

## УНИВЕРСАЛЬНАЯ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА ОТ ОТНОШЕНИЯ ПЛОТНОСТИ К ТЕМПЕРАТУРЕ

Доктора техн. наук, профессора МУЛЁВ Ю. В., АРЕФЬЕВ К. М.,  
канд. техн. наук, доц. БЕЛЯЕВА О. В., инж. МУЛЁВ М. Ю., ЗАЯЦ Т. А.

*НПО «ЮМАС» (г. Москва),  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны»  
НАН Беларуси*

Плотность воды и водяного пара, а также такие свойства, как влажность (сухость) энергоносителя, являются предметом многих исследований. Актуальность измерений этих свойств обусловлена тем, что для жидкой воды и водяного пара при фазовых переходах температура и давление рабочего тела взаимосвязаны. Эти параметры не отражают полностью термодинамическое состояние теплоносителя, которое в теплоэнергетических установках изменяется от жидкого до газообразного, достигая по температуре существенного перегрева. Основное время пребывания в энергетическом оборудовании рабочее тело находится в состоянии фазовых переходов, параметры которых недостаточно контролируются в промышленных условиях. В теплоэнергетике оценка термодинамических параметров теплоносителя осуществляется при переходе в состояние перегрева, т. е. с большим транспортным запаздыванием. Например, в прямоточном парогенераторе температура пара обычно измеряется только в пароперегревателе. Для разработки систем измерения плотности водного теплоносителя необходимо располагать значениями свойств, которые должны быть однозначно связаны с плотностью и температурой.

Из анализа экспериментальных работ по двухфазным потокам следует, что методы диагностики, основанные на измерении электрофизических параметров, являются наиболее распространенными и универсальными способами исследования локальных характеристик пароводяных потоков. Относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  – электрофизическое свойство, которое используется при диагностике состояния водного теплоносителя [1–4 и др.]. С помощью этого метода проводятся работы по определению размеров паровых включений или водных вкраплений [1, 4], локальных толщин пристенных пленок [3], интегрального паросодержания [5] и др.

В промышленных условиях диэлектрическая проницаемость использовалась в качестве основного задающего параметра на регуляторах топлива прямоточных парогенераторов [6, 7]. Успешно внедрены системы диагностики водного теплоносителя на основе диэлектрической прони-

цаемости в пусковых режимах прямоточных парогенераторов [8–11], когда с целью исключения попадания воды на раскаленные поверхности конвективного пароперегревателя контролировалась влажность сбрасываемого в конденсатор отсепарированного пара и таким образом предотвращались существенные тепловые потери.

Актуально измерение плотности и влажности водного теплоносителя в условиях энергооборудования АЭС, в котором водяной пар не переходит в перегретое состояние. В результате в турбине при понижении температуры существенно повышается влажность пара, что угрожает надежности работы турбоустановки. В настоящее время в рамках программы «Научное сопровождение развития атомной энергетики в Республике Беларусь» авторы статьи проводят подготовительные работы с целью обеспечения диагностики состояния водного теплоносителя на основе диэлектрической проницаемости в условиях АЭС.

Для разработки систем диагностики водного теплоносителя на основе диэлектрической проницаемости в двухфазном состоянии необходимо определение для этого состояния вида зависимости  $\epsilon$  от плотности (влажности, сухости). Разработка такой зависимости с учетом структурных сложностей исследований двухфазных потоков подразделена на этапы.

Первым этапом определена задача разработки представительного и удобного для практического применения уравнения расчета  $\epsilon$  для воды и водяного пара в однофазных состояниях, а также разработка основ модели расчета диэлектрической проницаемости пароводяных смесей.

Массив данных по  $\epsilon$  воды, состоящий из 1221 опытной точки, полученной в 35 работах за 1930–1995 гг., и представленный в [12] в трех областях термодинамического состояния: области *A* – жидкая вода при температурах ниже нормальной точки кипения (618 точек); области *B* – вода и пар в состоянии насыщения (205 точек); области *C* – однофазное состояние выше нормальной точки кипения (398 точек, из них 141 – опытные данные при  $T < T_c$ ), иллюстрирует рис. 1.

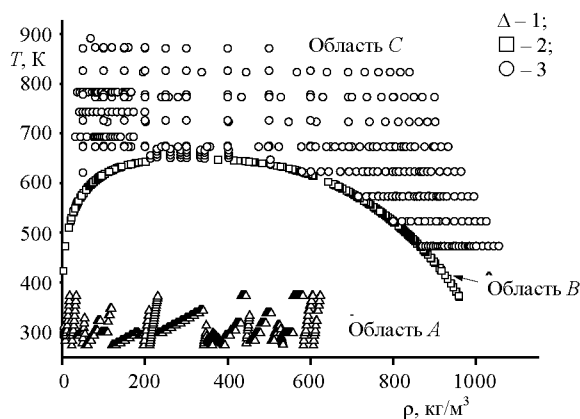


Рис. 1. Экспериментальные данные по диэлектрической проницаемости водного теплоносителя в трех областях термодинамического состояния: 1 – область *A*; 2 – *B*; 3 – *C*

Для значений  $\epsilon$  скелетное уравнение вида [13] предложено в 1976 г.

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 1 + A_1 + c\rho/T + (A_2c/T + A_3 + A_4T/c)\rho^2 + \\ & + (A_5c/T + A_6T/c + A_7T^2/c^2)\rho^4 + (A_8c^2/T^2 + A_9c/T + A_{10})\rho^4, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $c$  – постоянная;  $A_1 - A_{10}$  – эмпирические коэффициенты.

Зависимость диэлектрической проницаемости воды и водяного пара от температуры и плотности описана уравнением следующего вида [14] в 1980 г.:

$$\varepsilon = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^4 e_{ij} T^i \rho^j, \quad (2)$$

где  $T$ ,  $\rho$  – температура и плотность;  $e_{ij}$  – эмпирические коэффициенты.

В 1997 г. весь набор экспериментальных данных по  $\varepsilon$  воды и водяного пара группой исследователей под руководством Anneke Sengers был описан уравнением [15], в последующем принятым МАСВВП (Международной ассоциацией по свойствам воды и водяного пара) и утвержденным в качестве стандарта. Для этого использована формула [16], развитая в [17]:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{N_A \rho}{3} \left[ \frac{a}{\varepsilon_0} + \frac{g \mu^2}{3kT\varepsilon_0} \frac{9\varepsilon}{(2\varepsilon + 1)(\varepsilon + 2)} \right], \quad (3)$$

где  $\varepsilon_0$ ,  $N_A$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $k$  – известные постоянные;  $g$  – фактор Кирквуда, определяющий взаимодействие молекул и аппроксимированный уравнением следующего вида:

$$g = 1 + \sum_{h=1}^{11} N_h (\rho/\rho_c)^{i_h} (T/T_c)^{j_h} + N_{12} (\rho/\rho_c) \left( \frac{T}{228} - 1 \right)^{-1,2}.$$

Здесь  $N_h$ ,  $i_h$ ,  $j_h$  – эмпирические коэффициенты;  $\rho_c$ ,  $T_c$  – плотность и температура в критической точке (константы).

Формула (3) лучше других в настоящее время описывает существующие данные по  $\varepsilon$  воды и водяного пара. Однако для практических инженерных приложений приведенные выше двухпараметрические соотношения довольно сложны по форме и затруднительны в оперативных расчетах.

На рис. 2 представлены при различных температурах отклонения экспериментальных данных по диэлектрической проницаемости воды и водяного пара от значений, рассчитанных по уравнению МАСВВП в трех областях термодинамического состояния:  $A$ ,  $B$  и  $C$ .

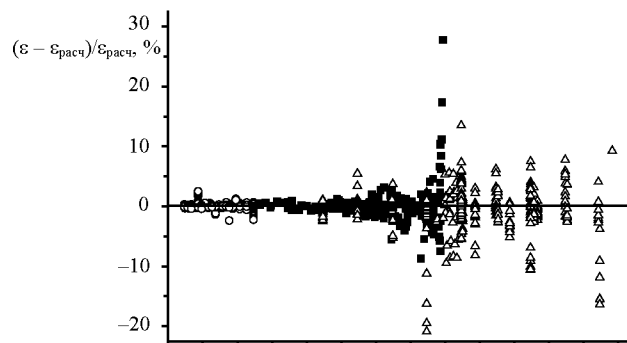


Рис. 2. Отклонения экспериментальных данных по диэлектрической проницаемости воды и водяного пара от значений, рассчитанных по уравнению МАСВВП в трех областях термодинамического состояния (обозначения те же, что на рис. 1)

Среднеквадратическое отклонение (СКО)  $\sigma$  опытных величин от значений, рассчитанных по уравнению МАСВВП, составляет 2,6 % с надежностью 0,95. Заявленная в оригинальных работах погрешность экспериментальных величин  $\varepsilon$  определена в пределах 0,004–0,500 %. Из рассмотренного массива данных 32 опытные точки отличаются от значений, вычисленных по уравнению МАСВВП, на величину, большую  $3\sigma$ . В разных областях термодинамических параметров характер отклонений отличается. В области *A* (жидкость,  $T \leq 373,2$  К) массив точек согласуется между собой в пределах  $\pm 1$  % с надежностью 0,95. На пограничных кривых (область *B*) при  $T < 640$  К опытные данные обобщаются уравнением МАСВВП с отклонениями в пределах  $\pm 2$  %. Наибольшее различие опытных данных от расчетных, достигающее 27 %, наблюдается вблизи критической температуры. Большой разброс имеют также опытные данные, расположенные в области *C* при  $T > T_c$  (рис. 2), что может быть связано, в первую очередь, со сложностью эксперимента в этой области параметров и соответственно с увеличением погрешности измерений. Таким образом, погрешность табличных данных, рассчитанных по уравнению МАСВВП, в различных интервалах параметров состояния существенно различается. Ошибка расчетных данных увеличивается с приближением к критической температуре и достаточно высока по сравнению с точностью измерений в области сверхкритических температур.

В [18 и др.] предложена концепция зависимости диэлектрической постоянной от одного параметра – отношения плотности к температуре как в однофазных состояниях, так и на пограничных кривых, а также в состоянии льда и переохлажденной воды, но не проведена детальная математическая обработка экспериментальных данных и не предложено единое уравнение, описывающее эту концепцию. Кроме этого, автор был ограничен массивом экспериментальных данных из-за недоступности для отечественных исследователей многих источников информации.

Экспериментальные данные по  $\varepsilon$  воды и водяного пара, собранные из различных источников в наиболее полной и фундаментальной работе [12], как функцию одного параметра отношения плотности к температуре представляет рис. 3.

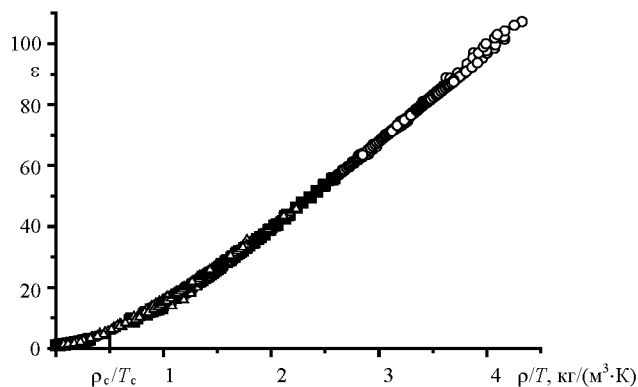


Рис. 3. Зависимость экспериментальных данных по диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  воды и водяного пара, представленных в [12], от параметра  $\rho/T$  в трех областях термодинамического состояния (обозначения те же, что на рис. 1)

Наличие однопараметрической зависимости  $\varepsilon = f(\rho/T)$  в широком диапазоне энергетических параметров качественно подтверждает рис. 3. Как видно, интервал параметра  $\rho/T$ , отвечающий области *A*, составляет 2,6–4,2 кг/(м<sup>3</sup>·К), области *B* – 0,03–2,6, области *C* – 0,03–2,2 кг/(м<sup>3</sup>·К). Таким образом, имеются диапазоны параметра  $\rho/T$ , где опытные данные, полученные в областях *B* и *C*, а также *A* и *B*, накладываются друг на друга. В интервале параметра  $\rho/T < 0,5$  расположены точки, отвечающие насыщенному пару и области *C* при *T*, больше критической температуры *T<sub>c</sub>*. В интервале  $\rho/T > 0,5$  находятся точки, соответствующие жидкости в состоянии насыщения, а также областям *C* и *A*. Отмеченное совпадение величин  $\varepsilon$  при одинаковых значениях параметра  $\rho/T$ , но при разных фазовых состояниях (областях *A*, *B* и *C*) водного теплоносителя отражает влияние переменного электрического поля на изменение связей молекул и их ассоциатов при возникновении емкостной проводимости.

При построении обобщающей зависимости в координатах  $\varepsilon - \rho/T$  использован массив экспериментальных данных (1221 опытная точка), представленный в [12] в трех областях термодинамического состояния: *A*, *B* и *C*. Уравнение, описывающее представленный массив, имеет вид

$$\varepsilon = \sum_0^6 A_i \rho / T^i. \quad (4)$$

Коэффициенты  $A_i$  найдены методом линейной регрессии. Семь коэффициентов (4) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты  $A_i$  (4) (вариант 1)

$n$	$A_i$	$n$	$A_i$
0	1,100744	4	3,749635
1	1,266516	5	-0,6947798
2	20,48834	6	0,05167109
3	-10,88060		

Величина среднеквадратического отклонения экспериментальных значений  $\varepsilon$  от сглаженных для всего массива точек составила 2,97 % с надежностью 0,95. С целью повышения точности описания в проводимых исследованиях было увеличено количество постоянных коэффициентов до 11 (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты  $A_i$  (4) (вариант 2)

$I$	$A_i$	$I$	$A_i$
0	1,000	6	-72,5217
1	4,535638	7	24,64692
2	-6,931894	8	-5,041228

3	78,17505	9	0,5696744
4	-140,0863	10	-0,02732318
5	130,8380		

В результате СКО расчета по (4) с 11 коэффициентами из табл. 2 составило 2,86 %. Характер отклонений опытных точек от значений, рассчитанных по соотношению (4) с коэффициентами из табл. 1, фактически повторяет картину, представленную на рис. 2, а именно 33 опытных значения  $\epsilon$ , расположенных в окрестности критической точки на пограничной кривой, а также при  $T > T_c$  (в области  $C$ ), отличаются от рассчитанных по (4) на величину, большую 9 %. Причем из них 16 экспериментальных точек выпадают одновременно из обобщения по уравнению МАСВВП и по (4).

Увеличение в уравнении (4) коэффициентов с 7 до 11 не приводит к существенному повышению точности описания экспериментальных данных (СКО 2,97 и 2,86 %).

На рис. 4 представлены при различных значениях параметра  $\rho/T$  отклонения экспериментальных данных по диэлектрической проницаемости воды и водяного пара от значений, рассчитанных по (4), в трех областях термодинамического состояния:  $A$ ,  $B$  и  $C$ .

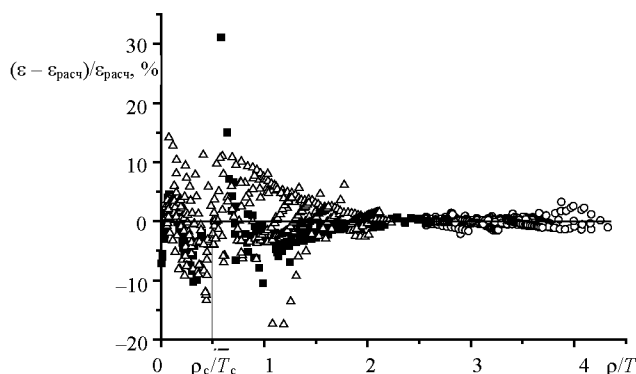


Рис. 4. Отклонения экспериментальных данных по диэлектрической проницаемости воды и водяного пара от значений, рассчитанных по (4), в интервале параметра  $0,03 < \rho/T < 4,2$  в трех областях термодинамического состояния (обозначения те же, что на рис. 1)

На линии насыщения разброс данных увеличивается с приближением к значению  $\rho_c/T_c \approx 0,5$  со стороны как жидкости, так и пара (рис. 4). В области  $C$  отклонения опытных данных от расчетных растут с увеличением температуры, начиная с изотермы 623 К, что соответствует значениям параметра  $\rho/T \leq 1,3$  (рис. 2, 4).

Таким образом, выполненные нами обобщения существующего массива опытных данных по диэлектрической проницаемости водного теплоносителя в жидком и газовом состояниях показали возможность применения упрощенной модели представления  $\epsilon$  как однопараметрической функции отношения плотности к температуре. Предложенная методика расчета диэлектрической проницаемости, принципиально отличающаяся от известных, согласуется с международным уравнением МАСВВП [15]. Предложенная методика расчета  $\epsilon$  имеет несколько большую (2,86 %) по сравнению с уравнением МАСВВП [15] (2,6 %) погрешность, что компенсируется

простотой и наглядностью методики, а также открывающимися возможностями более широкой трактовки предложенной зависимости.

На зависимости  $\varepsilon = f(\rho/T)$  для всего существующего массива экспериментальных данных расслоение по фазовой составляющей не наблюдается. Это позволяет утверждать возможность использования однопараметрической зависимости для описания опытных данных как в однофазных областях, так и на линиях фазового перехода, т. е. об ее универсальности.

По характеру зависимости, представленной на рис. 3, можно видеть, что влияние отношения плотности к температуре на диэлектрическую проницаемость в разных интервалах изменения этого параметра отличается. Начиная с  $\varepsilon = 1$  в паровой фазе, когда вещество можно рассматривать как набор автономных молекул, снижение температуры или рост плотности приводит практически к линейному росту диэлектрической проницаемости. Такой же характер изменения  $\varepsilon$  наблюдается для жидкой воды с низкой плотностью. После прохождения окологривической области, т. е. в интервале  $\rho/T = 4,5-6,5 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ , рост плотности или снижение температуры также практически пропорционально связаны с  $\varepsilon$ . В этой области можно предположить, что вид зависимости индицирует влияние водородных связей на значение диэлектрической проницаемости.

Но здесь изменение параметра  $\rho/T$  зависимости  $\varepsilon = f(\rho/T)$  приводит к более существенному изменению  $\varepsilon$  по сравнению с паровой областью. Такой же характер изменения диэлектрической проницаемости практически сохраняется и для всех известных экспериментальных максимальных значений  $\varepsilon$  воды при высоких давлениях, переохлажденной воды, льдов разных модификаций. Это может стать дополнительной информацией для анализа взаимодействия молекул воды и их ассоциатов при разных энергетических параметрах в паровом, жидком и твердом состояниях.

Однопараметрическая зависимость диэлектрической проницаемости водного теплоносителя позволяет строить тарировочные кривые для диагностических систем. Из предложенной зависимости, зная измеряемую полезную (в вакууме) электрическую емкость первичного преобразователя, при учете температуры (для пароводяных состояний давление и температура взаимосвязаны) по измеренному значению электрической емкости определяется плотность. В современных измерительных системах ввод компенсационного сигнала по температуре или давлению не вызывает больших проблем. В результате могут открываться новые возможности для создания современных систем контроля и измерения теплотехнических параметров.

Представленная однопараметрическая зависимость диэлектрической проницаемости позволяет сравнивать значения  $\varepsilon$  водного теплоносителя, полученные в разных фазовых состояниях: жидком и паровом, включая состояния насыщения. Применение нескольких различающихся по принципу построения методик расчета диэлектрической проницаемости позволяет обоснованно исключить из расчетов промахи в результатах экспериментальных исследований.

Анализ результатов расчета по предложенной методике, а также по методике МАСВВП [15] показывает, что в массиве данных [12] даже для однофазных областей наблюдается существенный разброс данных, что можно объяснить в ряде случаев несовершенством измерительной техники

(1927–1939 гг.). Очень большой разброс (до 27 %) наблюдается в околокритической области. Поэтому дальнейшее совершенствование методики расчета (для уменьшения СКО) целесообразно проводить после получения новых достоверных экспериментальных данных для воды и водяного пара с соответствующей точностью.

Также можно предположить, что если зависимость  $\varepsilon = f(\rho/T)$  распространяется на сухой насыщенный пар и кипящую воду, как это следует из приведенного выше материала, то указанная зависимость может распространяться и на влажный водяной пар. Это предположение позволит непосредственно связать измеряемую диэлектрическую проницаемость водяного пара с его степенью сухости, т. е. параметром, измерение которого является большой проблемой для многих приборостроителей. Предположение о применимости рассматриваемой однопараметрической зависимости диэлектрической проницаемости воды и водяного пара в области двухфазных сред требует отдельного детального исследования. Такие исследования входят в планы работы авторов настоящей статьи.

## ВЫВОД

В результате анализа существующего массива экспериментальных данных представлена универсальная однопараметрическая зависимость диэлектрической проницаемости воды и водяного пара в однофазных областях, а также на пограничных кривых от отношения плотности к температуре.

## ЛИТЕРАТУРА

1. К р а с ч е т у газосодержания смеси при пузырьковом течении по данным измерения резистивным и емкостным методами / В. И. Субботин [и др.] // Теплоэнергетика. – 1975. – № 4. – С. 70–75.
2. Д е й ч, М. Е. Исследование полей влажности в ступенях с длинными лопатками с помощью электрического метода измерения локальной влажности пара / М. Е. Дейч, В. А. Головин // Научные труды ЦКТИ. – 1966. – Вып. 65. – С. 33–37.
3. М е т о д и к а измерения толщины и волновых характеристик поверхности жидкой пленки в пароводяном потоке / Б. И. Нигматулин [и др.] // Теплофизика высоких температур. – 1982. – Т. 20, № 6. – С. 1145–1152.
4. С в и с т у н о в, Е. П. Электронзондирование высокотемпературного пароводяного потока / Е. П. Свистунов, Б. П. Голубев, Ю. Д. Пигилов // Теплоэнергетика. – 1980. – № 3. – С. 67–69.
5. М у л ё в, Ю. В. СВЧ-метод диагностики двухфазного состояния водного теплоносителя / Ю. В. Мулёв, А. Ю. Мулёв // Теплоэнергетика. – 2009. – № 4. – С. 47–50.
6. С у д и л о в с к и й, В. К. Физические предпосылки использования сигнала по квазивлажности пара в системах регулирования прямоточных парогенераторов на сверхкритические параметры / В. К. Судилковский // Теплоэнергетика. – 1970. – Вып. 1. – С. 152–155.
7. С у д и л о в с к и й, В. К. Сигнал по влажности пара в системах регулирования прямоточных парогенераторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1968.
8. М у л ё в, Ю. В. Управление встроенными сепараторами прямоточных котлоагрегатов СКД на основе непосредственного сигнала по влажности отсепарированного пара: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Минск: БПИ, 1984.
9. М у л ё в, Ю. В. Особенности управления узлом встроенного сепаратора прямоточных котлоагрегатов / Ю. В. Мулёв // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1991. – № 11. – С. 97–100.



10. Щ е р б и ч, А. В. Совершенствование управления встроенными сепараторами прямоточных котлов мощных энергоблоков с использованием диэлькометрического метода измерения влажности водяного пара: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Минск: БПИ, 1990.
11. Г р у з е р б, Ю. Л. Совершенствование технологии и средств управления тепловым состоянием пароперегревателей прямоточных котлов в пусковых режимах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Минск: БПИ, 1991.
12. A d a t a b a s e for the static dielectric constant of water and steam / D. P. Fernandez [et al.] // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1995. – Vol. 24, № 1. – P. 33–69.
13. U e m a t s u, M. The static dielectric constant of water in range of temperature from 0 to 550 °C and pressure up to 5 kbar / M. Uematsu, W. Harder, E. U. Franck // International Association for the properties of water and steam. – Kyoto, Japan, 1976. – P. 32.
14. Л у к а ш о в, Ю. М. Исследование диэлектрической проницаемости H<sub>2</sub>O при температурах от 573 до 873 К и давлениях до 180 МПа / Ю. М. Лукашов, В. Н. Щербаков // Теплоэнергетика. – 1980. – № 3. – С. 70–71.
15. A F o r m u l a t i o n 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 [et al.] // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1997. – Vol. 26. – P. 1125–1166.
16. K i r k w o o d, J. G. The dielectric polarization of polar liquids / J. G. Kirkwood // J. Chem. Phys. – 1939. – Vol. 7, № 10. – P. 911–919.
17. H a r r i s, F. E. Pressure Dependence of the Constant of Water and the Volume Contraction of Water and n-Butanol upon Addition of Electrolyte / F. E. Harris, E. W. Haycock, B. J. Alder // J. Phys. Chem. – 1953. – Vol. 57, № 9. – P. 978–980.
18. М у л ё в, Ю. В. Методика расчета диэлектрической проницаемости воды до 923 К и 1 ГПа / Ю. В. Мулёв, С. Н. Смирнов // Теплофизика высоких температур. – 1992. – № 1. – С. 58–68.

Представлена научным семинаром  
лаборатории № 15  
ГНУ «ОИЭЯИ – Сосны» НАН Беларуси

Поступила 19.11.2010

УДК 532.526

## ПРОЦЕССЫ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТЕЙ В ТРУБОПРОВОДАХ И КАНАЛАХ

Докт. техн. наук, проф. **ЕСЬМАН Р. И.**,  
канд. техн. наук, доц. **ШУБ Л. И.**, инж. **ВАСИЛЬКОВСКИЙ Г. Б.**

*Белорусский национальный технический университет,  
ОАО «Темпобур» (г. Москва)*

Турбулентное течение в трубах реализуется при сверхкритических числах Рейнольдса. При переходе от ламинарного течения к турбулентному существенно изменяется структура потока. Это обусловлено тем, что на основное движение, происходящее вдоль оси трубы, накладывается поперечное движение частиц жидкости. Интенсивное перемешивание жидкости в поперечном направлении приводит к выравниванию профиля скорости по поперечному сечению трубы.

На рис. 1 приводится сопоставление профилей безразмерной скорости для ламинарного и турбулентного течений в круглой трубе при одинаковом расходе. Профиль скорости по поперечному сечению сглаживается и