

**В. К. Судиловский**

(Минский энергетический техникум)

## ОБ ИЗМЕРЕНИИ МАССОВОГО ПАРСОДЕРЖАНИЯ ВЛАЖНОГО ПАРА ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Измерение массового паросодержания влажного водяного пара имеет большое значение как для обеспечения оптимального протекания и регулирования технологических процессов в паро- и турбогенераторах, так и для изучения теплообмена и механизма течения пароводяной смеси. Это обусловило появление значительного количества различных способов определения паросодержания [1, 2], из которых привлекают внимание рядом существенных достоинств методы, основанные на различии электрических параметров воды и водяного пара. При этом предпочтительнее диэлькометрический метод, вследствие того что зависимость диэлектрической проницаемости от паросодержания значительно меньше проводимости подвержена влиянию посторонних факторов.

В настоящее время имеется как положительный опыт использования диэлькометрического метода [3, 4], так и отрицательный [5]. Представляется, что более широкое применение данного метода затруднено из-за недостатка данных по измерению диэлектрической проницаемости влажного пара при различных давлениях и массовых паросодержаниях, необходимых для правильного выбора аппаратуры и методики измерений.

Влажный пар представляет гетерогенную систему, в которой диэлектрическая проницаемость смеси не является простой функцией диэлектрических проницаемостей ее компонентов. Отклонение электрических параметров гетерогенных систем от закона объемно-долевой аддитивности вызывается рядом факторов, влияющих на поляризацию, и прежде всего процессами молекулярной диссоциации, формой и размерами частиц дисперсной фазы.

Влажный пар может иметь совершенно различную структуру в зависимости от его параметров. В первом приближении его можно рассматривать как статистическую смесь, в которой частицы распределены, не образуя никаких регулярных структур, и использовать для расчета его диэлектрической проницаемости формулу В. И. Оделевского [6]. Применительно к влажному пару эта формула имеет вид

$$\epsilon_{см} = \frac{\epsilon_n(3\varphi - 1) + \epsilon_v(2 - 3\varphi)}{4} + \sqrt{\frac{[\epsilon_n(3\varphi - 1) + \epsilon_v(2 - 3\varphi)]^2}{16} + \frac{\epsilon_n\epsilon_v}{2}}, \quad (1)$$

где  $\epsilon_n$  и  $\epsilon_v$  — соответственно диэлектрическая проницаемость пара и воды.

Зависимость диэлектрической проницаемости влажного пара от истинного объемного паросодержания при давлениях 49, 98, 160 и 210 бар, рассчитанная по формуле (1), показана на рис. 1 сплошными линиями.

Учитывая возможность отклонения диэлектрической проницаемости пароводяной смеси от зависимости (1), на рис. 1 штрих-пунктирными

линиями показано изменение диэлектрической проницаемости, соответствующее закону объемно-долевой аддитивности:

$$\epsilon_{см} = \epsilon_n \varphi + \epsilon_v (1 - \varphi).$$

С повышением давления пара разность значений диэлектрической проницаемости воды и водяного пара заметно убывает. Это приводит к уменьшению относительного изменения диэлектрической проницаемости пароводяной смеси во всем диапазоне истинных объемных паросодержаний (см. рис. 1). Однако на данном основании нельзя делать вывод, что с увеличением параметров пара разрешающая способность (чувствительность) диэлькометрического способа измерения массового паросодержания также уменьшается.

Выясним причину этого явления. Для этого рассмотрим, в какой связи с истинным объемным паросодержанием и диэлектрической проницаемостью смеси  $\epsilon_{см}$  находится вторая важнейшая характеристика потока — расходное массовое паросодержание  $x$ .

Как видно из рис. 2, построенного по данным работы [7] с учетом равенства скоростей обеих фаз, истинное объемное паросодержание находится в своеобразной зависимости от массового паросодержания и давления:

1) при данном давлении пара  $\varphi$  существенно возрастает в области малых значений  $x$  и медленно растет в области больших значений  $x$ ;

2) с понижением давления указанная тенденция проявляется более четко, причем область массовых паросодержаний, где наблюдается минимальное изменение  $\varphi$ , возрастает, а область максимального изменения  $\varphi$  сокращается.

Учитывая монотонность функции  $\varphi = f(x)$  и ее определенную симметрию, границей областей с минимальным и максимальным изменением истинного объемного паросодержания следует считать геометрическое место точек, где частная производная первого порядка

$$\left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_{p=\text{const}} = \frac{a}{[(1-a)x + a]^2} \quad (3)$$

обращается в единицу. Причем граничное значение массового паросодержания

$$x_{гр} = \frac{1}{a^{-1/2} + 1}. \quad (4)$$

Указанная зависимость истинного объемного паросодержания от расходного объясняется как различием удельных объемов воды и во-

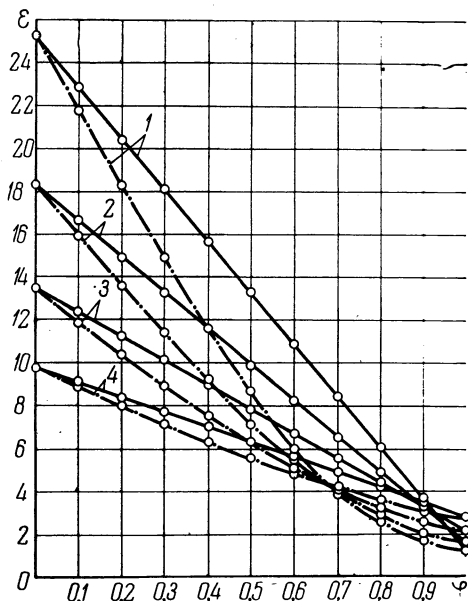


Рис. 1. Зависимость диэлектрической постоянной влажного пара от истинного объемного паросодержания при различных давлениях:

1 — 49 бар; 2 — 98 бар; 3 — 160 бар; 4 — 210 бар.

дяного пара, так и характером изменения последних на линии насыщения. Более подробное изучение этой зависимости вскрывает некоторые интересные факты.

Скорость изменения истинного объемного паросодержания, характеризующая производной  $\frac{\partial \varphi}{\partial x}$  [уравнение (3), рис. 3], максимальна при  $x \rightarrow 0$  и в пределе при  $x=0$  равна  $\frac{1}{a}$ , т. е. отношению удельного объема пара к удельному объему воды на линии насыщения. С повышением

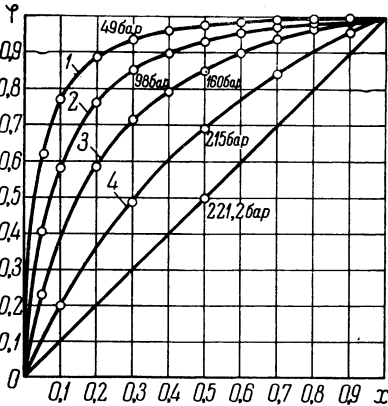


Рис. 2. Зависимость истинного объемного паросодержания от массового при различных давлениях пара:

1 — 49 бар; 2 — 98 бар; 3 — 160 бар;  
4 — 210 бар.

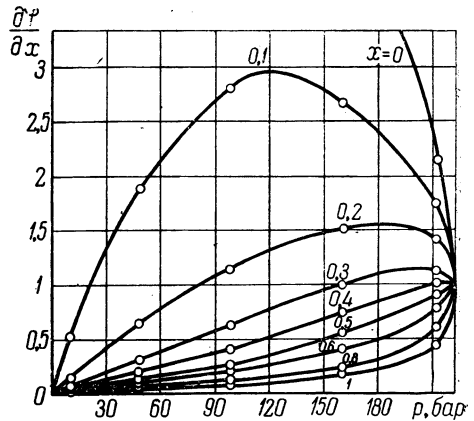


Рис. 3. Зависимость скорости изменения истинного объемного паросодержания от давления при различном массовом паросодержании.

массового паросодержания максимум скорости изменения  $\varphi$  уменьшается по величине и смещается в сторону более высоких давлений, при этом давление, однозначно определяемое по коэффициенту  $a$ , и массовое паросодержание связаны друг с другом следующим соотношением:

$$x = \frac{a}{1 + a}, \quad (5)$$

которое получается из условия равенства нулю частной производной  $\frac{\partial}{\partial a} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)$ . При паросодержании  $x \geq 0,5$  максимальная скорость изменения  $\varphi$  достигается в критической точке и равна единице. Минимальная скорость изменения  $\varphi$  наблюдается при  $x \rightarrow 1$  и в пределе при  $x=1$  равна  $a$ . Обращает на себя внимание и тот факт, что при  $x \geq 0,5$  во всем диапазоне давления с повышением последнего скорость изменения  $\varphi$  возрастает.

Необходимо отметить, что при рассмотрении зависимости  $\varphi = f(x, p)$  не учитывалась относительная скорость пара, которая только при высоких давлениях приближается к нулю. Однако это приводит лишь к некоторому завышению значений и скорости изменения  $\varphi$  с уменьшением давления пара и ни в коем случае не изменяет характер исследованной зависимости.

Расчетные данные по диэлектрической проницаемости пароводяной смеси в зависимости от массового паросодержания при давлениях 49, 98, 160 и 210 бар сведены в табл. 1.

$\frac{p}{\epsilon}$	$x$											
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
49	25,2	2,64	2,10	1,50	1,43	1,39	1,37	1,355	1,34	1,33	1,35	
	25,2	6,67	4,08	3,00	2,44	2,10	1,85	1,67	1,54	1,43	1,35	
98	18,3	5,61	3,27	2,54	2,19	2,05	1,91	1,83	1,77	1,73	1,70	
	18,3	8,57	5,66	4,27	3,22	2,91	2,52	2,24	2,02	1,84	1,70	
160	13,5	7,69	6,025	4,69	3,60	2,85	2,59	2,41	2,26	2,18	2,1	
	13,1	9,06	6,77	5,39	4,45	3,79	3,29	2,89	2,57	2,32	2,1	
210	9,74	8,17	6,71	5,75	4,89	4,32	3,87	3,52	3,23	2,99	2,8	
	9,74	8,39	7,32	6,38	5,63	4,99	4,43	3,95	3,52	3,14	2,8	

Рис. 1 отражает зависимость, приведенную в табл. 1. Анализ этой зависимости показывает следующее:

1) при данном давлении пара  $\epsilon_{см}$  существенно изменяется в области малых значений  $x$  и незначительно — в области больших значений  $x$ ;

2) с понижением давления указанная тенденция проявляется более отчетливо, причем область массовых паросодержаний, где наблюдается существенное изменение  $\epsilon_{см}$ , сокращается, а область минимального изменения  $\epsilon_{см}$  увеличивается.

Как в том, так и в другом случае характер изменения в зависимости от  $x$  определяется в основном показанной выше своеобразной связью  $\phi$  и  $x$  и мало зависит от вида функции  $\epsilon_{см} = f(\phi)$ , что хорошо видно из сравнения рис. 1, 2 и 4. Поэтому и в данных условиях границей областей с максимальным и минимальным изменением  $\epsilon_{см}$  можно с достаточной точностью считать линию  $x_{гр} = \frac{1}{a^{-1/2} + 1}$ .

Следует отметить, что при паросодержаниях  $x > x_{гр}$  с повышением давления величина диэлектрической проницаемости смеси и ее относительное изменение возрастают. Увеличение диэлектрической проницаемости смеси в этой области обусловлено возрастанием диэлектрической проницаемости пара. Увеличение же относительного изменения  $\epsilon_{см}$  при этом объясняется более высоким значением частной производной  $\frac{\partial \phi}{\partial x}$ .

Так как для определения влажности пара диэлькометрическим (емкостным) способом измеряют диэлектрическую проницаемость смеси, то на основании исследованной выше зависимости  $\epsilon_{см}$  от  $x$  можно констатировать следующее.

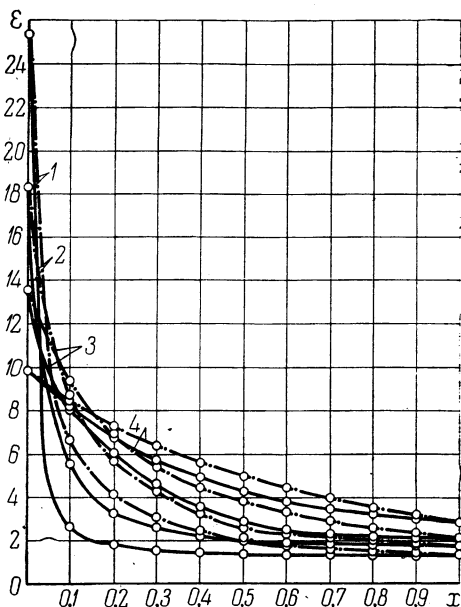


Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости влажного пара от массового паросодержания при различных давлениях:

1 — 49 бар; 2 — 98 бар; 3 — 160 бар; 4 — 210 бар.

Диэлькометрический (емкостный) способ измерения влажности (паросодержания) пара обладает минимальной разрешающей способностью (чувствительностью) в области больших массовых паросодержаний  $x > x_{гр}$ . При этом с повышением давления разрешающая способность способа при прочих равных условиях увеличивается, и наоборот, с уменьшением давления — уменьшается.

Изложенное в равной мере относится и к радиоинтерференционному способу определения влажности пара, поскольку он также базируется на измерении  $\epsilon_{см}$ .

Шкала прибора для измерения расходного паросодержания в широком диапазоне значений  $x$  будет неравномерной.

Диэлькометрический способ измерения паросодержания уже нашел применение в системах регулирования прямоточных парогенераторов и для измерения влажности пара в турбинных ступенях в лабораторных условиях.

Крайне важным является также освоение методов измерения влажности пара в последних ступенях стационарных турбин, что позволит, в частности, контролировать экономичность работы ЧНД турбин по непосредственному замеру параметров отработавшего пара. Однако течение потока в последних ступенях характеризуется большой неравномерностью распределения влаги и скоростей (расхода) пара по радиусу ступени. Поэтому для получения средневзвешенной по расходу влажности пара требуется одновременное измерение как влажности, так и скоростей потока в отдельных сечениях.

Возможность использования для этой цели емкостного датчика паросодержания предполагается проверить на Минской ТЭЦ-3. При этом датчик паросодержания будет жестко крепиться на многоканальном зонде ВТИ дисковой конструкции, позволяющем с высокой точностью определять углы и скорости потока в меридиональном и окружном направлениях.

## Литература

1. Гриффен Л. А., Судиловский В. К. Способы получения импульса по влажности пара. — «Вестник КПИ». Теплоэнергетика, 1964, № 1.
2. Ермашов Н. Н., Марков Н. М. Разработка приборов для определения степени влажности пара. — «Изв. вузов». Энергетика, 1965, № 8.
3. Головин В. А., Заниц А. И., Казинцев Ф. Д. Методика исследования моделей последних ступеней турбины на влажном паре. — «Теплоэнергетика», 1965, № 3.
4. Новохацкий Е. М. Влияние диаметра трубы на структуру потока в двухфазной жидкости, движущейся в вертикальных трубах. — «Изв. вузов». Энергетика, 1961, № 4.
5. Фурсенко В. Ф. Исследование некоторых способов определения качества пара. — В кн.: «Тр. РИИЖТА». Вып. 24. М., 1958.
6. Оделевский В. И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем. — ЖТФ, 1951, т. 21, № 6.
7. Стырикович М. А., Катковская К. Я., Серов Е. П. Парогенераторы электростанций. М.—Л., 1966.