УДК 621.371.391.2

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКОГО УРОВНЕМЕРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В КОНТУРЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

В. П. Корячко, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой САПР ВС РГРТУ, Рязань, Россия; orcid.org/0000-0003-0272-673X, koryachko.v.p@rsreu.ru С. С. Румянцев, начальник отдела обеспечения ГОЗ АО «Моринсис-Агат-КИП», Рязань, Россия; orcid.org/0009-0006-6102-3902, R0806rus@yandex.ru J. В. Аронов, к.т.н., доцент кафедры РУС РГРТУ, Рязань, Россия; orcid.org/0000-0001-9010-3836, LVArronov@yandex.ru

Построена математическая модель импульсного рефлектометрического уровнемера, учитывающая неоднородности на пути зондирующего сигнала в СВЧ-тракте. Реализована компьютерная модель в среде динамического моделирования SimInTech. Математическая модель универсальна, что позволяет вводить дополнительные неоднородности и исследовать влияние временных параметров зондирующего импульса: длительности, периода и скважности. Кроме того, предложен метод компенсации влияния температуры и давления в первом контуре ядерной энергетической установки на точность измерения уровня теплоносителя путём введения дополнительных реперных меток в чувствительном элементе импульсного рефлектометрического уровнемера.

**Ключевые слова:** рефлектометрический уровнемер, импульсный рефлектометр, математическая модель, ядерная энергетическая установка, компьютерная модель, SimInTech.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-157-165

### Введение

Импульсные рефлектометры являются широко распространёнными приборами для тестирования и контроля кабельного оборудования. В основе их работы лежит эффект отражения сигнала от неоднородности в кабельной линии, при этом, зная скорость распространения электромагнитных волн с учётом коэффициента замедления, можно определить точное расстояние до неоднородности [1]. В импульсном рефлектометрическом уровнемере роль искомой неоднородности играет граница раздела сред в чувствительном элементе. Подобные устройства широко применяются для точного измерения уровня жидкостей и сыпучих материалов в различных отраслях промышленности, в том числе в нефтепереработке, химической, пищевой, измерения уровня топлива в баках морских судов. В отличие от механического метода в рефлектометрическом уровнемере отсутствуют подвижные части, что делает его надёжным и долговечным [2].

Одним из возможных направлений применения рефлектометрического метода измерения уровня жидкости является использование его для определения уровня теплоносителя в первом контуре ядерной энергетической установки. Данное техническое решение обладает рядом достоинств, в частности позволяет расположить датчик на значительном расстоянии от чувствительного элемента, т.е. вынести электронику из «грязной» зоны реактора, где её работа затруднена или невозможна вследствие высокого уровня ионизирующего излучения. Простота устройства чувствительного элемента гарантирует продолжительную и надёжную работу на протяжении срока эксплуатации ядерной энергетической установки. Однако данное применение имеет специфику, заключающуюся в том, что датчик работает в условиях экстремальных температур и давлений. Следствием этого является изменение электрических свойств теплоносителя (дистиллированной воды и сухого пара) внутри чувствительного элемента. Это может оказывать влияние на точность измерений, что может привести к возник-

новению нештатной ситуации. Учитывая особую опасность и тяжёлые последствия аварий в ядерных энергетических установках, необходимо принимать меры по компенсации температурной нестабильности и влияния высокого давления на рефлектограмму в интересах обеспечения точности измерения и безаварийной работы.

## Цель работы

Разработка математической модели импульсного рефлектометрического уровнемера с целью повышения точности уровня путем уменьшения влияния температуры воды и давления.

# Теоретическая часть

В ядерной энергетической установке чувствительный элемент рефлектометра функционирует в условиях высокого давления и температуры, изменение которых возможно в широких пределах. Так в первом контуре температура теплоносителя (дистиллированной воды) варьируется в пределах 277-523 К, а давление сухого пара от 0,1 до 25 МПа. Изменение этих параметров оказывает влияние на диэлектрическую проницаемость воды и сухого пара, температурная зависимость которой для разных значений давления показана на рисунке 1 [3, 4].



Рисунок 1 – Зависимость относительной диэлектрической проницаемости воды от температуры и давления

# Figure 1 – Dependence of water relative permittivity from temperature and pressure

При этом увеличение давления приводит к незначительному увеличению  $\varepsilon$  как для пара, так и для воды, однако рост температуры приводит к его значительному уменьшению. Например, при температуре T = 400 К увеличение давления с 1 до 30 МПа сопровождается увеличением относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  дистиллированной воды с 49,06 до 50,07, т.е. на 2 %. При этом рост температуры с 275 до 525 К в условиях давления 10 МПа сопровождается уменьшением относительной диэлектрической диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  с 87,57 до 27,07, т.е. в 3,23 раза. В ядерной энергетической установке, находящейся в рабочей зоне «температура-давление», вариация относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  составляет от 26,79 до 88,38, с учетом того, что скорость распространения сигнала  $v_{\pi}$  равна [7]

$$v_{n} = c / \sqrt{\varepsilon}, \qquad (1)$$

где  $c = 3 \cdot 10^8 \, \text{м} / c$  – скорость света в вакууме.

Следовательно, скорость может варьироваться в пределах (0,1 ... 0,19) с, поэтому для точности и достоверности измерений необходимо вводить температурную коррекцию, измеряя в реальном времени температуру и давление и рассчитывая на основе полученных данных поправочный коэффициент. Данный способ требует дополнительных аппаратных затрат и повышает сложность системы измерения в целом так как возникает необходимость уста-

новки дополнительных радиационно стойких датчиков, работающих в экстремальных условиях.

Альтернативным способом является компенсация колебаний относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  с помощью реперных меток в чувствительном элементе (рисунок 2).



Рисунок 2 – Схема чувствительного элемента с реперными метками Figure 2 – Scheme of a sensitive element with fiducial marks

Чувствительный элемент представляет собой стальную или титановую трубку с центральным проводником, образующими коаксиальный фидер. Для недопущения разгерметизации в конструкцию добавляется два изолятора из боросиликатного стекла. Конец чувствительного элемента представляет собой короткое замыкание внутреннего проводника на внешний. Реперные метки представляют собой неоднородности, образованные сужением внешней трубки, в этом случае волновое сопротивление отрезка фидера изменяется, что можно рассчитать по формуле [6]

$$Z_{B} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}} \ln \frac{D}{d},$$
(2)

где *D* – внутренний диаметр внешнего проводника коаксиальной линии, м; *d* – диаметр внутреннего проводника коаксиальной линии, м.

В результате возникает неоднородность, коэффициент отражения *R<sub>i</sub>* которой определяется по формуле [6]

$$R_i = \frac{Z_{i+1} - Z_i}{Z_{i+1} + Z_i},\tag{3}$$

где  $Z_i$  и  $Z_{i+1}$  – волновые сопротивления *i*-го и *i*+1-го участков чувствительного элемента соответственно.

Коэффициент прохождения Т<sub>i</sub> находится как [6]

$$\Gamma_i = 1 - \left| R_i \right|. \tag{4}$$

Длины затопленного  $l_3$  и незатопленного  $l_{H3}$  участка чувствительного элемента датчика импульсного рефлектометрического уровнемера определяются по формулам:

$$l_{3} = \tau_{3} \cdot (c / \sqrt{\varepsilon_{3}}),$$

$$l_{H3} = \tau_{H3} \cdot (c / \sqrt{\varepsilon_{H3}}),$$
(5)

где  $\tau_3$  – время прохождения затопленного участка чувствительного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера, с;  $\tau_{H3}$  – время прохождения незатопленного участка чувствительного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера, с;  $\varepsilon_3$  – относительная диэлектрическая проницаемость затопленного участка чувствительного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера;  $\varepsilon_{H3}$  – относительная диэлектрическая проницаемость затопленного элемента импульсного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера;  $\varepsilon_{H3}$  – относительная диэлектрическая проницаемость затопленного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера, с;  $\varepsilon_{r3}$  – относительная диэлектрическая проницаемость незатопленного участка чувствительного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера;  $\varepsilon_{r3}$  – относительная диэлектрическая проницаемость незатопленного участка чувствительного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера.

При этом скорость уменьшается пропорционально коэффициенту замедления  $1/\sqrt{\varepsilon}$ , т.е. реальные длины затопленного  $l_3^*$  и незатопленного  $l_{H3}^*$ участков чувствительного элемента будут отличаться, т.к. реальная диэлектрическая проницаемость затопленного  $\varepsilon_3^*$  и незатопленного  $\varepsilon_{H3}^*$  и незатопленного  $\varepsilon_{H3}^*$  и незатопленного  $\Delta l_3^*$  и незатопленного  $\Delta l_3$  и незатопленного  $\Delta l_{H3}$ 

$$\Delta l_{3} = |l_{3} - l_{3}^{*}|,$$

$$\Delta l_{H3} = |l_{H3} - l_{H3}^{*}|.$$
(6)

Предположим, у нас есть две реперные метки, показанные на рисунке 2, причём первая отстоит от изолятора на длину  $l_1$ , а вторая от короткого замыкания на длину  $l_2$ . Расположение меток выбрано так, что первая метка с большой вероятностью будет находиться в незатопленной части, а вторая в затопленной. Калибровка выполняется путём оценки скорости распространения

Использование реперных точек позволяет выполнить калибровку скорости распространения сигнала в затопленном  $v_3$  и незатопленном  $v_{H3}$  участке чувствительного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера на основе известных длин  $l_1$  и  $l_2$ :

$$v_{3}^{*} = c / \sqrt{\varepsilon_{3}^{*}} = l_{2} / \tau_{2},$$

$$v_{H3}^{*} = c / \sqrt{\varepsilon_{H3}^{*}} = l_{1} / \tau_{1},$$
(7)

где  $\tau_1$  – время прохождения первого реперного участка, с; а  $\tau_2$  – время прохождения второго реперного участка, с.

В таком случае длины затопленного  $l_3$  и незатопленного  $l_{H3}$  участка чувствительного элемента будут определяться по формулам, с учётом калибровки скорости:

$$l_{3} = \tau_{3}v_{3}^{*} = \tau_{3} \cdot (l_{2} / \tau_{2}),$$

$$l_{H3} = \tau_{H3}v_{H3}^{*} = \tau_{H3} \cdot (l_{1} / \tau_{1}).$$
(8)

Таким образом изменение относительной диэлектрической проницаемости теплоносителя и сухого пара внутри чувствительного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера нивелируется путём предварительной калибровки, что снимает необходимость установки дополнительных датчиков температуры и давления. Причем в случае затопление или осушения обеих меток это возможно обнаружить по рефлектограмме и внести соответствующие поправки в алгоритм калибровки.

### Математическая модель импульсного рефлектометрического уровнемера

Построение математической модели импульсного рефлектометрического уровнемера в интересах моделирования рефлектограммы целесообразно начать с декомпозиции устройства на составные части. С технической точки зрения можно выделить две части: приёмопередатчик и СВЧ-тракт, в котором формируется рефлектограмма – временная диаграмма отражений зондирующего сигнала, возникающих в местах неоднородностей. В интересах построения рефлектограммы произведём декомпозицию СВЧ-тракта импульсного рефлектометрического уровнемера без учёта реперных меток (рисунок 3).

На рисунке показаны: 1, 3 – коаксиальный кабель; 2 – переходная муфта; 4, 6 – изолятор; 5 – межизоляционный промежуток; 7 и 8 – незатопленная и затопленная части чувствительного элемента. Приёмопередатчик расположен в «чистой» зоне, в то время как датчик с чувствительным элементом устанавливается непосредственно на корпус ядерной энергетической установки и контактирует с теплоносителем первого контура. Каждый элемент CBЧ-тракта, показанный на рисунке 3, можно описать в виде отрезка коаксиальной линии переда-

чи с отражающей неоднородностью на конце, в точке стыковки со следующим отрезком (рисунок 2).



Рисунок 3 – Модель СВЧ-тракта импульсного рефлектометрического уровнемера Figure 3 – Impulse reflectometric level gauge microwave path model



Рисунок 4 – Модель отрезка линии с неоднородностью на конце Figure 4 – Model of line segment with heterogeneity at the end

При этом *i-й* отрезок импульсного рефлектометра характеризуется входной  $a_{exi}$  и выходной  $a_{exi}$  падающими и входной  $b_{exi}$  и выходной  $b_{exi}$  отраженными волнами, которые связаны выражениями:

$$\begin{cases} a_{\scriptscriptstyle Bbxi}(t) = V_{\scriptscriptstyle Ji}Ta_{\scriptscriptstyle exi}(t-\tau_i), \\ b_{\scriptscriptstyle Bbxi}(t) = V_{\scriptscriptstyle Ji}^{2}R_{i}a_{\scriptscriptstyle exi}(t-2\tau_i) + V_{\scriptscriptstyle Ji}T_{i}b_{\scriptscriptstyle exi}(t-\tau_i), \end{cases}$$
(9)

где  $V_{\pi i}$  – коэффициент передачи *i*-го участка импульсного рефлектометра;  $T_i$  – коэффициент прохождения неоднородности на границе раздела *i*-го *u i*+1-го участка импульсного рефлектометра;  $R_i$  – коэффициент отражения неоднородности на границе раздела *i*-го и *i*+1-го участка импульсного рефлектометра;  $\tau_i$  – задержка распространения сигнала в *i-м* участке импульсного рефлектометра, с.

Коэффициент передачи *i*-го участка СВЧ-тракта импульсного рефлектометра  $V_{\pi i}$  определяется по формуле:

$$V_{\pi i} = 10^{\frac{\alpha_{\pi i} l_{\pi i}}{20}},$$
 (10)

где  $\alpha_{\pi i}$  – коэффициент затухания, дБ/м.

Коэффициенты отражения  $R_i$  и прохождения  $T_i$  определяются по формулам (3) и (4) соответственно, а задержка распространения сигнала  $\tau_i$  равна

$$\tau_i = l_{ni} / v_{ni}, \tag{11}$$

где  $l_{ni}$  – длина *i-го* участка импульсного рефлектометра, м;  $v_{ni}$  – скорость распространения сигнала на *i-м* участке импульсного рефлектометра, м/с.

Полученная математическая модель может быть расширена в случае введения реперных меток или иных элементов тракта. Например, в случае введения реперных меток они также будут представлены отрезками линии, показанными на рисунке 4.

## Результаты компьютерного моделирования

Моделирование рефлектограммы выполним на основе соотношений (9), при этом в интересах моделирования неоднородностей на стыке элементов СВЧ тракта импульсного рефлектометрического уровнемера выберем волновые сопротивления соединительных кабелей равными 75 Ом (соответствует применяемому в подобных системах кабелю PK-75-7-22), а отклонение волнового сопротивления изоляторов и переходной муфты примем равным ±10 %. Параметры элементов СВЧ тракта импульсного рефлектометра сведём в таблицу 2.

Таблица 1 – Параметры СВЧ тракта импульсного рефлектометрического уровнемера Table 1 – Pulse reflectometric level gauge microwave path parameters

N⁰	Элемент	$Z_i$ , Ом	$l_{\pi}$ , м	$\mathcal{E}_{i}$	$lpha_{_{\mathcal{I}i}},$ дБ/м
1	Соединительный кабель	75	1	2	0,33
2	Переходная муфта на основе боросиликатного стекла	67,582,5	0,25	6,2	0,37
3	Соединительный кабель	75	30	2	0,33
4	Изолятор-1	67,582,5	0,02	6,2	0,37
5	Промежуток между изоляторами	75	0,3	1	0,027
6	Изолятор-2	67,582,5	0,02	6,2	0,37
7	Незатопленная часть чувствительного элемента	75	5	1	0,027
8	Затопленная часть чувствительного элемента	8,3	1	81	0,33

Для построения компьютерной модели СВЧ-тракта импульсного рефлектометрического уровнемера используем программу SimInTech, которая является средой разработки математических моделей, алгоритмов управления, интерфейсов управления [7]. Модель отрезка линии с неоднородностью на конце (рисунок 4), построенная в среде SimInTech, показана на рисунке 5.





Здесь падающая волна со входа проходит через блок идеального транспортного запаздывания и поступает на блок, имитирующий неоднородность согласно выражениям (3) и (4). При этом часть волны проходит дальше, а часть суммируется с входной отраженной волной и, поступая на блок идеального транспортного запаздывания, передаётся в обратную сторону. Модель СВЧ-тракта импульсного рефлектометрического уровнемера (рисунок 3), построенная в среде динамического моделирования SimInTech, оказана на рисунке 6.

Компьютерная модель CBЧ-тракта импульсного рефлектометрического уровнемера, полученная в среде динамического моделирования SimInTech, позволяет получить рефлектограмму, учитывающую отражения сигнала на неоднородностях, а также наложение отраженных сигналов друг на друга. Используя полученную модель, можно подобрать скважность зондирующего сигнала, подобрать технические параметры и определить ожидаемый уровень эхо-сигнала. Рефлектограмма, построенная для уровня теплоносителя 1 метр (чувствительный элемент затоплен на 1 метр), показана на рисунке 7.



Рисунок 6 – Модель СВЧ-тракта импульсного рефлектометрического уровнемера в среде динамического моделирования SimInTech Figure 6 – Impulse reflectometric level gauge microwave path model in SimInTech dynamic simulation environment



Рисунок 7 – Рефлектограмма импульсного рефлектометрического уровнемера построенная в среде динамического моделирования SimInTech Figure 7 – Impulse reflectometric level gauge reflectogram built in SimInTech dynamic simulation environment

Амплитуда зондирующего импульса при этом составляет 1 В, а длительность зондирующего импульса 1 нс. На рефлектограмме наблюдается восемь пиков. по числу неоднородностей. Первый и второй соответствуют границам переходной муфты, с третьего по шестой – изоляторы датчика. Информативными являются промежутки между 6-7 и 7-8 эхо-сигналами, соответствующими длительности прохождения импульса непосредственно по чувствительному элементу датчика импульсного рефлектометрического уровнемера. В текущей конфигурации модель не учитывает наличие реперных точек, которые также будут проявляться в виде эхо-сигналов на рефлектограмме, причем возникает задача оптимизации их коэффициента отражения. Например, в проведенном моделировании амплитуды эхо-сигналов, значимых для измерения уровня теплоносителя в контуре ядерной энергетической установки, равны 3 мВ, 52 мВ и 12 мВ (отражение от начала чувствительного элемента, границы раздела сред «сухой пар – вода» и короткого замыкания в конце чувствительного элемента соответственно). Уменьшение волнового сопротивления второго изолятора до 47,5 Ом позволит увеличить амплитуду эхо-сигнала от начала чувствительного элемента до 10 мВ, однако эхосигнал от границы раздела «сухой пар-вода» уменьшится до 35 мВ, а эхо-сигнал от короткого замыкания в конце чувствительного элемента – до 8 мВ. Введение дополнительных неоднородностей потребует решения задачи многокритериальной оптимизации, в интересах обеспечения достаточных амплитуд эхо-сигналов, делающих возможным их обнаружение.

### Заключение

В настоящей статье был предложен способ коррекции погрешности измерения уровня теплоносителя в первом контуре ядерной энергетической установки, возникающей за счёт колебаний температуры и давления в значительных пределах (температура варьируется от

277 до 523 К, а давление сухого пара от 0,1 до 25 МПа). Калибровка на основе реперных меток позволяет полностью отказаться от датчиков температуры и давления, однако возникает необходимость определения оптимального положения и электрических параметров этих меток. Предложена математическая модель, реализованная в среде динамического моделирования SimInTech, для исследования импульсного рефлектометрического уровнемера, позволяющая изучить его поведение при вариации параметров. К достоинствам компьютерной модели можно отнести её универсальность и возможность расширения, в случае необходимости изучить влияние дополнительных неоднородностей, таких как реперные метки. Недостатком модели является то, что она не учитывает импульсные характеристики отрезков кабеля. Однако при этом компьютерная модель позволяет исследовать влияние временных характеристик зондирующего сигнала: длительность, период и скважность и строить на их основе рефлектограмму.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003).

## Библиографический список

1. Дьяконов В. Рефлектометрия и импульсные рефлектометры [Текст] / В. Дьяконов // Компоненты и технологии. 2011. № 1. С. 164-172.

2. **Тренкаль Е. И.** Измерение уровней жидкости методом импульсной рефлектометрии (обзор) / Е.И. Тренкаль, А.Г. Лощилов // Доклады ТУСУР. 2016. Т. 19, № 4. С. 67-73.

3. Fernandez D. P. A Formulation for the Static Permittivity of Water and Steam at Temperature from 238 K to 873 K at Pressures up to 1200 MPa, Including Derivatives and Debye-Hukel Coefficients / D. P. Fernandez, A. R. H. Goodwin, E. W. Lemmon et al. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1997, vol. 26, pp. 1125-1166.

4. Мулёв Ю. В. Экспериментальное исследование диэлектрической проницаемости сухого насыщенного водяного пара / Ю. В. Мулев, С. Н. Смирнов, М. Ю. Мулев // Теплоэнергетика: ежемесячный теоретический и научно-практический журнал / Российская академия наук. Российское научно-техническое общество энергетиков и электротехников. Москва. 2011. № 4. С. 57-60

5. Боков Л. А. Электродинамика и распространение радиоволн : учеб. пособие / Л. А. Боков, В. А. Замотринский, А. Е. Мандель. Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2013. 410 с.

6. Orfanidis S. J. Electromagnetic Waves and Antennas [Электронный учебник] / S. J. Orfanidis. Rutgers University, 2004. 798 p.

7. **Карташов Б. А.** Среда динамического моделирования технических систем SinInTech: Практикум по моделированию систем автоматического регулирования [Текст] / Б. А. Карташов, Е. А. Шабаев, О. С. Козлов, А. М. Щекатуров М.: ДМК Пресс, 2017. 424 с.

UDC 621.371.391.2

# REFLECTOMETRIC LEVEL GAUGE FOR MEASURING WATER LEVEL IN NUCLEAR POWER PLANT CIRCUIT MATHEMATICAL MODEL

V. P. Koryachko, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Head of CAD Department, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/0000-0003-0272-673X, e-mail: koryachko.v.p@rsreu.ru

S. S. Rumyancev, Head of the State Defense Defense Department, Morinsis-Agat-KIP JSC, Ryazan, Russia; orcid.org/0009-0006-6102-3902, R0806rus@yandex.ru

L. V. Aronov, Ph.D. (Tech.), associate professor, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-9010-3836, e-mail: LVArronov@yandex.ru

A mathematical model of pulsed reflectometric level gauge is constructed, which takes into account inhomogeneities in the path of probing signal in microwave tract. A computer model was implemented in SimInTech dynamic simulation environment. The mathematical model is universal, which makes it possible to introduce additional inhomogeneities and study the influence of probing pulse temporal parameters: duration, period, and duty cycle. In addition, the authors propose a method to compensate for the influence of temperature and pressure in primary circuit of nuclear power plant on the accuracy of measuring the coolant level by introducing additional reference marks in the sensitive element of pulsed reflectometric level gauge.

*Key words: reflectometric level gauge, pulsed reflectometer, mathematical model, nuclear power plant, computer model, SimInTech.* 

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-157-165

#### References

1. **D'yakonov V.** Reflektometriya i impul'snye reflektometry [Tekst] / V. D'yakonov. *Komponenty i tekhnologii.* 2011, no. 1, pp. 164-172. (in Russian).

2. **Trenkal' E. I.** Izmerenie urovnej zhidkosti metodom impul'snoj reflektometrii (obzor) / E.I. Trenkal', A.G. Loshchilov. *Doklady TUSUR*. 2016, vol. 19, no. 4, pp. 67-73. (in Russian).

3. Fernandez D. P. A Formulation for the Static Permittivity of Water and Steam at Temperature from 238 K to 873 K at Pressures up to 1200 MPa, Including Derivatives and Debye-Hukel Coefficients / D. P. Fernandez, A. R. H. Goodwin, E. W. Lemmon et al. *J. Phys. Chem. Ref. Data.* 1997, vol. 26, pp. 1125-1166.

4. **Mulyov Yu. V.** Eksperimental'noe issledovanie dielektricheskoj pronicaemosti suhogo nasyshchennogo vodyanogo para / Yu. V. Mulev, S. N. Smirnov, M. Yu. Mulev. *Teploenergetika: ezhemesyachnyj teoreticheskij i nauchno-prakticheskij zhurnal*. Rossijskaya akademiya nauk. Rossijskoe nauchnotekhnicheskoe obshchestvo energetikov i elektrotekhnikov. Moskva. 2011, no. 4, pp. 57-60. (in Russian).

5. Bokov L. A. Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln : ucheb. posobie / L. A. Bokov, V. A. Zamotrinskij, A. E. Mandel'. Tomsk: Tomsk. gos. un-t sistem upr. i radioelektroniki, 2013. 410 p. (in Russian).

6. Orfanidis S. J. *Electromagnetic Waves and Antennas* [Elektronnyj uchebnik] / S. J. Orfanidis. Rutgers University, 2004. 798 p.

7. Kartashov B. A. Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskih sistem SinInTech: Praktikum po modelirovaniyu sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Tekst] / B. A. Kartashov, E. A. Shabaev, O. S. Kozlov, A. M. Shchekaturov Moscow: DMK Press, 2017. 424 p. (in Russian).