

лений в 0,9 МПа следует использовать показания термометра, а при давлениях свыше 0,9 МПа наиболее точные результаты измерения будут получены с помощью манометра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Типовой алгоритм расчета технико-экономических показателей конденсационных энергоблоков мощностью 300, 500, 800 и 1200 МВт. — М.: СПО, Союзтехэнерго, 1978. — 378 с.

УДК 621.1.016

В.К. СУДИЛОВСКИЙ, канд. техн. наук,
В.В. КРАВЕЦ, инженер,
Ю.В. МУЛЕВ, инженер,
А.В. БУЗО, студент (БПИ)

К ВОПРОСУ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВЛАЖНОГО ВОДЯНОГО ПАРА

Определение массового расходного паросодержания влажного водяного пара имеет большое значение как при изучении теплообмена и механизма течения пароводяной смеси, так и для режимных испытаний и регулирования технологических процессов в парогенераторах, ядерных реакторах и паровых турбинах.

Однако до сих пор непосредственное и непрерывное измерение паросодержания влажного пара не нашло практического решения. Одной из важных причин такого положения является отсутствие как теоретических, так и экспериментальных данных по диэлектрической проницаемости влажного водяного пара.

В связи с этим в отраслевой научно-исследовательской лаборатории оптимизации режимов и комплексной автоматизации тепловых электрических станций БПИ выполнено исследование электрофизических свойств влажного водяного пара на изобаре 0,294 МПа с использованием специального электронного преобразователя, предназначенного для получения непрерывного электрического сигнала по степени сухости водяного пара. Исследования проводились на экспериментальном стенде (рис. 1). Получение влажного пара заданной степени сухости достигалось путем дросселирования и последующего охлаждения перегретого пара, подаваемого на стенд из паровой магистрали с параметрами $P = 1,2$ МПа, $T = 500$ К. Для охлаждения использовалась техническая вода с температурой 288 К и давлением 0,5 МПа. Экспериментальный стенд представляет трехсекционный рекуператор типа "труба в трубе", выполненный из труб $D_{\gamma} 32$ и $D_{\gamma} 50$. Длина каждой секции 3 м. Пар протекает по внутренним трубам теплообменника, охлаждающая вода — в межтрубном пространстве, причем по охлаждающей воде возможно отключение одной или двух секций. На выходе пара из последней секции теплообменника установлен емкостный датчик [1].

Расход пара измерялся диафрагмой с датчиком типа ДМ и вторичным прибором КСД-2 класса точности 0,2, расход охлаждающей воды — мерным

баком. Температура пара и воды измерялись платиновыми термометрами сопротивления гр. 21 со вторичным прибором КСМ-4 (класса точности 0,25), давление — пружинными манометрами класса точности 0,6.

Определение влажности пара производилось по его диэлектрической проницаемости, измеряемой при помощи электронного емкостного преобразователя, соединенного с проточным емкостным датчиком. Он содержит наружный цилиндр, устройства ввода, центральный электрод, внутренний цилиндр, подводящий и отводящий патрубки. Измерительная камера датчика

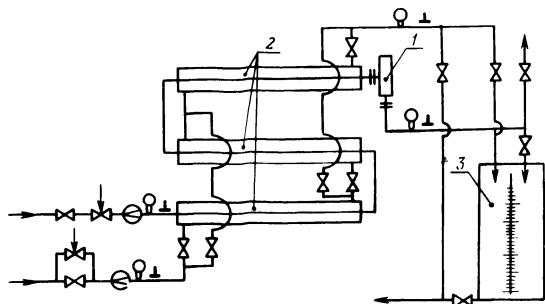


Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 — емкостный датчик; 2 — секция рекуператора; 3 — мерный бак.

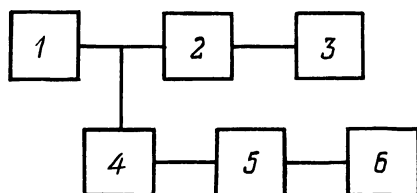


Рис. 2. Структурная схема емкостного преобразователя: 1 — высокочастотный генератор; 2 — катодный повторитель; 3 — показывающий прибор; 4,5 — соответственно внутренний и выносной колебательные контуры; 6 — емкостный датчик.

состоит из двух частей. Одна часть образована центральным электродом и внутренним цилиндром, вторая — центральным электродом и наружным цилиндром. В первой части измерительной камеры влажный пар, поступающий по подводящему патрубку, течет равномерным потоком и паразитная емкость, связанная с заполнением измерительной камеры, отсутствует. Во второй части равномерность нарушается вследствие поворота потока на 180° . При этом образуется некоторая паразитная емкость, но ее величина незначительна, так как она составляет небольшую долю от емкости второй части. Емкость же второй части сама по себе мала из-за существенно большего, чем в первой части отношения диаметров электродов и небольшой длины второй части, оптимальная величина которой определяется из условия равновеликости проходных сечений датчика. Такое выполнение конструкции датчика позволяет избежать тупиков участков и застойных зон в его измерительной камере.

Структурная схема емкостного преобразователя приведена на рис. 2. Рабочая частота преобразователя составляла $4 \cdot 10^6$ Гц, что, с одной стороны, исключало явление поляризации, с другой — позволяло избежать погрешности измерений, связанной с явлением аномальной дисперсии.

Относительная погрешность измерения емкости составляла 0,5 %.

Обработка экспериментальных данных, полученных на стенде, сводилась в конечном итоге к получению функциональной зависимости диэлектрической проницаемости влажного пара $\epsilon_{вп}$ от массового расходного паросодержания x .

Массовое расходное паросодержание на выходе из последней секции теплообменника рассчитывалось по известной зависимости:

$$x = \frac{i_{\text{Вых}}^{\text{п}} - i}{i'' - i'}$$

где $i_{\text{Вых}}^{\text{п}}$ — энтальпия влажного пара на выходе из последней секции рекуператора; i' , i'' — соответственно энтальпии воды и водяного пара на линии насыщения при данном давлении.

В свою очередь энтальпия влажного пара на выходе из последней секции рекуператора $i_{\text{Вых}}^{\text{п}}$ определяется из уравнения теплового баланса теплообменника:

$$i_{\text{Вых}}^{\text{п}} = i_{\text{Вх}}^{\text{п}} - \frac{G_{\text{в}}}{G_{\text{п}} \eta_{\text{ТП}}} (i_{\text{Вых}}^{\text{в}} - i_{\text{Вх}}^{\text{в}}),$$

где $i_{\text{Вх}}^{\text{п}}$ — энтальпия перегретого пара на входе в первую секцию рекуператора; $G_{\text{в}}$ — массовый расход охлаждающей воды; $G_{\text{п}}$ — массовый расход перегретого пара; $i_{\text{Вх}}^{\text{в}}$, $i_{\text{Вых}}^{\text{в}}$ — соответственно энтальпии охлаждающей воды на входе и выходе теплообменника; $\eta_{\text{ТП}}$ — к.п.д. теплового потока стенда.

Определение диэлектрической проницаемости влажного пара $\epsilon_{вп}$ при установленном массовом паросодержании производилось по измеряемому приращению емкости датчика по сравнению с его емкостью в вакууме

$$\epsilon_{\text{вп}} = \frac{C_{\text{о}}^{\text{д}} + \Delta C_{\text{х}}}{C_{\text{о}}^{\text{д}}}$$

где $C_{\text{о}}^{\text{д}}$ — активная емкость датчика влажности пара в вакууме; $\Delta C_{\text{х}}$ — приращение активной емкости датчика при протекании влажного пара между его электродами.

Активная емкость использованного в экспериментах датчика определялась по методике, приведенной в [2], на химически чистом бензоле и воздухе при нормальных условиях при помощи измерителя емкости Е8-4 с классом точности 0,2 и составила $42,15 \pm 0,09$ пФ.

Предварительно были выполнены теоретические расчеты диэлектрической проницаемости влажного пара от его паросодержания по модифицированной формуле В.И. Оделевского [3]

$$\epsilon_{\text{вп}} = \frac{\epsilon_{\text{п}} (3\varphi - 1) + \epsilon_{\text{в}} (2 - 3\varphi)}{4} + \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{п}} (3\varphi - 1) + \epsilon_{\text{в}} (2 - 3\varphi)}{16} + \frac{\epsilon_{\text{п}} \epsilon_{\text{в}}}{2}} \quad (1)$$

и по закону объемно-долевой аддитивности

$$\epsilon_{\text{вп}} = \epsilon_{\text{п}} \varphi + \epsilon_{\text{в}} (1 - \varphi), \quad (2)$$

где $\epsilon_{\text{п}}$, $\epsilon_{\text{в}}$ — соответственно диэлектрическая проницаемость пара и воды на линии насыщения при данном давлении; φ — истинное объемное паросодержание.

Пересчет истинного объемного паросодержания на массовое расходное паросодержание x производился по зависимости [4]

$$\varphi = \frac{x}{x + (1-x) \frac{v' \omega''}{v'' \omega'}}$$

где v' , v'' — соответственно удельный объем воды и водяного пара на линии насыщения при данном давлении; ω' , ω'' — соответственно скорости воды и водяного пара в данном сечении.

При расчете было принято равенство этих скоростей.

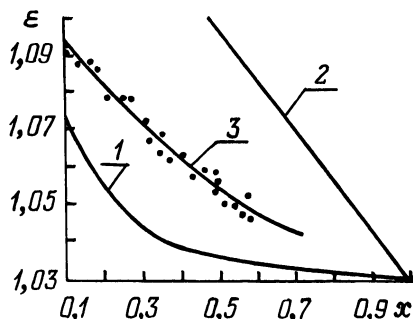


Рис. 3. Зависимости диэлектрической проницаемости влажного водяного пара от массового расходного паросодержания при давлении $P = 0,294$ МПа: 1 — по формуле (1) В.И. Оделевского; 2 — по формуле (2); 3 — по результатам эксперимента.

На рис. 3 изображены зависимости диэлектрической проницаемости влажного водяного пара от массового расходного паросодержания при давлении $P = 0,294$ МПа, рассчитанные по уравнениям (1), (2) и зависимость, полученная экспериментальным путем в диапазоне $x = 0,1-0,7$.

Экспериментальные данные описываются следующей формулой:

$$\epsilon_{\text{вп}} = 1 + 0,11 e^{-\frac{x}{0,81}}$$

которая обобщает полученные результаты в пределах общей погрешности эксперимента.

Как видно из рис. 3, имеются значительные отклонения экспериментальных данных как от закона объемно-долевой аддитивности, так и от статистической модели В.И. Оделевского, что требует расширения диапазона экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 325546 (СССР). Емкостный датчик влажности газа/ В.К. Судилковский, И.В. Боярчук, М.А. Велюбский. — Опул. в Б.И., 1971, № 41. 2. Эмеф. Диэлектрические измерения. — М.: Химия, 1967, с. 73—74. 3. Оделевский В.И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем. — ЖТФ, 1951, т. 21, №6, с. 7—8. 4. Стрыкович М.А., Маргулова Т.Х., Катков В.Я. Процессы генерации пара на электростанциях. — М.: Энергия, 1969, с. 101—103.