http://dx.doi.org/10.15589/jnn20140307 УДК 681.518:004.67

O-75

SPECIFIC FEATURES OF LIQUID LEVEL ALTERATION IN SPENT NUCLEAR FUEL POOL

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В БАССЕЙНЕ ВЫДЕРЖКИ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Borys M. Hordeiev B.Gordeev@amico.ua ORCID: 0000-0001-7510-999X Oleksii V. Zivenko av@zivenko.com.ua ORCID: 0000-0002-1539-8360 Vasyl O. Zivenko va@zivenko.com.ua ORCID: 0000-0003-2086-1468 Yevhen A. Hudyma eugenegudima@gmail.com ORCID: 0000-0001-8073-9697 Dmytro Yu. Motorkin motorkin@amico.ua ORCID: 0000-0002-0239-0036 **Б. Н. Гордеев**, д-р техн. наук, доц.; **А. В. Зивенко**, канд. техн. наук; **В. А. Зивенко**, ст. преп.; **Е. А. Гудыма**, асп.; **Д. Ю. Моторкин**, асп.

National University of Shipbuilding, Mykolayiv

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Abstrasct. There is a problem of reliable and precise level measurement in the high temperature and humidity applications (such as cooling pond for spent nuclear fuel). The influence of high pressure and temperature of water and steam on the results of water level measurement by polymetric sensors in the cooling-down pond for spent nuclear fuel is examined. The formulation for the static permittivity of water and steam at high temperatures and pressures is used for the modelling of the signal propagation and estimation of the level measurement error. The equations for the level measurement error under extreme conditions are presented. The reflectors (special parts of the transmission line) are used for the correction of the level measurement error caused by the dielectric permittivity change (temperature and pressure change, humidity change in the cooling pond).

Keywords: level measurement, cooling-down pond, spent nuclear fuel.

Аннотация. Рассмотрено влияние избыточного давления и высокой температуры воды в бассейне выдержки отработавшего ядерного топлива на погрешность измерения уровня рефлектометрическими датчиками. Получены и проанализированы соотношения для оценки погрешности измерения уровня воды в бассейне выдержки в экстремальных условиях в случае коррекции по реперному отражателю.

Ключевые слова: измерение уровня, бассейн выдержки, отработавшее ядерное топливо.

Анотація. Розглянуто вплив надлишкового тиску і високої температури води в басейні витримки відпрацьованого ядерного палива на похибку вимірювання рівня рефлектометричними датчиками. Отримано і проаналізовано співвідношення для оцінки похибки вимірювання рівня води в басейні витримки в екстремальних умовах у разі корекції за реперним відбивачем.

Ключові слова: вимірювання рівня, басейн витримки, відпрацьоване ядерне паливо.

REFERENCES

- [1] Andrizhevskiy A.A., Trifonov A.G., Pronkevich T.Yu. Otsenka usloviy teploobmena v basseyne vyderzhki otrabotavshego yadernogo topliva s uchetom effekta ispareniya [Assessing the conditions of heat exchange in cooling-down pond of spent nuclear fuel, including the evaporation effect]. *Trudy BGTU. Khimiya i tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv BSTU Proceedings. Chemistry and Technology of Inorganic Substances*, 2012, no. 3, pp. 145–149.
- [2] Kalinkin V.I. *Khranenie otrabotavshego yadernogo topliva energeticheskikh reaktorov* [Storage of spent nuclear fuel from power reactors]. Saint Petersburg, VTD «VNIPIJeT» Publ., 2009. 107 p.
- [3] Podoprigora A.V., Sviridenko I.I., Moskalenko A.Yu. Otsenka effektivnosti ispolzovaniya basseyna vyderzhki i peregruzki topliva pri zaproektnykh avariyakh [Efficiency rating storage pool and refueling during design basis accidents]. *Reports of Dysnai Technical Section*. 2005.

№ 3 ■ 2014 ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ НУК

- [4] Zhukov Yu.D., Gordeev B.N., Zivenko A.V. et al. *Polimetricheskie sistemy: teoriya i praktika* [Polymetric systems. Theory and practice]. Nikolayev, Atoll Publ., 2012. 382 p.
- [5] *Priemochnye ispytaniya sredstv izmereniya urovnya vody v basseyne vyderzhki energobloka no.1 Rivnenskoy AES* (Acceptance testing means measuring the water level exposure unit no. 1 Rivnenskoj AJeS). Available at: http://sstc.kiev.ua.
- [6] Kataeva V. M. *Spravochnik po plasticheskim massam. Tom 1* [Handbook on plastic masses. Vol.1]. Moscow, Khimiya Publ., 1975. 448 p.
- [7] Mulev Yu. V., Arefev K. M., Belyaeva O. V. et al. Universalnaya odnoparametricheskaya zavisimost dielektricheskoy pronitsaemosti vody i vodyanogo para ot otnosheniya plotnosti k temperature [Universal one-parameter dependence of the dielectric constant of water and steam from the ratio of the density to the temperature]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obedineniy SNG – News of the higher educational institutions and energy associations of ISU, 2011, pp. 50–58.
- [8] *AREVA ispytala radarnyy urovnemer dlya izmereniya urovnya vody v basseynakh vyderzhki* (AREVA experienced radar sensor to measure the liquid level in the cooling-down ponds). Available at: http://www.atominfo.ru.
- [9] Brumbi D. Fundamentals of Radar Technology for Level Gauging. Berlin, KROHNE Publ., 2003, issue 4.
- [10] Fernández D.P. 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-Hückel coefficients. Paris, Phys Chem. Publ., 1997, pp. 1125–1166.
- [11] Using Guided Wave Radar for Level in High Pressure Steam Applications. Available at: http://www2.emerson-process.com.
- [12] Zivenko A.V., Nakonechnyy A.G., Motorkin D.Yu. Level measurement principles and sensors. *Materialy IX me-zinarodni vedecko-prackticka conference «Veda a technologie: krok do budoucnosti 2013»*. Prague, Technicke vedy Publ., 2013, pp. 85–90.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Существует большое количество прикладных задач, в которых непрерывному контролю подлежит уровень жидких сред в условиях постоянно изменяющихся давления и температуры.

Одним из таких приложений является контроль уровня воды в бассейне выдержки отработавшего ядерного топлива (БВ ОЯТ), поскольку в аварийных режимах работы могут наблюдаться экстремальные значения температур $T_{\text{max}} = 250$ °C и давлений Р_{тах} = 10 бар (рис. 1). При аварии на АЭС «Фукусима» БВ оказался ахиллесовой пятой АЭС, так как подавляющее большинство новых тепловыделяющих сборок (ТВС) находилось в БВ, а не в самом реакторе [1]. В результате утечки и выкипания воды в БВ ТВС оголяются и начинают плавиться, что может привести к взрывам [3]. В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ, выработанными в результате стрессовых тестов с учетом уроков аварии на японской АЭС «Фукусима-1», уровень воды, охлаждающей ОЯТ, подлежит обязательному контролю.

Оперативная информация о количестве воды в БВ должна непрерывно поступать в систему послеаварийного мониторинга для оценки ситуации в БВ и управления питающими насосами. Внедряемые сегодня и работающие системы мониторинга уровня воды в БВ состоят из различных средств измерения, например гидростатических, ультразвуковых или радарных уровнемеров, сигнализаторов уровня различных типов и т. д. [5, 8, 12]. Помимо высоких требований к надежности и точности применяемых средств измерений, к такому оборудованию предъявляется ряд дополнительных требований: нечувствительность к ионизирующему и электромагнитному излучениям, к воздействиям высокого давления и температуры, вибрации и т. д. Отдельно необходимо отметить требования к эксплуатационным характеристикам такие системы должны иметь длительные срок службы и межповерочный интервал. Одним из вариантов уровнемеров, удовлетворяющих всем требованиям к подобным системам, являются датчики рефлектометрического типа. Ключевыми преимуществами таких датчиков являются: высокая точность и отсутствие подвижных элементов, возможность размещения электронного блока на значительном удалении от объекта контроля (управляющий блок не подвержен воздействию ионизирующего излучения), простота, механическая прочность и надежность чувствительных элементов, удобство эксплуатации.

На рис. 2, *а* показан датчик коаксиальной конструкции l, установленный в резервуар 2 высотой H и частично погруженный в среду 3, уровень h которой подлежит контролю. Процесс формирования импульсного сигнала (см. рис. $2, \delta$) включает в себя: излучение коротких электромагнитных импульсов (длительностью от 0,5 нс), контактное зондирование этими импульсами исследуемой среды; прием и обработку совокупности излученных и отраженных импульсов с целью интерпретации сигнала – оценки уровня и других характеристик жидкости/процесса.



Рис. 1. Схема приреакторного бассейна выдержки отработавшего топлива ВВЭР-1000 [2]: *1* – круговой кран; *2* – траверса контейнера для ОЯТ; *3* – штанга для контейнера; *4* – транспортный контейнер; *5* – стеллажи БВ; *6* – перегрузочная машина

В чувствительный элемент 1, закрепленный на резервуаре 2, излучается короткий электромагнитный импульс, который распространяется вдоль линии и проходит через слой воздуха толщиной L_0 . Распространяясь вдоль линии, он частично отражается от границы раздела сред «воздух–среда»; преломленные импульсы продолжают распространяться вдоль коаксиальной линии через слой исследуемой среды толщиной L_1 . Отраженный от границы раздела сред

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА № 3 = 2014

импульс распространяется в обратном направлении, а по времени их запаздывания относительно опорного импульса t_0 можно определить расстояние до границы раздела сред:

$$L_0 = \frac{t_0 c}{2\sqrt{\varepsilon_0}},\tag{1}$$

где c – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме (скорость света); ε_0 – диэлектрическая проницаемость среды 0-го слоя.

В аварийных режимах работы свойства сред, через которые проходит излученный импульс, могут существенно меняться (воздействие избыточного давления, кипение воды в БВ, образование парогазовой смеси), что приведет к возникновению дополнительных неучтенных погрешностей.

ЦЕЛЬЮ РАБОТЫ является анализ влияния избыточного давления и высокой температуры среды, находящейся в контролируемом резервуаре, на полиметрический сигнал (рефлектограмму) и показания полиметрической системы, формирование способов снижения/устранения влияния данных факторов и уменьшения соответствующих погрешностей.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Основными факторами, определяющими дополнительную погрешность оценки уровня в БВ ОЯТ, являются: изменение свойств воздушного слоя, через который проходит электромагнитная волна, изменение формы отраженного от воды импульса вследствие изменения ее диэлектрической проницаемости (ДП). Поведение ДП слоя воздуха ε_{air} , находящегося под высоким давлением и при высокой температуре,



Рис. 2. Пояснение принципа действия рефлектометрических датчиков

№ 3 = 2014 ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ НУК

может быть описано уравнением [9]

$$\varepsilon_{air} = 1 + \left(\varepsilon_N - 1\right) \frac{T_N}{T} \frac{P}{P_N} , \qquad (2)$$

где ε_{air} – значение ДП среды при температуре *T* и давлении *P*; ε_{N} – значение ДП среды при температуре *T_N* (обычно 273 К) и давлении *P_N* (10⁵ Па), для воздуха ε_{N} = 1,00058986.

При высокой температуре начинается процесс парообразования в БВ, что значительно влияет на значение ДП рассматриваемого слоя. Для учета этого влияния могут быть использованы экспериментальные данные о воде в трех термодинамических состояниях (жидкая вода ниже нормальной точки кипения, вода и пар в состоянии насыщения и однофазного состояния выше нормальной точки кипения), обобщенные Международной ассоциацией по свойствам воды и водяного пара (МАСВВП) [7, 10]. Весь набор экспериментальных данных был описан уравнением, принятым МАСВВП в качестве стандарта:

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

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

$$g = 1 + \sum N_h \left(\frac{\rho}{\rho_c}\right)^{l_h} \left(\frac{T}{T_c}\right)^{l_h} + N_{12} \left(\frac{\rho}{\rho_c}\right) \left(\frac{T}{228} - 1\right)^{-1,2},$$

где N_h , i_h , j_h – эмпирические коэффициенты; ρ_c , T_c – плотность и температура в критической точке (константы).

Используя уравнения (2) и (3), были рассчитаны значения ДП воды в координатах температуры и давления для указанных условий (рис. 3).





Рис. 3. Значения ДП воды в зависимости от давления и температуры

На рис. 3,*а* отчетливо выделяются две области: первая соответствует фазе жидкой воды, а вторая – пароводяной смеси. Значение ДП пароводяной смеси ε_{vap} (см. рис. 3, δ) в указанных диапазонах изменения давления и температуры меняется в пределах от 1,102 до 1,118, при этом с повышением давления ε_{vap} возрастает, с ростом температуры – снижается.

Полученные данные используются при расчете волнового сопротивления датчика, заполненного водой/пароводяной смесью, скорости распространения электромагнитной волны в слоях и т. д. Абсолютная погрешность измерения расстояния до границы раздела двух сред ΔL_0 , обусловленная изменением ДП слоев (воздействие избыточного давления и высокой температуры ИДВТ) по сравнению с нормальными условиями (НУ) и погрешностью оценки временного интервала Δt_0 , может быть выражена как погрешность косвенных измерений:

$$\Delta L_{0} = \sqrt{\left(\frac{\partial L_{0}}{\partial t_{0}}\Delta t_{0}\right)^{2} + \left(\frac{\partial L_{0}}{\partial t_{0}}\Delta \varepsilon_{0}\right)^{2}} = \sqrt{\left(\frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_{0}}}\Delta t_{0}\right)^{2} + \left(\frac{-ct_{0}}{4\sqrt{\varepsilon_{0}^{3}}}\Delta \varepsilon_{0}\right)^{2}},$$
(4)

где L_0 – действительное значение расстояния до границы раздела сред; $\Delta t_0 = 13,35$ пс – погрешность оценки временного интервала t_0 (соответствует погрешности оценки линейного интервала 2 мм); $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\rm HV} = 1,00058986$; $\Delta \varepsilon_0$ – изменение ДП вследствие воздействия избыточного давления и температуры ($\Delta \varepsilon_0 = \varepsilon_{\rm ИДВТ} - \varepsilon_{\rm Hy}$).

После подстановки (1) в (4) погрешность измерений расстояния может быть выражена в виде

$$\Delta L_0 = \sqrt{\left(\frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_0}}\Delta t_0\right)^2 + \left(L\frac{-\Delta\varepsilon_0}{2\varepsilon_0}\Delta\varepsilon_0\right)^2}.$$
 (5)

В табл. 1 приведены результаты расчета оценки расстояния до границы раздела сред L при различных значениях уровня для случаев распространения волны через слой воздуха (L_{air}) и слой пароводяной смеси (L_{vap}) при T = 180 °C, P = 10 бар, $L_{max} = 20$ м.

Таблица 1. Значения погрешности измерения расстояния до границы раздела сред

L	ΔL_{air}	$(\Delta L /L) \cdot 100 \%$	ΔL_{vap} ,	$(\Delta L_{-}/L_{-}).100\%$	
MM		air' max	MM	air, max, soo, o	
1000	2,628	0,013	58,7	0,294	
2000	3,952	0,020	117,4	0,587	
5000	8,752	0,044	293,4	1,467	
10000	17,0	0,086	586,7	2,934	
20000	34,0	0,171	1173,0	5,867	

Приведенные результаты показывают, что значение погрешности существенно зависит от уровня заполнения БВ (чем меньше заполнение БВ, тем выше погрешность оценки уровня воды в БВ). Влияние ИДВТ на показания системы при распространении электромагнитной волны через слой воздуха сказывается гораздо меньше, чем при распространении через такой же слой при наличии пароводяной смеси. При этом появление пара вызывает «недооценку» уровня в БВ. Для решения данной проблемы в датчиках этого типа применяют коррекцию функции преобразования уровня по дополнительным отраженным сигналам [4, 11]. На рис. 4,*a* схематически изображен генератор-приемник (ГП) и чувствительный элемент – коаксиальная линия, частично погруженная в исследуемую среду и содержащая один реперный отражатель (PO).

На рис. 4, *б* приведены результаты моделирования формы рефлектограммы при наличии реперного отражателя для двух случаев функционирования датчика: при работе в нормальных условиях и при наличии паровой фазы и избыточного давления (T = 180 °C, P = 10 бар). При моделировании принято, что PO расположен на расстоянии $L_{\rm PO} = 1$ м от ГП, а вода находится на расстоянии $L_0 = 3$ м от ГП.

Расчет волнового сопротивления $W_j j$ -го участка коаксиальной линии, а также коэффициента отражения от неоднородностей волнового сопротивления $K_{j,j+1}$ производится в соответствии с известными соотношениями [11]:

$$W_j = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_j}} \ln\left(\frac{D_j}{d_j}\right); \quad K_{j,j+1} = \frac{W_{j+1} - W_j}{W_j + W_{j+1}}$$

1

где D – внутренний диаметр наружного проводника; d – внешний диаметр внутреннего проводника коаксиального датчика; ε – значение ДП материала, заполняющего пространство между проводниками датчика.

В табл. 2 приведены результаты расчета параметров линии для нормальных условий функционирования датчика, избыточного давления и высокой температуры.



Рис. 4. Применение реперного отражателя для компенсации влияния ДП пара на скорость распространения электромагнитной волны

№ 3 = 2014 ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ НУК

i	S_{j}	D_j	d_{j}	ε,		W _j	, Ом	K	<i>j</i> +1
J	MM			НУ	ИДВТ	НУ	ИДВТ	НУ	ИДВТ
1	1000	42	12	1,00058986	1,118	75,144	71,088	-0,1929	-0,1931
2	2000	28	12	1,00058986	1,118	50,838	48,08	-0,8	-0,7148
3	13000	28	12	81	40,31*	5,649	8,007	-	-

Таблица 2. Результаты расчета параметров линии для моделирования

*При моделировании использовано ближайшее для указанных условий значение є для жидкой воды.

Результаты, представленные в табл. 2, показывают, что по сравнению с нормальными условиями измерений при избыточном давлении и высокой температуре коэффициент отражения от реперного отражателя изменяется незначительно. При этом коэффициент отражения от границы раздела сред «парвода» изменяется значительно (чуть более 8,5 %), что объясняется резким изменением ДП воды при высокой температуре.

Коррекция для приведенного случая основывается на использовании данных о заранее известном положении реперного отражателя – специальной неоднородности волнового сопротивления. Как правило, такие отражатели выполняются путем уменьшения или увеличения диаметров проводников или в виде специальных замыкателей [11]. В качестве опорных сигналов также предложено использовать отражения от конструктивных элементов датчика (например, диэлектрических шайб и перемычек, служащих для крепления конструктивных элементов датчика) [4].

Расстояние до границы раздела сред при использовании РО можно определить согласно формуле

$$L_0 = \frac{t_0 L_{\rm PO}}{t_{\rm PO}},\tag{6}$$

где t_0 – двойное время распространения излученного импульса от генератора-приемника коротких импульсов до границы раздела сред «воздух/пар–вода»; $t_{\rm PO}$ – двойное время распространения излученного импульса от генератора-приемника импульсов до реперного отражателя (см. рис. 4, δ).

Учитывая (6), абсолютная погрешность измерения расстояния может быть выражена в виде (принято $\Delta L_{\rm PO} = 0$)

$$\Delta L_{0PO} = \sqrt{\left(\frac{\partial L_0}{\partial t_0} \Delta t_0\right)^2 + \left(\frac{\partial L_0}{\partial t_{PO}} \Delta t_{PO}\right)^2} =$$

$$= \Delta t_0 \sqrt{\left(\frac{L_{PO}}{t_{PO}}\right)^2 + \left(-\frac{t_0 L_{PO}}{t_{PO}^2}\right)}.$$
(7)

В предположении, что $\Delta t_{\rm PO} = \Delta t_0$, и используя выражение (1) для преобразования (7), погрешность измерения расстояния можно выразить как

$$\Delta L_{\rm 0PO} = \Delta t_0 \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_0}} \sqrt{1 + \left(-\frac{L_0}{L_{\rm PO}}\right)^2}.$$
 (8)

44 ISSN 2311-3405

Выражение для погрешности измерения расстояния до границы раздела сред позволяет получить численные оценки погрешности при использовании коррекции по одному реперному отражателю. Так, при $L_{\rm PO} = 1$ м, $\varepsilon_0 = 1,102...1,118$ (пароводяная смесь), $\Delta t_0 = 13,35$ пс график зависимости абсолютной погрешности от ДП будет иметь вид, представленный на рис. 5.



Рис. 5. Значения погрешности оценки расстояния до границы раздела сред в зависимости от ДП 0-го слоя для различных значений уровня L_0

Абсолютное значение погрешности с повышением уровня жидкости (снижение L_0) убывает, аналогично случаю без реперного отражателя.

Представленные в табл. 3 данные показывают, что за счет применения коррекции по отражению от РО достигается значительное снижение погрешности измерения расстояния до границы раздела сред по сравнению с обычным методом измерения (при наличии паровой фазы).

Однако применение такого подхода связано со сложностью оценки расстояния (уровня) при приближении жидкости к реперному отражателю (при больших уровнях появляются мешающие отражения). Поэтому при проектировании систем контроля уровня жидких (кипящих) сред рекомендуется учитывать размещение PO, а именно необходимо располагать PO на максимально возможном расстоянии от генератора-приемника и на достаточном расстоянии от места предельного уровня налива жидкости.

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА № 3 = 2014

Таблица 3. Значения погрешностей измерения расстояния до границы раздела сред ($L_{PO} = 1$ м)

L	ΔL_{0PO}	(AL /L),100 %	
1	ММ	$(\Delta L_{0PO}/L_{max})^{-100}$ /6	
1000	_	_	
2000	4,263	0,02132	
5000	9,721	0,04861	
10000	19,160	0,0958	
20000	38,178	0,19089	

Для повышения надежности работы системы измерения уровня ее электронный блок (ЭБ) должен размещаться за пределами герметичной оболочки (ГО) энергоблока, что особенно важно в аварийных режимах работы, при ионизирующем излучении. В случае использования такого подхода импульсу, излученному в ЭБ, приходится преодолевать дополнительное «препятствие» - специальную линию (СЛ), связывающую ЭБ и чувствительный элемент, что может вызывать возникновение дополнительных погрешностей. В качестве такой линии может быть использован специальный радиочастотный коаксиальный кабель, стойкий к воздействию ионизирующего излучения, высокой влажности, избыточного давления и высокой температуры (например, РК 75-7-22). В качестве диэлектрического заполнения такого кабеля выступает фторопласт Ф-4, ДП которого в нормальных условиях $\varepsilon_{\text{СЛНУ}} = 2,019$. В ГО расположена только часть линии, которая подвержена воздействию высокой температуры. Под воздействием высокой температуры ДП фторопласта изменяется, что вызывает возникновение дополнительной погрешности оценки расстояния:

$$\Delta L_{\rm CJI} = L_{\rm CJI} \left(1 - \frac{\sqrt{\epsilon_{\rm CJHJBT}}}{\sqrt{\epsilon_{\rm CJHY}}} \right), \tag{9}$$

где є_{слидвт} – значение ДП фторопласта при высокой температуре и избыточном давлении.

Зависимость ДП фторопласта Ф-4 от температуры можно выразить, используя данные [6] (рис. 6).

В диапазоне от 20 до 250 °С значение ДП меняется на 0,001817. Тогда, согласно выражению (9), при длине участка соединительной линии $L_{\rm CЛTO} = 40$ м $\Delta L_{\rm CЛ} = 18$ мм. С учетом выражений (5), (8), (9) и данных табл. 1, 3 при $L_{\rm 0max} = 20$ м абсолютная погрешность оценки уровня при наличии РО ($L_{\rm PO} = 1$ м) составит $\Delta L_{\rm POCЛ} = 42,2$ мм (0,21 %); при отсутствии РО $\Delta L_{\rm 0CЛ} = 1173,1$ мм (5,87 %).



Рис. 6. График зависимости ДП фторопласта от температуры

выводы

1. Моделирование характеристик пароводяной смеси позволило проанализировать влияние избыточного давления и высокой температуры воды в БВ на показания уровнемера. Пароводяная смесь существенно замедляет распространение электромагнитных волн, что приводит к возникновению дополнительной неучтенной погрешности. При этом наличие пара приводит к «недооценке» уровня жидкости в БВ. Существенно повышается точность измерения уровня жидкости за счет использования реперного отражателя (на примере модели достигнуто снижение погрешности в 27,95 раз). Полученные соотношения позволяют численно оценить значение погрешности измерения уровня при наличии/отсутствии реперного отражателя.

2. Перспективными направлениями исследований являются моделирование и экспериментальная проверка соотношений оценки уровня раздела сред при работе с другими кипящими средами (пропан-бутан и т. п.); интеллектуальный учет затухания в линии связи электронного блока и чувствительного элемента, а также учет неравномерного прогрева линии связи и дополнительных неоднородностей волнового сопротивления при моделировании сигналов системы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Андрижевский, А. А. Оценка условий теплообмена в бассейне выдержки отработавшего ядерного топлива с учетом эффекта испарения [Текст] / А. А. Андрижевский, А. Г. Трифонов, Т. Ю. Пронкевич // Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. – 2012. – № 3. – С. 145–149.
- [2] **Калинкин, В. И.** Хранение отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов [Текст] / В. И. Калинкин. СПб. : ВНИПИЭТ, 2009. С. 107.
- [3] Подопригора, А. В. Оценка эффективности использования бассейна выдержки и перегрузки топлива при запроектных авариях [Текст] / А. В. Подопригора, И. И. Свириденко, А. Ю. Москаленко // Reports of Dysnai – 2005, Technical Section.
- [4] Полиметрические системы: теория и практика [Текст]: монография / Ю. Д. Жуков, Б. Н. Гордеев, А. В. Зивенко [и др.]; под ред. Ю. Д. Жукова. – Николаев: Атолл, 2012. – 382 с.

№ 3 = 2014 ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ НУК

- [5] Приемочные испытания средств измерения уровня воды в бассейне выдержки энергоблока № 1 Ривненской АЭС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://sstc.kiev.ua.
- [6] Справочник по пластическим массам. Т. 1 [Текст] / под ред. В. М. Катаева, В. А. Попова, В. И. Сажина. М. : Химия, 1975. 448 с.
- [7] Универсальная однопараметрическая зависимость диэлектрической проницаемости воды и водяного пара от отношения плотности к температуре [Текст] / Ю. В. Мулев, К. М. Арефьев, О. В. Беляева [и др.] // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – энергетика : междунар. науч.-техн. журнал. – 2011. – № 3. – С. 50–58.
- [8] AREVA испытала радарный уровнемер для измерения уровня воды в бассейнах выдержки [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.atominfo.ru.
- [9] **Brumbi, D.** Fundamentals of Radar Technology for Level Gauging [Text] / D. Brumbi. KROHNE Messtechnik GmbH & Co. KG, 2003. 165 p.
- [10] Fernandez, D. P. 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-Hückel coefficients [Text] / D. P. Fernandez // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1997. P. 1125–1166.
- [11] Using Guided Wave Radar for Level in High Pressure Steam Applications [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www2.emersonprocess.com.
- [12] Zivenko, A. V. Level measurement principles & sensors [Text] / A. V. Zivenko, A. G. Nakonechniy, D. Y. Motorkin // Materialy IX mezinarodni vedecko-prackticka conference «Veda a technologie: krok do budoucnosti – 2013». – Dil. 28. Technicke vedy. – Prague, 2013. – P. 85–90.

© Авторський колектив

Надійшла до редколегії 07.04.2014 Статтю рекомендує до друку д-р техн. наук, проф. Ю.Д. Жуков