

AMBERJET™ / AMBERSEP™, DUOLITE™.

В разделе условие регенерации (Regeneration Conditions) и дополнительные параметры регенерации (Advanced Regeneration) выбираются реагенты для регенерации, их концентрации и температуры, источник воды, этапы операции и другие настройки.

В разделе качество продукта и доза регенерации (Product Quality and Regenerant Dose) дается оценка процесса регенерации ионообменной смолы.

При выборе вкладки <Отчет> (Summary Report) программа генерирует результаты проектирования по выбранным ступеням очистки, которые включают выбранное оборудование, схемы его подключения, режимы работы, виды и количество дозируемых реагентов, качество пермеата и концентрата и еще многих параметров. (Пермеат – поток вещества, проходящий через полупроницаемую мембрану в процессе мембранного разделения.)

Вывод: программа обладает высокими функциональными возможностями, практически полностью перекрывающими потребности в расчете и проектировании полного комплекса участка водоподготовки. Программа является профессиональным специализированным инструментом проектирования участка водоподготовки, требует долгосрочного обучения для освоения полного функционала программы. Программа однозначно является полезным инструментом и вполне может быть использована при подготовке специалистов соответствующего профиля. Ввиду сложности освоения полного функционала программы в ходе учебного процесса, при подготовке специалистов энергетического профиля предполагается ознакомление с ключевыми методиками расчета схем водоподготовки промышленного предприятия.

#### Список использованных источников

1. Копылов, А. С., Лавыгин, В. М., Очков, В. Ф. Водоподготовка в энергетике: учебное пособие для вузов. М.: Издательство МЭИ, 2003.
2. Ларин, Б. М. Теоретические основы химико-технологических процессов на ТЭС и АЭС: учебное пособие. Иваново: Иван. Гос. энерг. ун-т, 2002.
3. Рябчиков, Б. Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования / Б. Е. Рябчиков. М.: Дели Принт, 2004.
4. Программное обеспечение для проектирования водоподготовки WAVE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dupont.com/water/resources/design-software.html>. – Дата доступа: 16.04.2024.

УДК 536-3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

**Федосеев Г.Н., к.т.н., доц., Граков Е.А., студ., Кременецкая Д.С., студ.,  
Муравский И.О., студ.**

*Витебский государственный технологический университет,  
г. Витебск, Республика Беларусь*

Реферат. В докладе используются дифференциальные уравнения термодинамики, в частности, уравнения Максвелла и уравнения для теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме. Частные производные параметров состояния, выполняемые при условии постоянства энтропии, определяются в адиабатном процессе. При этом дифференцируются уравнения Пуассона и Клайперона. В итоге находятся искомые теплоемкости идеального газа и отношение теплоемкостей.

Ключевые слова: теплоемкость, энтропия, давление, удельный объем, изоэнтропный процесс, частные производные параметров.

Теплоёмкость при постоянном давлении [1, с. 109]

$$C_p = T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_s \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p, \quad (1)$$

где  $T$  – абсолютная температура;  $(\partial p/\partial T)_s$  – частная производная давления  $p$  по абсолютной температуре  $T$ , взятая при условии постоянства энтропии  $s$ ;  $(\partial v/\partial T)_p$  – частная производная удельного объёма  $v$  по абсолютной температуре  $T$ , взятая при условии постоянства давления  $p$ .

Энтропия системы  $s$  сохраняется постоянной в адиабатном (изоэнтропном) процессе, уравнение адиабаты Пуассона

$$pv^k = const, \quad (2)$$

где  $k$  (показатель энтропии) остаётся в процессе неизменным. Производную  $(\partial p/\partial T)_s$  найдём в адиабатном процессе.

Продифференцируем уравнение (2) по температуре:

$$\frac{\partial p}{\partial T} v^k + pkv^{k-1} \frac{\partial v}{\partial T} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial T} v + pk \frac{\partial v}{\partial T} = 0. \quad (3)$$

Добавим к уравнению (3) производную уравнения Клапейрона состояния идеального газа  $pv = RT$  [1, с. 16] по температуре

$$\frac{\partial p}{\partial T} v + p \frac{\partial v}{\partial T} = R, \quad k \frac{\partial p}{\partial T} v + pk \frac{\partial v}{\partial T} = kR, \quad (4)$$

где  $R$  – газовая постоянная, зависящая только от свойств газа, является индивидуальной для каждого газа.

Решая уравнения (3, 4) совместно, перепишем уравнение (4):

$$k \frac{\partial p}{\partial T} v - \frac{\partial p}{\partial T} v = kR,$$

откуда искомая производная

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_s = \frac{kR}{(k-1)v}. \quad (5)$$

Записывая уравнение Клапейрона в виде

$$v = RT/p,$$

находим производную  $(\partial v/\partial T)_p$ :

$$(\partial v/\partial T)_p = R/p. \quad (6)$$

Используем (5, 6) в исходном дифференциальном уравнении (1):

$$C_p = T \cdot \frac{kR}{(k-1)v} \cdot \frac{R}{p} = T \frac{kR}{k-1} \cdot \frac{R}{RT} = \frac{k}{k-1} R.$$

Теплоемкость при постоянном объёме [1, с. 109]

$$C_v = -T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_s \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v. \quad (7)$$

Прибегая к уравнениям (3, 4), находим:

$$\frac{\partial p}{\partial T} v = -pk \frac{\partial v}{\partial T}, \quad -pk \frac{\partial v}{\partial T} + p \frac{\partial v}{\partial T} = R. \quad (8)$$

Из уравнения (8) получается производная  $(\partial v/\partial T)_s$ :

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_s = \frac{R}{p(1-k)} = -\frac{R}{p(k-1)}.$$

Производная  $(\partial p/\partial T)_v$  находится из уравнения Клапейрона:

$$\frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{RT}{v} \right)_v = \frac{R}{v}.$$

Подставим найденные производные в дифференциальное уравнение (7):

$$C_v = -T \cdot \frac{R}{v} \cdot \left( -\frac{R}{p(k-1)} \right) = -T \cdot R \left( -\frac{R}{RT \cdot (k-1)} \right) = \frac{R}{k-1}.$$

Отношение теплоемкостей (1, 7)

$$\frac{C_p}{C_v} = -\frac{\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_s \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p}{\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_s \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v} = \frac{\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_s \cdot \left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T}{\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_s \cdot \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T} = \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T, \quad (9)$$

Здесь используются уравнения Максвелла [1, с. 104]

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = -\left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T, \quad \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T.$$

В изоэнтропном процессе  $pv^k = const$ , дифференцируя уравнение процесса по удельному объему, получим уравнение

$$\frac{\partial p}{\partial v} \cdot v^k + p \cdot k \cdot v^{k-1} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial v} \cdot v + kp = 0,$$

Откуда

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s = -k \cdot \frac{p}{v}.$$

Второй сомножитель – производная  $(\partial v/\partial p)_T$  находится из уравнения Клайперона:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T = \frac{\partial}{\partial p} \cdot \left[ \frac{RT}{p} \right]_T = RT \cdot \left( -\frac{1}{p^2} \right).$$

После подстановки в дифференциальное уравнение (9):

$$\frac{C_p}{C_v} = -k \cdot \frac{p}{v} \cdot \left( -\frac{RT}{p^2} \right) = k \cdot \frac{RT}{vp} = k \cdot \frac{RT}{RT} = k.$$

Список использованных источников

1. Кириллин, В. А. Техническая термодинамика / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейдлин. – Москва : Энергия, 1969. – 472 с.