

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ШУГООБРАЗНЫХ ТОПЛИВ

Арсланова С.Н., Тонконог В.Г.

Казанский государственный технический университет, г. Казань

При создании двигательных установок, работающих на криогенных компонентах, таких как водород и метан, возникают серьезные проблемы, связанные с низкой плотностью этих веществ и значительными потерями при хранении. Эффективность использования топлива можно существенно повысить, если перевести его в шугообразное состояние - равновесную смесь газообразной, жидкой и твердой фаз.

Применение шугообразных топлив требует разработки надежных методов определения плотности, которая зависит от соотношения фаз. Соотношение фаз в шугообразной среде может изменяться как в процессе получения, так и при хранении топлива и является важной эксплуатационной характеристикой. Существующие методы позволяют определять концентрацию фаз главным образом в двухфазных средах [1].

Поскольку шугообразное топливо представляет собой в общем случае смесь трех фаз, находящихся в равновесии при параметрах тройной точки, непосредственное нахождение плотности по измерениям только давления и температуры невозможно. Более продуктивными являются способы, основанные на рассмотрении процессов изменения состояния шугообразной среды.

Предлагаемый метод представляет собой разновидность калориметрического метода [2] и базируется на анализе фазовой диаграммы нормального вещества, построенной в параметрах, которые зависят от состава среды и имеют различное значение для всех трех фаз в состоянии равновесия.

В  $p$ - $T$ -диаграмме трехфазное состояние изображается точкой, а в  $T$ - $s$ - или  $p$ - $v$ - диаграмме - линией. Если выбрать такую систему координат, чтобы обе переменные были для всех трех фаз различны (например, энтропия и удельный объем), то тройная точка изобразится некоторой частью плоскости. На рис.1 схематично показана часть  $s$ - $v$ -диаграммы нормального вещества. Трехфазная шуга может существовать лишь внутри фундаментального треугольника  $SLV$ , во всех точках которого давления и температуры одинаковы, различны только количества каждой фазы. Три угла треугольника соответствуют твердому состоянию, жидкому и парообразному [3].

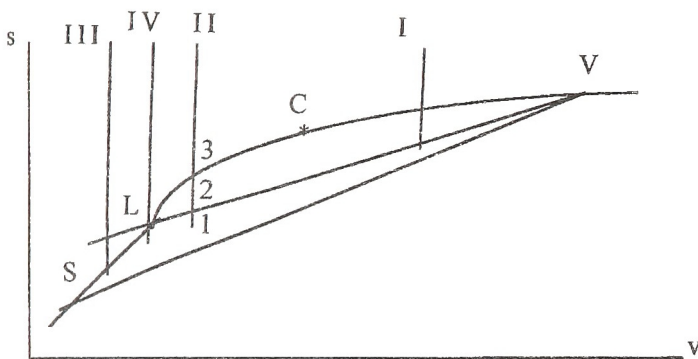


Рисунок 1 - Процессы изменения состояния трехфазной среды

При подводе тепла при постоянном объеме энтропия смеси увеличивается, а давление и температура не меняются до тех пор, пока в смеси присутствуют три фазы. Как только линия процесса пересечет границу фундаментального треугольника (т.2), число сосуществующих фаз уменьшится по крайней мере на единицу. Давление и температура начнут увеличиваться в соответствии с уравнением кривой фазового равновесия.

В зависимости от начального положения точки 1 линия процесса изохорного подвода тепла может пересекать сторону LV (линии I и II на рис. 1). При этом трехфазная система превратится в двухфазную систему жидкость-пар. При пересечении стороны SL (линия III на рис.1) трехфазная система превратится в двухфазную систему жидкость-твердое тело. Если линия процесса пройдет через точку L (линия IV на рис.1), исчезнут сразу две фазы - твердая и парообразная, и трехфазная система превратится в однофазную (жидкую).

Тип образовавшейся системы определяют по известным для данного вещества уравнениям кривых фазового равновесия жидкость-пар и твердое тело-жидкость.

Дальнейший изохорный подвод тепла приводит к переходу двухфазной системы в однофазную (т.3). Здесь возможны два случая: 1) однофазная система представляет собой пар (линия I); 2) однофазная система представляет собой жидкость (линии II и III). Фазовое состояние однофазной системы определяют по характеру изменения давления от температуры вдоль изохоры из неравенства

$$\left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_{v' = \text{const}} > \frac{dp}{dT} > \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_{v'' = \text{const}}$$

где  $v'' = \text{const}$  - изохора пара,  $v' = \text{const}$  - изохора жидкости, а производная  $dp/dT$  взята по кривой фазового равновесия жидкость-пар.

В момент перехода двухфазной системы в однофазную происходит резкое изменение величины производной давления от температуры. Удельный объем в этот момент равен удельному объему сухого насыщенного пара  $v''$  или насыщенной жидкости  $v'$  или удельному объему жидкости на линии затвердевания  $v''^*$  которые являются известными для данного вещества функциями температуры (или давления).

Свойства среды в состоянии, соответствующем точкам 1, 2, 3 рассчитывают по соотношениям:

точка 1	$v_1 = x_1 v_1'' + y_1 v_1' + (1 - x_1 - y_1) v_1^T$ $s_1 = x_1 s_1'' + y_1 s_1' + (1 - x_1 - y_1) s_1^T$
точка 2	$v_2 = (1 - y_2) v_2'' + y_2 v_2'$ или $v_2 = y_2 v_2' + (1 - y_2) v_2^T$ или $v_2'' = v_2$ $s_2 = s_1'' + y_2 (s_1' - s_1'')$ или $s_2 = s_1^T + y_2 (s_1' - s_1^T)$ или $s_2'' = s_2$
точка 3	$v_3 = v_3''$ или $v_3 = v_3'$ или $v_3 = v_3^*$

Так как процесс изохорный  $v_3 = v_2 = v_1$ . Кроме того  $s_1 = s_2 - \Delta q/T_{\text{тр}}$   
 $\Delta q = \Delta Q/m$ ,  $m = V/v_1$ , где  $V$  - известный объем пробы,  $\Delta Q$  - количество тепла, подведенное к пробе в процессе перехода из трехфазного состояния в двухфазное,  $T_{\text{тр}}$  - температура тройной точки,  $m$  - масса пробы,  $x$  и  $y$  - относительное содержание пара и жидкости в шуге, соответственно. Удельные объемы и энтропия фаз при температуре тройной точки являются известными величинами, поэтому система уравнений для точек 1,2,3 позволяет однозначно определить соотношение фаз трехфазной среды.

На рис. 2 приведена принципиальная схема устройства определения соотношения фаз в шугообразной среде при постоянном объеме. При определении соотношения фаз осуществляется подогрев пробы при непрерывной регистрации давления и температуры. В тот момент, когда давление и температура начнут изменяться, измеряется и запоминается количество тепла, затраченное на выход из трехфазной области. С помощью дифференцирующего блока определяется значение производной  $dp/dT$  и тип двухфазной системы. Как только значение производной резко изменится, что свидетельствует о выходе в однофазную область, запоминается температура  $T_3$ , по которой находится удельный объем пробы. Соотношение фаз рассчитывается по измеренным значениям  $V$ ,  $\Delta Q$  и  $T_3$  по уравнениям для точек 1, 2, 3.

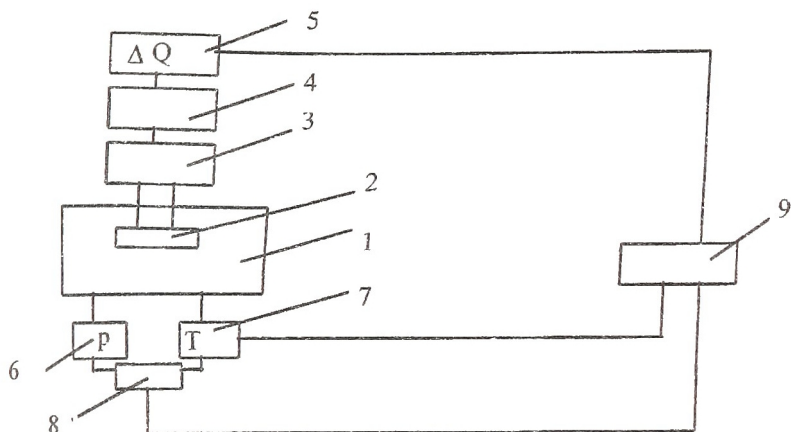


Рисунок 2 - Схема устройства определения соотношения фаз в шугообразной среде

1 - камера постоянного объема; 2 - нагреватель; 3 - источник энергии; 4 - регулятор мощности; 5 - измеритель количества подведенного тепла; 6 - датчик давления с регистрирующим прибором; 7 - датчик температуры с регистрирующим прибором; 8 - дифференцирующий блок; 9 - запоминающее устройство.

Анализ погрешности метода показал, что при величине объема пробоотборника  $10^{-3} \text{ м}^3$  и абсолютных погрешностях измерения объема  $10^{-6} \text{ м}^3$ , температуры  $0,1 \text{ К}$ , количества тепла  $10^3 \text{ Дж}$  относительная погрешность определения содержания жидкости не превышает  $0,9 \%$  при  $u = 0,5$ .

#### Список литературы

1. Sindt С. A summary of the characterisation study of slush hydrogen. Cryogenics, No. 10, 1970, p.372-380.
2. Федоров В.И. Авт.свид. СССР № 1 626 141 Способ определения степени сухости водяного пара.- Оpubл.в Бюл.,1991, № 5.
3. Шпильрайн Э.Э. , Кессельман П.М. Основы теории теплофизических свойств веществ.- М.: Энергия, 1977.- 248 с.