

ОБОБЩЕНИЕ ДАННЫХ ПО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКОЙ И ПАРОВОЙ ФАЗ ВОДЫ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРСОДЕРЖАНИЯ ДВУХФАЗНЫХ СОСТОЯНИЙ

**Д.т.н., проф. Мулёв Ю.В.¹, д.т.н., проф. Арефьев К.М.², к.т.н. Беляева О.В.³,
инж. Мулёв М.Ю.¹, инж. Заяц Т.А.³,**

Выполнено обобщение опытных значений диэлектрической проницаемости воды и водяного пара в зависимости от отношения плотности к температуре. Полученные соотношения позволяют рассчитывать паросодержание двухфазных состояний применительно к энергетическим установкам.

В тепловой, и особенно атомной энергетике необходимо контролировать содержание влаги в паре перед сепаратором, пароперегревателем, на входе в турбину и в ее ступенях низкого давления, а также перед конденсатором. Известный солевой метод контроля влажности пара сложен в применении, длителен во времени и может давать большие ошибки. Поэтому целесообразно разрабатывать другие, более удобные к применению, оперативные и более точные методы контроля влагосодержания в паре. Таким может быть разрабатываемый метод определения влажности водяного пара по контролю изменения диэлектрической проницаемости пароводяной смеси [1, 2, 3].

В литературе приведены многочисленные опытные данные по диэлектрической проницаемости (относительно вакуума) ϵ различных веществ, включая воду. Для воды и водяного пара в обзоре [4] представлены ссылки на 36 работ, полученные с 1930 по 1995 гг. и сообщены соответствующие экспериментальные данные (более 1256 значений, табл. 1). Больше половины этих измерений находится в высокоплотной области, ограниченной нормальными температурами замерзания и кипения, изобарой, отвечающей атмосферному давлению, которую авторы [4] обозначили как область А. Остальные точки расположены вдоль кривой насыщения (область В), в однофазной области выше нормальной точки кипения (область С), и в диапазоне переохлажденной воды при давлении окружающей среды (область D).

Позднее исследования диэлектрической проницаемости воды практически не проводились.

¹ 121552, Москва, Россия, Ярцевская ул., д. 29, к.2. НПО ЮМАС

² 195251, Санкт-Петербург, Россия, Политехническая ул., 29, СПбГПУ, Государственный политехнический университет

³ 2201009, Минск, Беларусь, ул. Академика Красина, 99, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – «Сосны» НАНБ

Таблица 1. Интервалы параметров, отвечающих областям термодинамического состояния *A*, *B* и *C*

Интервалы параметров	Область <i>A</i>	Область <i>B</i>		Область <i>C</i>	
		Пар	Жидкость	$T < T_c$	$T > T_c$
<i>T</i> , К	273 – 373	388 – 643	372 – 646,7	473 – 647	650 – 891
<i>p</i> , МПа	0,1 – 1189	0,17 – 21	0,1 – 22	1,6 – 500	9 – 582
ρ , кг/м ³	958 – 1252	1 – 201	377 – 960	503 – 1055	32 – 933
ε	55 – 107	1 – 3	9 – 56	10 – 46	1,2 – 25

В большинстве опытов величина ε определялась методом колебательного контура на частотах порядка 1 МГц, заявленная в экспериментальных работах погрешность величин ε равна $0,004 \div 0,5\%$.

При параметрах, отвечающих критическому состоянию $\varepsilon_c = 5,36$ [5]. При температурах от 500 до 640 К на пограничной кривой (давлениях от 2,6 до 20,2 МПа), характерных для работы парогенератора и входных ступеней турбины, значения ε пара составляют от 1,2 до 2,8 и воды от 30,5 до 10 соответственно. Для более низких температур (выходные ступени турбины, конденсатор) при температурах примерно 300 К на линии насыщения для жидкости $\varepsilon = 76$.

В разное время предлагались достаточно сложные соотношения, обобщающие экспериментальные данные по диэлектрической проницаемости воды. Международной ассоциацией по свойствам воды и водяного пара (МАСВВП) в 1997 г. принято в качестве стандарта уравнение, обобщающее массив данных, представленное в [5]. Это уравнение сложно по форме и неудобно для практических расчетов. Среднеквадратическое отклонение (СКО) опытных величин от значений, рассчитанных по уравнению МАСВВП, составляет 2,6% при надежности 0,95.

В работе [3] Ю. В. Мулёвым и С. Н. Смирновым высказано предположение о зависимости диэлектрической проницаемости главным образом от одного параметра – отношения плотности среды в данном состоянии к абсолютной температуре ρ/T , как для однофазных состояниях, так и для пограничных кривых пар - жидкость. В соответствии с этим в настоящей работе выполнено такого типа обобщение всего массива имеющихся данных по ε воды и водяного пара (рис. 1). Поскольку рассматривается только одно вещество (вода), то при обобщении приведенные параметры не применялись.

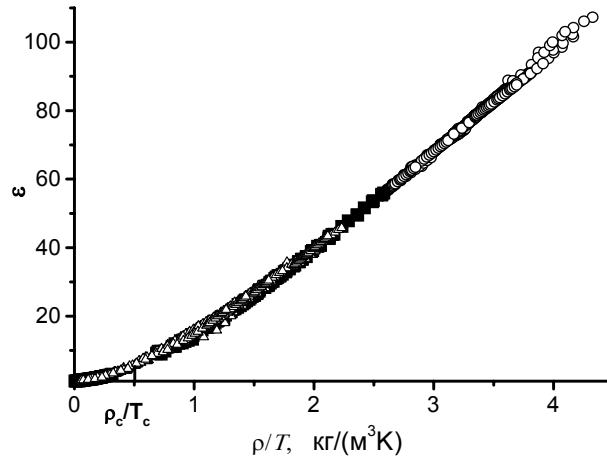


Рис.1. Зависимость экспериментальных данных по диэлектрической проницаемости ϵ воды и водяного пара, представленных в [3], от параметра ρ/T в трех областях термодинамического состояния: \circ – в области A , \blacksquare – в области B и \triangle – в области C ; ρ_c и T_c – плотность и температура в критической точке.

Представленные на рис.1 результаты подтверждают справедливость приближенной однопараметрической зависимости $\epsilon=f(\rho/T)$ в широком диапазоне изменения параметров состояния. Интервал изменения параметра ρ/T , отвечающий области A , составляет $2,6 \div 4,2$ кг/(м³·К), области B – $0,03 \div 2,6$ кг/(м³·К), области C – $0,03 \div 2,2$ кг/(м³·К). При $\rho/T < 0,5$ расположены точки, отвечающие насыщенному пару (область B) и однофазному состоянию при температуре, выше критической T_c (область C), при $\rho/T > 0,5$ располагаются точки, соответствующие жидкости в состоянии насыщения (область B), однофазному состоянию при $T < T_c$ (области C) и жидкой воде (область A).

Данные, представленные на рис. 1 обобщены зависимостью, которая имеет вид:

$$\epsilon = 1 + \sum_{i=1}^{10} A_i (\rho/T)^i, \quad (1)$$

Коэффициенты A_i (табл. 1) найдены методом линейной регрессии.

Таблица 2 . Коэффициенты A_i уравнения (4)

i	A_i	i	A_i
1	4,535638	6	-72,5217
2	-6,931894	7	24,64692
3	78,17505	8	-5,041228
4	-140,0863	9	0,5696744
5	130,8380	10	-0,02732318

Величина среднеквадратического отклонения (СКО) экспериментальных значений ϵ от сглаженных для всего массива точек составила 2,85% при надежности 0,95. Отклонения опытных точек от значений, рассчитанных по зависимости (1) иллюстрирует рис. 2.

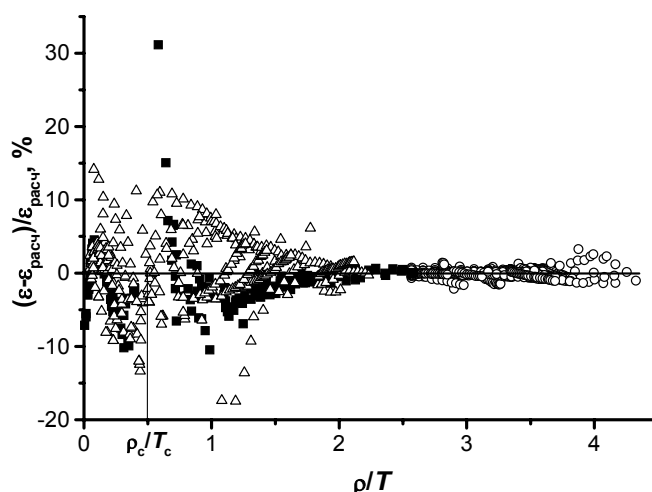


Рис. 2. Отклонения экспериментальных данных по диэлектрической проницаемости воды и водяного пара от значений, рассчитанных по уравнению (1) в интервале параметра $0,03 < \rho/T < 4,2$ в трех областях термодинамического состояния: ○ – в области *A*, ■ – в области *B* и Δ – в области *C*.

Эти отклонения имеют примерно такие же значения, как для уравнения МАСВВП. Так, 33 опытных значений ϵ , расположенных в окрестности критической точки на пограничной кривой, а также при температуре $T > T_c$ (в области *C*) отличаются от рассчитанных по уравнению (1) на величину более 9%, что может быть связано с невысокой точностью их экспериментального определения.

Вдоль линии насыщения разброс данных увеличивается как со стороны жидкости, так и со стороны пара при приближении к значению $\rho_c/T_c \approx 0,5$ (ρ_c – критическая плотность воды). В области *C* (пар) отклонения опытных данных от расчетных растут с увеличением температуры, начиная с изотермы 623 К, что соответствует значениям параметра $\rho/T \leq 1,3$.

Таким образом, сопоставление обобщений МАСВВП и (1), полученных с использованием одного и того же массива опытных данных подтверждает возможность применения упрощенной модели представления ϵ как функции отношения плотности к температуре при сохранении точности описания.

Соотношение (1), также как и соотношение МАСВВП позволяет рассчитать значения ϵ в координатах температура и давление в изученных областях термодинамического состояния. Однако так как эти соотношения одновременно

охватывают значения ε для всех состояний, включая окологритическую область, они имеют повышенную погрешность.

Наибольший практический интерес особенно для атомной энергетики представляют области термодинамического состояния, в достаточной мере удаленные от критической точки. Поэтому выполнены дополнительные обобщения величин ε в отдельных областях состояний.

Из имеющегося массива данных наименьший разброс имеют опытные значения ε жидкой воды при атмосферном давлении ($p=0,1$ МПа). Набор этих данных (186 значений) в интервале температур от 273 до 373 К и параметра ρ/T от 2,5 до 3,7 аппроксимирован с СКО 0,18 % при надежностью 0,95 полиномом

$$\varepsilon = -15,51941 + 26,36151\rho/T + 0,520455(\rho/T)^2. \quad (2)$$

Особенно важно представить корреляцию опытных данных по диэлектрической проницаемости на пограничной кривой для жидкости и пара (область *B*). Для диэлектрической проницаемости пара ε'' (95 значений) в интервале температур от 388 до 643 К, плотностей от 1 до 200 кг/м³ и параметра ρ/T от 0,025 до 0,31 получен полином:

$$\varepsilon'' = 1 + 3,4827 \rho/T + 22,154(\rho/T)^2 - 164,53(\rho/T)^3 + 676,96(\rho/T)^4 - 923,56(\rho/T)^5. \quad (3)$$

с СКО=0,8 % при надежности 0,95.

Для диэлектрической проницаемости жидкости ε' (111 значений) в интервале температур от 372 до 640 К, плотностей от 484 до 960 кг/м³ и параметра ρ/T от 0,76 до 2,6 получен полином:

$$\varepsilon' = 0,9626 + 4,9898 \rho/T + 9,9993(\rho/T)^2 - 1,4296 (\rho/T)^3. \quad (4)$$

с СКО=1,3 % при надежности 0,95.

На рис. 3 представлены опытные данные по ε'' и ε' , а также расчетные кривые, обобщающие.

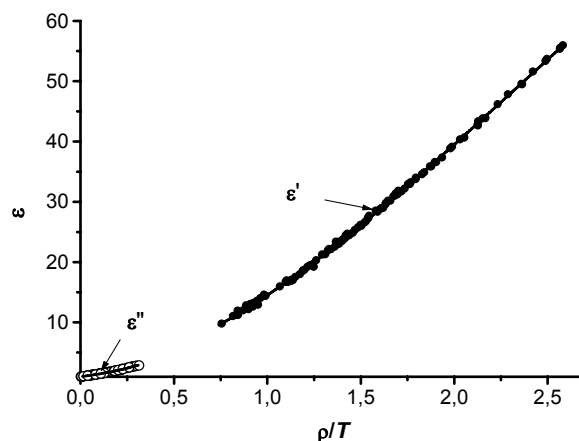


Рис. 3. Опытные данные по диэлектрической проницаемости водяного пара: \circ и \bullet – опытные данные по ε'' и ε' , соответственно, сплошные кривые – расчет по полиномам (3) и (4)

Полученные результаты показывают, что полиномы (3) и (4) имеют погрешность обобщения меньше, чем корреляция (1), что особенно важно для практического применения в тепловой и атомной энергетике.

Вследствие значительной разности диэлектрических проницаемостей фаз (до 100 раз) ε влажного пара может однозначно характеризовать влажность двухфазного состояния. Это свойство использовал А.В. Головин (МЭИ) [2] для разработки прибора, предназначенного для измерения локальной влажности пара диэлькометрическим методом.

В дальнейшем анализе примем, что жидкая фаза в зоне измерений равномерно распределена в насыщенном паре. В [1] приводится соотношение, связывающее диэлектрическую проницаемость влажного пара ε с диэлектрическими проницаемостями фаз и их объемными содержаниями, которое при переходе к массовым долям можно переписать в виде

$$\varepsilon = \varepsilon'(1-x) \frac{\rho}{\rho'} + \varepsilon''x \frac{\rho}{\rho''}, \quad (5)$$

где x – степень сухости пара (относительное массовое паросодержание), ρ , ρ' и ρ'' – плотности двухфазной среды, воды на линии насыщения и сухого водяного пара, соответственно, которые связаны известным соотношением

$$\frac{1}{\rho} = \frac{x}{\rho''} + \frac{1-x}{\rho'}. \quad (6)$$

Соотношения (5) и (6) позволяют рассчитать степень сухости пара, если измерить значения ϵ двухфазной среды и знать при заданной температуре ϵ' и ϵ'' из опытных данных или их обобщений, например, (3) и (4), а ρ' и ρ'' – из справочных данных. Такой подход был использован в [1, 2] при измерении степени сухости пара двухфазной среды для малых содержаний жидкой фазы.

В настоящей работе рассматривается возможность определения степени сухости водяного пара следующим образом. Приведенное выше обобщение значений ϵ'' (3) позволяет предположить, что опытное значение ϵ двухфазной среды, когда $\epsilon < 5$ при не очень большом влагосодержании, можно нанести на кривую $\epsilon'' = f(\rho/T)$ (рис. 3) и определить соответствующий параметр ρ/T , значение которого с достаточным приближением будет отвечать двухфазной смеси. Рассчитав, таким образом, плотность двухфазной среды, по соотношению (6) находим значение x .

Ю.В. Мулев и В.В. Кравец провели исследование диэлектрической проницаемости воды в области двухфазного состояния воды для пяти изотерм в интервале температур от 427 до 475 К (от давлений 0,53 до 1,6 МПа), степени сухости пара от сухого насыщенного водяного пара до $x=0,2$ [6]. В опытах перегретый водяной пар определенного расхода подавался в теплообменник. По мере охлаждения пар становился насыщенным и далее в потоке пара образовывались капли. Паросодержание смеси определялось калориметрическим способом. Величина ϵ определялась методом колебательного контура на частотах 1-5 МГц. Для примера для двух крайних изотерм (при давлениях 0,53 и 1,6 МПа) на рис. 4 представлены отклонения опытных данных по ϵ в двухфазной области от расчетов, проведенных двумя указанными выше способами.

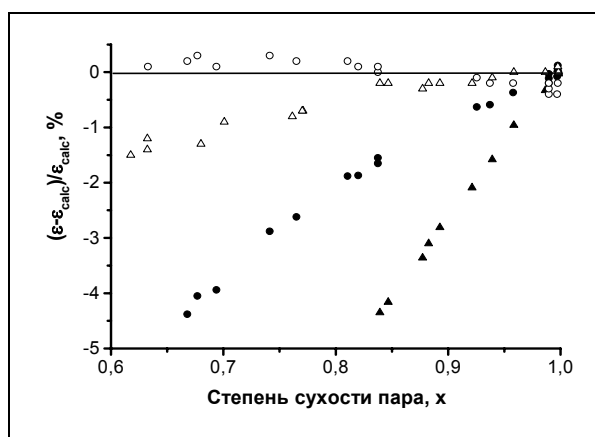


Рис. 4 Отклонения опытных значений ϵ воды в области двухфазного состояния [6] от величин, рассчитанных по соотношениям (3) и (5) [1] в интервале x от 0,6 до 1: ○ и Δ – отклонения опытных данных от расчета по полиному (3) при давлениях 0,53 и 1,6 МПа, соответственно; ● и ▲ – отклонения этих же данных от расчета по полиному (5) [1]

Как видно из рис. 4, данные расчета по предлагаемому нами способу в интервале значений степени сухости пара от 1 до 0,8 в пределах около 1% согласуются с опытными значениями ϵ воды в области двухфазного состояния, что позволяет сделать вывод о

справедливости принятого выше допущения. Отклонение расчетных величин, полученных по соотношению (5) [1] от опытных данных воды в области двухфазного состояния в пределах рассматриваемых параметров состояния достигают 4,5 %. Для других трех изотерм [6] отклонения опытных и расчетных данных расположены в интервале отклонений, полученных для двух крайних изотерм. Расчеты также показали, что для обоих вариантов расчета при более высокой влажности пара ($x < 0,8$) отклонения возрастают.

Область изменения x от 1 до 0,8 полностью перекрывают все потребности энергетики. Проведенный анализ свидетельствует, что для области, охватывающей нужды энергетики можно использовать измерения диэлектрической проницаемости в двухфазной среде с применением зависимости $\epsilon = f(\rho/T)$ для определения степени сухости пара.

В заключение отметим, что в целом проведенный анализ можно рассматривать, как обоснование способа контроля степени сухости водяного пара на основе измерений диэлектрической проницаемости в условиях работы агрегатов и оборудования тепловых и атомных станций. Для надежного применения в энергетике необходимо более детальное экспериментальное исследование диэлектрической проницаемости как жидкой воды и водяного пара, так и пароводяных смесей в двухфазной области, включая низкие паросодержания в области низких температур. Необходима также разработка эффективных конструкций датчиков для измерения диэлектрической проницаемости воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дейч М.Е., Филлипов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергия. 1968. 423 с.
2. Головин В.А., Занин АИ., Казинцев Ф.В. Методика исследования моделей последних ступеней турбин на влажном паре. // Теплоэнергетика, 1965, № 3.
3. Мулёв Ю.В. Смирнов С.Н. Методика расчета диэлектрической проницаемости воды до 923 К и 1 ГПа // Теплофизика высоких температур. 1992. № 1. С. 58–68.
4. A database for the static dielectric constant of water and steam / D.P. Fernandez, Y. Mulev, A.R.H. Goodwin, J.M.N. Levelt Sengers. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1995. Vol. 24. No 1. P. 33–69.
5. A Formulation for the Static Permittivity of Water and Steam at Temperatures from 238 K to 873 K at Pressures up to 1200 MPa, Including Derivatives and Debye-Huckel Coefficients / D.P. Fernández, A.R.H. Goodwin, E.W. Lemmon et al. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1997. Vol. 26. P. 1125–1166.
6. Mulev Y.V., Kravec V.V. Dielektrische eigenscaften der feuchten wasserdampfes. - Междунар.конференция: Измерения в теплоэнергетическом оборудовании, Дрезден, 1989, с.68-69.