

## ТЕРМОДИНАМИКА

**УДК 532.1: 536.7**

**В.В. Дырдин, И.С. Елкин, А.С. Корецкая, Н.Ю. Сизов**

### ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕКОТОРЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Циклы тепловых двигателей: Отто, Дизеля, газотурбинных и паросиловых установок (цикл Ренкина) содержат адиабату, показатель которой  $\gamma$  зависит от соотношения  $C_P$  и  $C_V$  и в определенной мере влияет на КПД данных двигателей и установок.

Например, КПД цикла Отто [1] определяется по формуле:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}},$$

где  $\varepsilon$  – степень сжатия.

КПД цикла Дизеля [1] – по формуле

$$\eta = 1 - \frac{\rho^\gamma - 1}{\gamma \varepsilon^{\gamma-1} (\rho - 1)},$$

где  $\rho$  – степень предварительного расширения.

Следовательно, для достоверной оценки КПД тепловых двигателей необходимо знать молярные или удельные теплоемкости сред при постоянном объеме и давлении, а также зависимость данных характеристик от температуры.

Большинство физических справочников [2, 5] содержат термодинамические характеристики идеальных газов, а что касается жидкостей, то, как правило, приводятся данные о  $C_P$ , данные о  $C_V$  отсутствуют.

Кроме того, соотношение известно только для идеальных газов, а для некоторых реальных газов можно вычислить, но оценить это соотношение для жидкостей, особенно для воды, являющимся рабочим телом в

цикле Ренкина, не представляется возможным. С позиции физических представлений оно имеет большой интерес в области 0°C. В данной статье приведены результаты исследований температурных зависимостей термодинамических характеристик  $C_P$  и  $C_V$  для воды, керосина и скпицдара в области 0 °C на основе связи теплоемкости жидкости со скоростью упругих волн, которая определялась по дифракции света на стоячих ультразвуковых волнах.

Из первого начала термодинамики для элементарного процесса и уравнения дифференциальной связи между термическим и калорическим уравнениями вытекает соотношение:

$$C_P - C_V = T \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P . \quad (1)$$

С использованием термических коэффициентов уравнение (1) имеет следующий вид:

$$C_P - C_V = V_0 T \frac{\alpha^2}{\beta}, \quad (2)$$

где

$\alpha = \frac{1}{V_0} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$  – коэффициент изобарного расширения;

$\beta = -\frac{1}{V_0} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$  – коэффициент изотермического сжатия.

Коэффициент  $\beta > 0$ , т.к.  $\left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T < 0$ ,  $\alpha^2 > 0$ , поэтому

в общем случае  $C_P - C_V \geq 0$  (pPa-

венство может быть только при  $\alpha = 0$ ).

Для идеального газа  $\left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V$  и  $\left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$  легко определяются из термического уравнения состояния, откуда и следует соотношение Майера. Для жидкостей такое уравнение отсутствует, поэтому использован другой подход.

Известно, что скорость звука в упругой среде определяется соотношением:

$$v^2 = \frac{\Delta P}{\Delta \rho}, \quad (3)$$

где  $\Delta P$  и  $\Delta \rho$  – приращения давления и плотности среды, соответственно.

В работе [3] показано, что частным случаем соотношения (3) является

$$v^2 = \frac{1}{\beta_{ad} \rho}, \quad (4)$$

где  $\beta_{ad}$  – коэффициент адиабатической сжимаемости.

Коэффициент изотермической сжимаемости  $\beta_{iz}$  связан с коэффициентом  $\beta_{ad}$  соотношением:

$$\beta_{iz} = \beta_{ad} + \frac{T \alpha^2}{\rho C_P}, \quad (5)$$

где  $T$  – абсолютная температура жидкости;  $\alpha$  – коэффициент теплового объемного расширения;  $C_P$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении;  $\rho$  – плотность жидкости.

Тогда удельную теплоемкость жидкости при постоянном

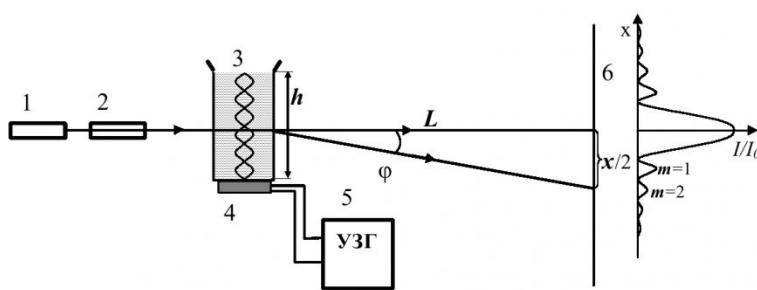


Рис.1. Блок-схема установки: 1 – лазер; 2 – коллиматор; 3 – кювета с исследуемой жидкостью; 4 – излучающая пластинка из титаната бария; 5 – ультразвуковой генератор; 6 – экран

объёме  $C_V$  можно определить из соотношения:

$$C_V = \frac{C_P}{v^2 \beta_{uz} \rho}. \quad (6)$$

Из (4 - 6) следует, что, определив скорость продольных упругих волн  $v$ , можно легко рассчитать параметр  $C_V$ , используя при этом табличные значения  $C_P$  и  $\alpha$ , и измерив температуру среды.

Для экспериментального определения скорости упругих волн в жидкости разработана установка для наблюдения дифракции света на стоячих ультразвуковых волнах, образуемых в жидкостях. Схема установки

приведена на рис. 1.

На экране наблюдалась дифракционная картина, состоящая из  $\pm 7$  порядков дифракционных максимумов. Измерив на экране расстояние между максимумами одного порядка  $x$  и расстояние от кюветы с исследуемой жидкостью до экрана  $L$ , зная длину волны  $\lambda$ , излучаемую лазером, по формуле

$$d \sin \varphi = \pm m \lambda, \quad (9)$$

где  $d$  – постоянная дифракционной решётки, равная в данном случае длине стоячей ультразвуковой волны  $\Lambda_{стояч}$ , т.е.

$$d = \Lambda_{стояч};$$

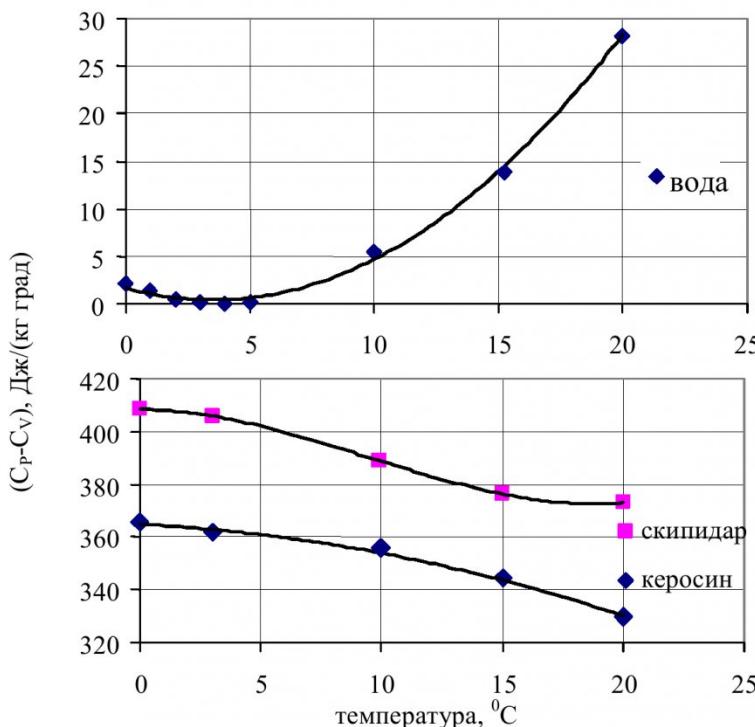


Рис. 2. Разность теплоемкостей в зависимости от температуры

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{2L},$$

определяем длину бегущей ультразвуковой волны, распространяющейся в кювете  $\Lambda = 2\Lambda_{стояч}$ . Зная частоту ультразвукового генератора, находим скорость распространения ультразвуковых волн в жидкости по формуле:

$$v = \Lambda \nu, \quad (10)$$

где  $\nu$  – частота ультразвукового генератора.

Результаты усредняются по всем наблюдаемым дифракционным максимумам.

Кювета с исследуемой жидкостью предварительно охлаждалась до нужной температуры в холодильнике, а затем, во время эксперимента температура контролировалась с помощью полупроводникового термосопротивления типа ММТ-1 и моста постоянного тока МО-62.

Абсолютная погрешность измерений скорости ультразвуковых волн при различных температурах не превышала 8 м/с, что составило порядка 0,6 %. На рис. 2 представлены графики зависимости разности удельных теплоемкостей ( $C_P - C_V$ ) от температуры для воды, керосина и скипидара. Результаты показывают, что для воды при  $t = 4^{\circ}\text{C}$   $(C_P - C_V) = 0$ , а для других жидкостей разность ( $C_P - C_V$ ) с ростом температуры уменьшается.

Для воды равенство  $C_P = C_V$  при  $t = 4^{\circ}\text{C}$  (точнее при  $t = 3,98^{\circ}\text{C}$ ) объясняется тем, что в диапазоне температур  $0 - 4^{\circ}\text{C}$  подводимое тепло идет не только на увеличение внутренней энергии, но и на изменение внутренней структуры воды, обусловленной водородной связью. По существу, вода претерпевает фазовый переход второго рода. Согласно современным исследованиям, благодаря наличию водородной связи, вода может иметь множество форм структурного расположения молекул в комплексах. В результате чего

$\alpha < 0$  в интервале  $0 - 4$  °C, а плотность воды увеличивается и достигает максимума при  $t = 4$  °C, а коэффициент  $\alpha$  при этом становится равным нулю. При дальнейшем росте температуры  $\alpha > 0$ , плотность уменьшается, а разность ( $C_P - C_V$ ) увеличивается и достигает в пределе зна-

чения, характерного для идеального или реального газа при полном параобразовании в зависимости от параметров термического состояния.

Таким образом, проведенные исследования позволили с достаточно высокой точностью определить температурную зависимость разности удельных

теплоемкостей воды, керосина и скипидара. Полученные результаты могут быть использованы в научных исследованиях паросиловых установок, а также при чтении соответствующих разделов курсов «Общей физики» и «Термодинамики» в университетах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудинов В.А., Карташов Э.М. Техническая термодинамика. – М.: Высш. шк., 2000. – 261 с.
2. Дубровский И.М., Рябошапка К.П., Егоров Б.В. Справочник по физике. – Киев: Наукова думка, 1986 – 558 с.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Механика. – М.: Наука, 1979. – 520 с.
4. Базаров И.П. Термодинамика. – М.: Высш. шк., 1983. – 344 с.
5. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1985 – 512 с.

□ Авторы статьи:

Дырдин Валерий Васильевич - докт.техн.наук, проф., зав. каф. физики	Елкин Иван Сергеевич -канд. техн. наук. доц. каф. физики	Корецкая Алла Сергеевна - студентка КузГТУ	Сизов Николай Юрьевич -студент КузГТУ
--	---	--	---