воды в интересующей нас области, практически, не зависит от давления. Поэтому значение энтальпии  $i'_m$  можно принимать равным  $i'_s$  и его можно находить по таблицам для температуры насыщения, равной температуре переохлажденного пара.

Значение теплоты фазового перехода может быть также определено по упрощенной формуле (4)

$$r_m = r + d \cdot \Delta t, \quad (4)$$

где  $r$  – теплота фазового перехода на линии насыщения при заданном давлении;  $\Delta t$  – величина переохлаждения пара;  $d$  – поправочный коэффициент определяется по рис. 3 и может быть рассчитан по формуле (5).

$$d = \frac{r_m - r}{\Delta t}, \quad (5)$$

$r_m$  – теплота фазового перехода, рассчитанная по формуле (3).

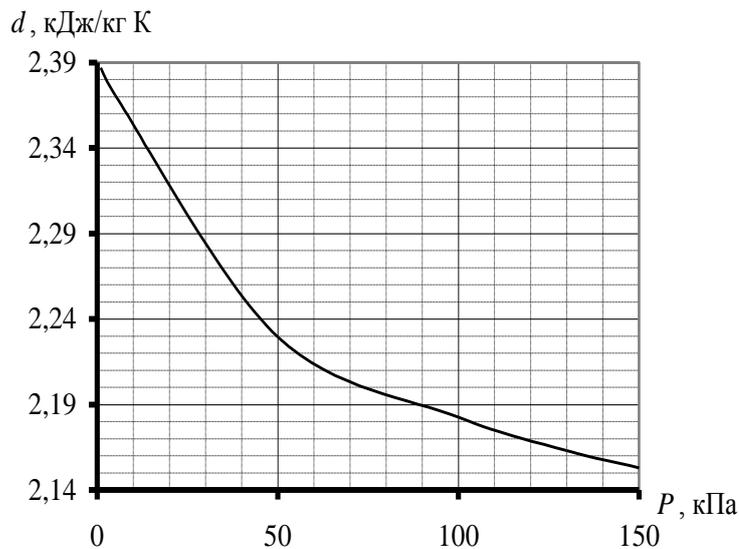


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента  $d$  от давления водяного пара

Определив значение теплоты фазового перехода переохлажденного пара, можно вычислить значение энтальпии по уравнению (26) и энтропии по ниже приведенной формуле (6).

Энтропия переохлажденного пара

$$S_m'' = c_p' \ln \frac{T_m}{273,15} + \frac{r_m}{T_m}. \quad (6)$$

Поскольку значение теплоемкости воды  $c_p'$  изменяется при изменении давления и температуры, целесообразно использовать табличные значения энтальпии воды для температуры, равной температуре переохлажденного пара. В этом случае формула (6) преобразуется к виду

$$S_m'' = \frac{i_m}{T_m - 273,15} \ln \frac{T_m}{273,15} + \frac{r_m}{T_m}. \quad (7)$$

По вычисленным значениям энтальпии и энтропии переохлажденного пара определяется конечная точка процесса расширения в  $i, S$ -диаграмме. Из формул (6), (7) следует, что увеличение теплоты фазового перехода  $r_m$  при одновременном снижении температуры  $T_m$  приводит к возрастанию энтропии переохлажденного пара.

В качестве примера на рис. 4 приведены зависимости энтальпии и энтропии водяного пара от величины переохлаждения при постоянном давлении  $P = 40$  кПа.

Из рис. 4 видно, что переохлаждение пара сопровождается уменьшением энтальпии при одновременном возрастании энтропии. Это явление вызывает увеличение потерь и снижает КПД турбинных ступеней, работающих в зоне переохлажденного пара, что должно учитываться при проектировании и анализе работы действующих турбин.

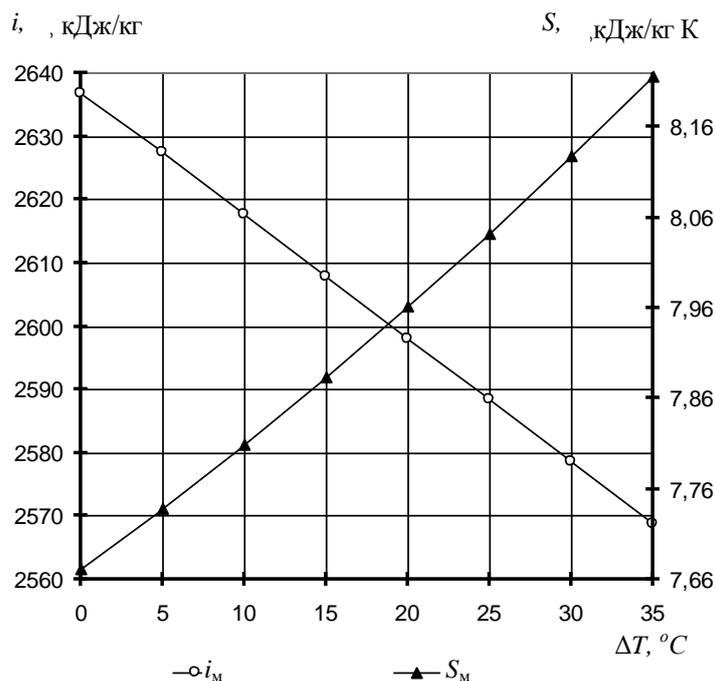


Рисунок 4 – Зависимость энтальпии  $i_m$  и энтропии  $S_m$  водяного пара от величины переохлаждения

#### Литература

1. Качуринер Ю.Я. Расчет потерь от влажности в ступенях влажнопаровых турбин // Труды ЦКТИ. – 2002. – Вып.283. – С. 85–96.
2. Скляр В.П. Влияние объемного заряда на величину переохлаждения парового потока за последней ступенью турбины /В.П. Скляр, А.А. Тарелин, В.П. Орловский // Проблемы машиностроения. – 2004. – Т.7, №1. – С. 4–11
3. Скляр В.П. Измерение температуры влажного парового потока в паровых турбинах // Пробл. машиностроения. – 2005. – Т8, №3. – С. 8–16.
4. Вукалович М.П. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара. – М.; Л.: Энергия, 1965. – 400 с.
5. Ривкин С.Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.

УДК 621.165.51

Скляр В.П.

### ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕОХОЛОДЖЕНОЇ ПАРИ ПРИ НЕРІВНОВАГОМУ РОЗШИРЕННІ В ПАРОВИХ ТУРБІНАХ

Запропоновано підхід к визначенню теплоти фазового переходу, ентальпії та ентропії переохолодженої пари за обмірюваним значенням тиску та термодинамічної температури пари в парових турбінах. На прикладі розрахунку показано, що переохолодження пари веде до росту теплоти фазового переходу та до збільшення ентропії.