

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО РЕФЛЕКС-РАДАРНОГО УРОВНЕМЕРА ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

**В.И. Мельников, Т.А. Бокова, В.В. Иванов, А.Р. Маров, Н.А. Лобаева,
А.С. Квашенников, П.А. Боков, Н.С. Волков**

*ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева»*

603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, к. 1



Представлены результаты работ, направленных на решение проблемы измерения уровня теплоносителя в емкостях реакторных установок различного назначения с жидкометаллическим теплоносителем преимущественно интегральной компоновки со свободным уровнем теплоносителя первого контура. Выбор средств и методов измерения уровня ограничен экстремальными параметрами ЖМТ и условиями эксплуатации. Традиционные средства измерения практически непригодны, вследствие чего измерение уровня ТЖМТ является сложной технической задачей. Предложен и описан метод импульсной микроволновой рефлектометрии как наиболее перспективный с точки зрения сочетания характеристик точности, простоты изготовления и использования. Приведены результаты экспериментального исследования работоспособности уровнемера, работающего по данному методу, при измерении уровня свинцово-висмутового теплоносителя в контрольной емкости в условиях, приближенных к натурным. Анализ результатов подтверждает возможность применения данного метода для контроля уровня расплавов различных металлов применительно к реакторным установкам с ТЖМТ. Устройство для измерения уровня, работающее по предлагаемому методу, позволяет контролировать уровень расплава различных металлов в емкостях в режиме реального времени без необходимости перемещения различных частей чувствительного элемента уровнемера с сохранением герметичности контура. Данное устройство применимо для различных ядерных энергетических установок, ускорительно-управляемых систем, исследовательских реакторов и различных экспериментальных стендов с жидкометаллическими теплоносителями.

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах, жидкометаллический теплоноситель, уровень теплоносителя, измерение, методы измерения уровня.

ВВЕДЕНИЕ

Из множества используемых энергетических технологий ядерная энергетика считается наиболее перспективной с точки зрения эффективности и обеспечения экологической безопасности. В настоящее время тяжелые жидкометаллические теплоносители

© *В.И. Мельников, Т.А. Бокова, В.В. Иванов, А.Р. Маров, Н.А. Лобаева,
А.С. Квашенников, П.А. Боков, Н.С. Волков, 2022*

(ТЖМТ), такие как свинец или эвтектика свинец-висмут являются перспективными для создания реакторных установок, поскольку реакторы с ТЖМТ отвечают требованиям пассивной безопасности и имеют более высокий КПД по сравнению с действующими водо-водяными ядерными энергетическими установками (ЯЭУ) [1].

Стабильную работу ЯЭУ обеспечивают системы автоматического управления и контроля параметров теплоносителя. Характерной особенностью ЯЭУ с ТЖМТ является интегральная (баковая) компоновка. К ним относятся установки типов БРЕСТ, СВБР, БРС-ППГ [1 – 5]. Интегральная компоновка реактора обладает высокой надежностью и безопасностью при внешних воздействиях. Компактное расположение оборудования активной зоны, промежуточных теплообменников, насосов первого контура сокращает тракт циркуляции теплоносителя первого контура, уменьшает его гидравлическое сопротивление, что приводит к улучшению условий развития естественной циркуляции по первому контуру при полном обесточивании установки.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И ОБЗОР МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Баковая компоновка подразумевает свободный уровень теплоносителя, который необходимо постоянно контролировать и поддерживать в заданном диапазоне. Выбор средств и методов измерения уровня жидкометаллического теплоносителя ограничен его экстремальными параметрами и условиями эксплуатации. Традиционные средства измерения практически непригодны, вследствие чего измерение уровня ТЖМТ является сложной технической задачей.

К важнейшим свойствам и условиям работы реакторной установки с ТЖМТ, которые следует учитывать в первую очередь, относятся широкий температурный интервал (200 – 550°C) и высокая коррозионная активность теплоносителя по отношению к конструкционным материалам, а также неравномерность температурных полей в различных частях установки, необходимость создания защитных оксидных покрытий на поверхностях конструкций, наличие газовых смесей (инертный газ, водород, кислород) в газовых подушках емкостей и растворенных в теплоносителе, обязательное соблюдение условия герметичности контура [6 – 8].

В литературных источниках приводятся сравнительные характеристики методов измерения уровня различных сред, в том числе в зависимости от их физико-химических свойств [9]. Однако анализ методов контроля уровня жидких металлов с учетом условий работы в ЯЭУ и их физических свойств в открытых источниках практически отсутствует.

В настоящее время наиболее распространенным средством контроля уровня в стендовых экспериментальных контурах является электроконтактный сигнализатор уровня. Принцип его работы заключается в регистрации замыкания цепи «элемент питания – ключ – сигнальная лампа» при контакте металлического стержня, перемещаемого по высоте, с поверхностью теплоносителя. Стержень перемещается в изоляционном уплотнении. Как правило, используются простые фторопластовые уплотнения, которые недолговечны и нуждаются в частой замене. Вместе с тем нарушение общей герметичности контура по газу ведет к неконтролируемому поступлению кислорода с воздухом, что вызывает бесконтрольное окисление теплоносителя. А это, в свою очередь, ведет к образованию твердых оксидов и забиванию проходных сечений контура циркуляции, частичному или полному разрушению проточной части насосов, нарушению теплоотвода от активной зоны и другим негативным последствиям.

Для контроля уровня расплавов металлов используют многоточечные сигнализаторы на основе компактных индукционных преобразователей и индуктивные уровнемеры [10, 11], а также потенциометрические приборы, работающие по принципу измерения сопротивления трубчатого зонда, погруженного в металл [12]. Большинство этих разработок было выполнено десятилетиями назад, и отличается крайне высокой стоимостью и невысокой надежностью [13].

МЕТОД ИМПУЛЬСНОЙ МИКРОВОЛНОВОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ И РЕФЛЕКС-РАДАРНЫЙ УРОВНЕМЕР

Для измерения уровня жидкометаллического теплоносителя предлагается использовать метод импульсной микроволновой рефлектометрии. Представлены конструкция уровнемера и результаты исследования, подтверждающие его работоспособность в среде ТЖМТ.

Метод микроволновой рефлектометрии известен в технике измерений. В частности, он применяется для определения мест повреждений в коаксиальных кабелях связи [14, 15], для контроля уровня нефтепродуктов [16 – 18], также предложено его использование для контроля водяного теплоносителя ЯЭУ [19]. Достоинством данного метода является непрерывное измерение уровня любых сред и применение даже при самых тяжелых условиях процесса; работа устройства по данному методу позволяет обеспечить необходимую герметичность узла и установки в целом, так как нет перемещающихся частей в составе измерительного зонда (рис. 1).

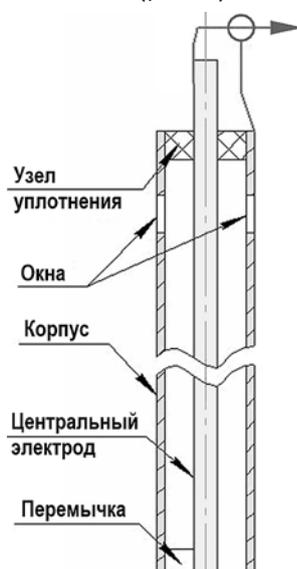


Рис. 1. Конструктивная схема измерительного зонда

Принцип работы рефлекс-радарного уровнемера основан на использовании импульсов высокочастотной электромагнитной энергии, передаваемых по измерительному зонду, частично погруженному в контролируемую жидкость. Зонд представляет собой трубу, внутри которой по центру коаксиально установлен электрод.

Вторичная аппаратура генерирует микроволновые импульсы, подводимые в верхней части зонда, и измеряет временную задержку их прохождения до поверхности контролируемой среды и обратно. При увеличении уровня контролируемой среды в емкости пропорционально уменьшается расстояние до верха зонда и, соответственно, временная задержка. В идеальной системе данная зависимость является линейной. Более подробно физика процесса описана в [14, 15, 18, 20].

Таким образом, уровнемер состоит из измерительного зонда, выполненного в виде коаксиальной линии (см. рис. 1), линии связи и вторичного электронного блока.

Корпус зонда изготовлен из стальной трубы диаметром 42 мм и длиной 1,35 м. В качестве центрального электрода использована трубка диаметром 10 мм, загерметизированная с двух сторон. Корпус зонда и центральный электрод на свободном конце соединены перемычкой, образуя короткозамкнутую линию. Контролируемый теплоноситель свободно заполняет про-

БЕЗОПАСНОСТЬ, НАДЁЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ЯЭУ

странство между трубами по принципу сообщающихся сосудов; для этого в верхней части зонда в корпусе предусмотрены окна. Электрическая изоляция и центровка центрального электрода в верхней части зонда выполнена из фторопласта. Волновое сопротивление зонда 75 Ом. В качестве линии связи применен коаксиальный кабель с таким же волновым сопротивлением.

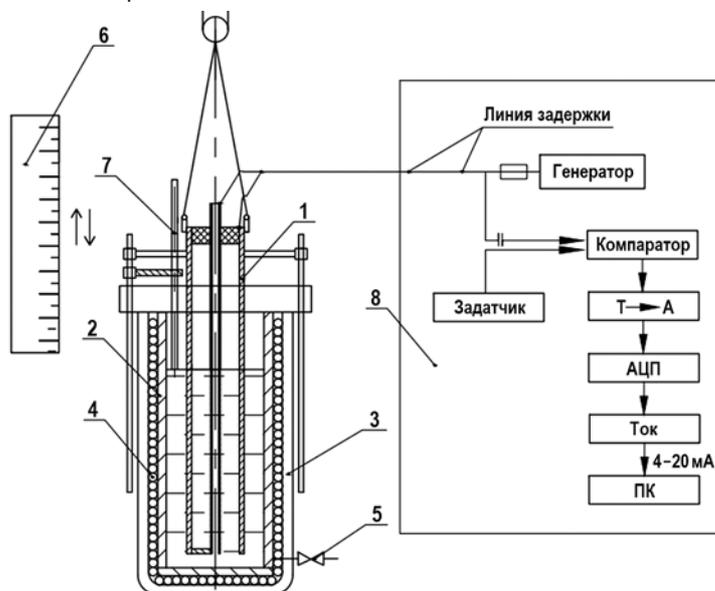


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – измерительный зонд; 2 – контрольный бак для теплоносителя; 3 – теплоизоляция; 4 – нагревательный элемент; 5 – вентиль слива теплоносителя; 6 – линейка; 7 – электроконтактный сигнализатор; 8 – электронный блок

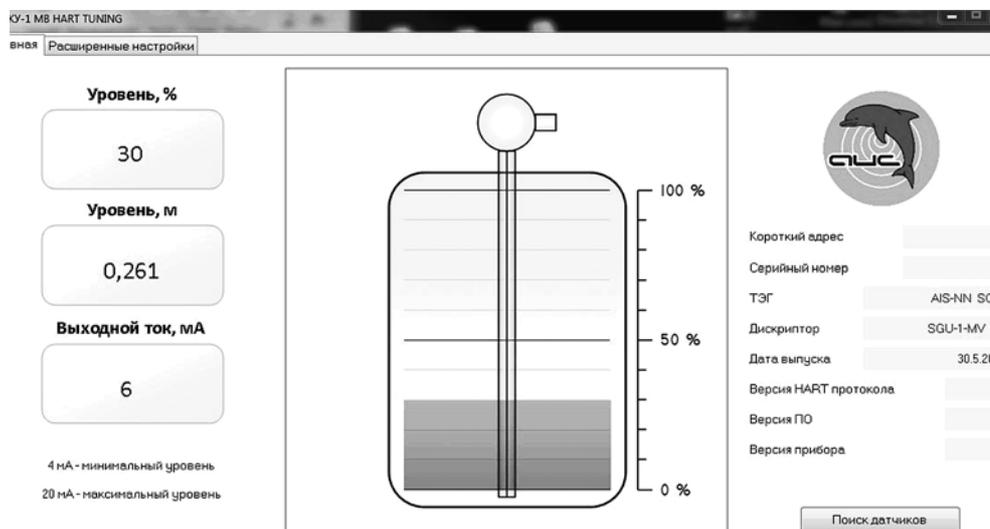


Рис. 3. Скриншот главной страницы интерфейса прибора контроля уровня для оператора

Электронный блок включает в себя генератор прямоугольных импульсов, подключенный через согласующий резистор и линию задержки к измерительному зонду уровнемера, стробируемый компаратор, на второй вход которого подается напряжение от задачника напряжения, преобразователь «длительность импульса – амплитуда», аналого-цифровой преобразователь и преобразователь «амплитуда – ток» (рис. 2, п. 8). Управление измерительной системой и обработка данных осуществляются с помощью персонального

компьютера. Информация передается через HART-коммуникатор по двухпроводной линии.

В генераторе используется выходной каскад на основе транзистора с граничной частотой 7 ГГц, остальная часть схемы выполнена на основе микропроцессора серии PIC.

Разработанный интерфейс и программное обеспечение позволяют контролировать работу прибора в процессе измерений. Вид пользовательской страницы прибора для оператора приведен на рис. 3.

Осциллограммы импульсов на выходе зонда при двух различных значениях уровня жидкости приведены на рис. 4. Видно, что длительность импульса уменьшается примерно на 6 нс при увеличении уровня на 1 м. Учитывая, что разрешающая способность измерительной схемы около 50 пс, получаем шаг измерения уровня примерно 1 см.

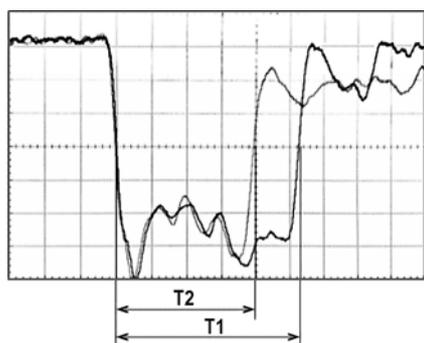


Рис. 4. Осциллограммы сигналов на выходе осушенного зонда (T1) и погруженного в жидкость на глубину 1 м (T2). Масштаб: верт. – 0,2 В/клет.; горизонт. – 5 нс/клет.

ХОД ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Работа прибора вначале была проверена при нормальных условиях в водяном теплоносителе. Для этого контрольный бак для теплоносителя был заполнен водой. Измерительный зонд прибора погружался в воду ступенями с шагом в 50 мм. Глубина погружения контролировалась при помощи линейки. Уровень теплоносителя на каждом шаге погружения (поднятия) контролировался электроконтактным (эталонным) сигнализатором уровня. После каждого изменения глубины погружения производилось измерение уровня теплоносителя эталонным и рефлекс-радарным уровнемерами.

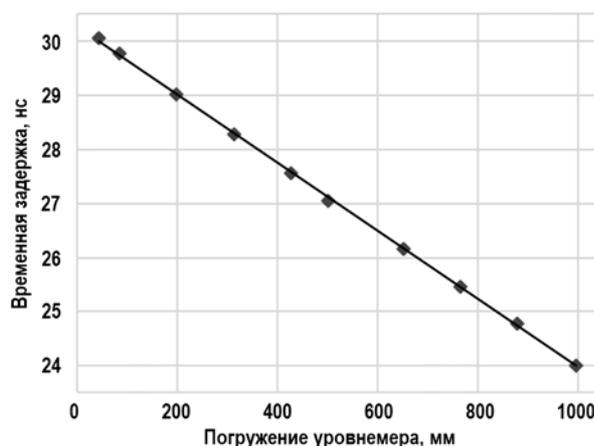


Рис. 5. Зависимость временной задержки сигнала от глубины погружения зонда в водяной теплоноситель

Было подтверждено, что измеряемая временная задержка и выходной ток изменяются пропорционально глубине погружения зонда в жидкость в полном соответствии с пред-

шествующими исследованиями данного метода [18]. Полученные данные представлены на рис. 5, 6. На рисунке 6 видно вполне удовлетворительное совпадение уровня жидкости, регистрируемого рефлекс-радарным уровнемером и фактическим уровнем.

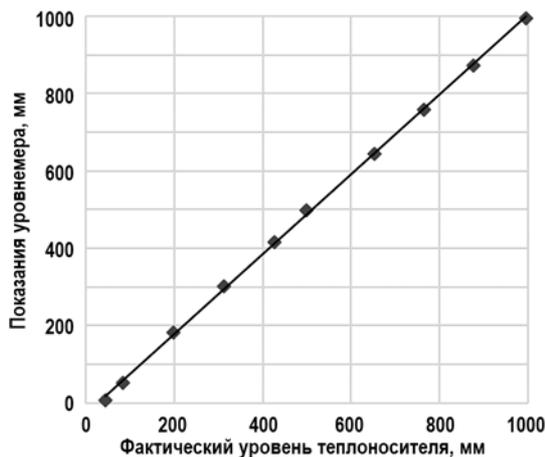


Рис. 6. Сравнительные показания рефлекс-радарного уровнемера и фактического уровня водяного теплоносителя

После проверки работы прибора в водяном теплоносителе были проведены эксперименты с использованием свинцово-висмутового теплоносителя. Для этого контрольный бак установки был заполнен расплавом свинец-висмут, в который был помещен измерительный зонд уровнемера. Температура расплава в системе плавно повышалась от 320 до 350°C. При данном диапазоне температур был проведен первый этап эксперимента на свинцово-висмутовом теплоносителе.

Далее для определения влияния температуры на работоспособность уровнемера второй этап эксперимента был проведен при температуре расплава в интервале 420 – 450°C.

При сравнении экспериментальных данных на свинцово-висмутовом теплоносителе при температурах 320 – 350°C и 420 – 450°C сделан вывод об отсутствии существенного влияния температуры на работу данного рефлекс-радарного уровнемера, поскольку при наложении друг на друга двух графиков для разных температур они практически совпадают. Поэтому авторами проиллюстрировано подтверждение работы уровнемера только для интервала температур 420 – 450°C (рис. 7, 8).

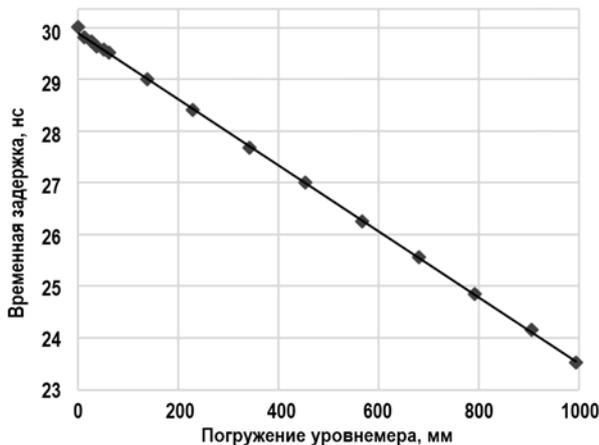


Рис. 7. Зависимость временной задержки сигнала от глубины погружения зонда в теплоноситель свинец-висмут

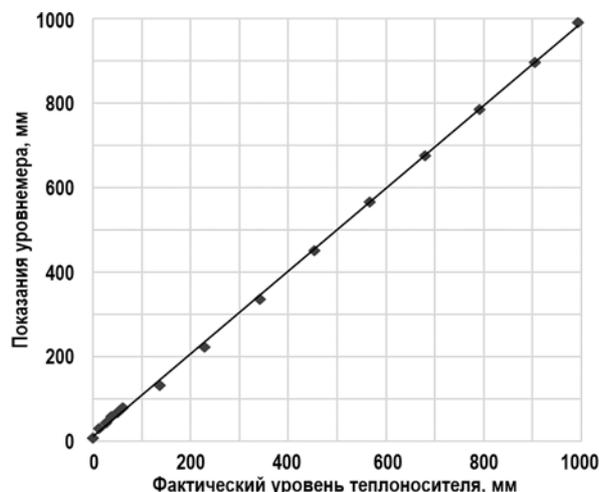


Рис. 8. Сравнительные показания рефлекс-радарного уровнемера и фактического уровня жидкометаллического теплоносителя

Отметим, что при измерении уровня воды при минимальном уровне заполнения (до 50 мм) наблюдается нелинейность изменения выходных сигналов рефлекс-радарного уровнемера от фактического погружения в жидкость, что обусловлено влиянием диэлектрической проницаемости воды [19]. Это необходимо учитывать при проведении калибровки прибора. При этом в свинцово-висмутовом теплоносителе данное явление не наблюдается, так как сигнал полностью отражается от поверхности металла даже при минимальном погружении.

Полученное расхождение уровня, измеренного рефлекс-радарным уровнемером теплоносителя, с фактическим практически находится в пределах нескольких миллиметров, т.е. показано их вполне удовлетворительное совпадение. Среднеквадратичное отклонение измеренного значения уровня от фактического не превышало 8 мм.

После проведения эксперимента на эвтектическом сплаве был повторно проведен успешный эксперимент на водяном теплоносителе в той же емкости. Можно сделать вывод, что погружение рефлекс-радарного уровнемера в теплоноситель свинец-висмут никак не сказалось на его дальнейшей работоспособности в других средах.

На конце чувствительного элемента уровнемера в 50 – 75 мм после экспериментов с ТЖМТ наблюдалось начало окисления его поверхности, так как эта часть датчика дольше всего находилась в металле за время проведения эксперимента. Последующие испытания предварительно показывают отсутствие влияния оксидной пленки на результаты измерения. Однако данный вопрос требует дальнейшего исследования и ресурсных испытаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально подтверждена возможность применения рефлекс-радарного метода для контроля уровня жидкометаллического теплоносителя с достоверной точностью. Устройство для измерения уровня, работающее по предлагаемому методу, позволяет контролировать уровень расплава металлов в емкостях в режиме реального времени с сохранением герметичности контура. Данное устройство применимо для различных энергетических реакторов, ускорительно-управляемых систем, исследовательских реакторов и экспериментальных стендов с жидкометаллическими теплоносителями.

Литература

1. Адамов Е.О., Большов Л.А., Ганев И.Х. и др. Белая книга ядерной энергетики. – М.: Изд-во ГУП НИКИЭТ, 2001. – 269 с. ISBN 5-86324-035-0. Электронный ресурс: <http://>

elib.biblioatom.ru/text/belaya-kniga-yadernoy-energetiki_2001/go,0/ (дата доступа 27.09.2021).

2. Безносков А.В., Бокова Т.А. Оборудование, компоновка и режимы эксплуатации контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2011. – 536 с.

3. Джангобеков В.В., Степанов В.С., Дедуль А.В., Климов Н.Н., Болванчиков С.Н., Вахрушин М.П. Реакторная установка СВБР-100 для модульных атомных станций малой и средней мощности. / Труды IV конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях» (ТЖМТ-2013)». Обнинск, АО «ГЦН РФ-ФЭИ», 23-26 сентября 2013 г. – Обнинск: АО «ГЦН РФ-ФЭИ», 2013. Электронный ресурс: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/publication/publication2013/documents/245.pdf> (дата доступа 27.09.2021).

4. Безносков А.В., Бокова Т.А., Боков П.А., Маров А.Р., Львов А.В., Волков Н.С. Обоснование технических решений реакторного контура установок БРС-ГПГ малой и средней мощности с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем для наземных и плавучих АЭС. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2020. – № 2 (129). – С. 64-75. DOI: https://doi.org/10.46960/1816-210X_2020_2_64.

5. Безносков А.В., Бокова Т.А., Боков П.А., Маров А.Р., Львов А.В., Волков Н.С. Обоснование технических решений реакторного контура установок БРС-ГПГ малой и средней мощности с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2020. – № 1. – С. 132-139. DOI: <https://doi.org/10.55176/2414-1038-2020-1-132-139>.

6. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной энергетике. – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.

7. Чечеткин А.В. Высокотемпературные теплоносители. – М.: Энергия, 1971. – 496 с.

8. Безносков А.В., Драгунов Ю.Г., Рачков В.И. Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике. – М.: ИздАТ, 2007. – 432 с. ISBN: 5-86656-202-2. Электронный ресурс: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003085239> (дата доступа 27.09.2021).

9. Методы измерения и контроля уровня. Виды уровнемеров. Сравнение и обзор уровнемеров. Электронный ресурс: https://eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_1521.html (дата доступа 27.09.2021).

10. Лешков В.В., Таранин В.Д. Индуктивный уровнемер. – Патент РФ, №2328704. – 2008.

11. Таранин В.Д. Индуктивный уровнемер жидкометаллического теплоносителя. – Патент РФ, №2558010. – 2015.

12. Трахтенберг Л.И., Денискин В.П. Устройство для бесконтактного измерения уровня и удельного сопротивления расплавленных металлов. – Патент СССР, №197214. – 1967.

13. Кириллов П.Л., Колесников В.Д., Кузнецов В.А., Турчин Н.М. Приборы для измерения давления, расхода и уровня расплавленных щелочных металлов. // Атомная энергия. – 1960. – Т. 9. – Вып. 3. – С. 173-181. Электронный ресурс: http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t9-3_1960/go,4/ (дата доступа 27.09.2021).

14. Воронцов А.С., Фролов П.А. Импульсные измерения коаксиальных кабелей связи. – М.: Радио и связь, 1985. – 96 с.

15. Тарасов Н.А. Использование метода импульсной рефлектометрии для определения повреждений кабельных линий. Электронный ресурс: <http://reis.narod.ru/metod.htm> (дата доступа 27.09.2021).

16. Needle D., Shepard S.F. Apparatus and methods for time domain reflectometry. Патент США, No. 5726578A. – 1998. Опубл. 10 марта 1998.

17. Инструкции по установке и эксплуатации уровнемера BM100 фирмы KROHNE. Электронный ресурс: www.ste.ru/krohne/pdf/rus/russ_op_manualBM100.pdf (дата доступа 27.09.2021).

18. Мельников В.И., Иванов В.В., Тепляшин И.А., Тимонин М.А. Разработка и исследование микроволнового рефлекс-радарного уровнемера жидкости. // Датчики и системы. – 2017. – №3. – с.50-54.

19. Мельников В.И., Иванов В.В., Тепляшин И.А., Тимонин М.А. Разработка и исследование микроволнового рефлекс-радарного уровнемера теплоносителя ЯЭУ. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2018. – № 2. – С. 15-24. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.2.02>.

20. Тренкаль Е.И., Лоцилова А.Г. Измерение уровней жидкостей методом импульсной рефлектометрии (обзор). // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19. – № 4. DOI: <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2016-19-4-67-73>.

Поступила в редакцию 30.09.2021 г.

Авторы

Мельников Владимир Иванович, профессор, д.т.н.

E-mail: melnikov@nntu.ru

Бокова Татьяна Александровна, доцент, к.т.н.

E-mail: tatabo@bk.ru

Иванов Вадим Владимирович доцент, к.т.н.

E-mail: ivv@nntu.ru

Маров Александр Романович, инженер, аспирант

E-mail: marov_2011@mail.ru

Лобаева Наталья Александровна, магистр

E-mail: natali_lobaeva@mail.ru

Квашенников Анатолий Сергеевич, аспирант

E-mail: kvashan@mail.com

Боков Павел Андреевич, доцент, к.т.н.

E-mail: bokow_pavel@mail.ru

Волков Никита Сергеевич, ассистент, аспирант

E-mail: hortmetall@yandex.ru

UDC 621.039.564

EXPERIMENTAL STUDY OF A MICROWAVE REFLEX-RADAR LEVEL GAUGE OF A LIQUID METAL COOLANT

Melnikov V.I., Bokova T.A., Ivanov V.V., Marov A.R., Lobaeva N.A.,

Kvashennikov A.S., Bokov P.A., Volkov N.S.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

24 Minina Str., 603950 Nizhny Novgorod, Russia

ABSTRACT

The article presents the results of work aimed at solving the problem of measuring the coolant level in the tanks of reactor plants for various purposes with a liquid metal coolant. The authors made a comprehensive review of known methods for measuring the level of various liquids and bulk solids in various industries. Based on this review, they propose and describe a method of pulsed microwave reflectometry as the most promising in terms of combining the characteristics of reliability, accuracy and ease of use. The results of the experimental study demonstrated the efficiency of the level

gauge, which worked according to this method, for measuring the level of lead-bismuth coolant in the control tank under conditions close to natural ones. An analysis of the results confirmed the possibility of using this method to control the level of melts of various metals as applied to reactor plants with HLMT.

Using the device for measuring the level, which works according to the proposed method, it is possible to control the level of melt of various metals in tanks in real time without the need to move various parts of the sensitive element of the level gauge while maintaining the tightness of the circuit. This device is applicable for various nuclear power plants, accelerator-controlled systems, research reactors and experimental facilities with liquid metal coolants.

Key words: fast reactor, liquid metal coolant, coolant level, level measurement, level measurement methods.

REFERENCES

1. Adamov E.O., Bolshov L.A., Ganey I.Kh., Zrodnikov A.V., Kuznetsov A.K., Lopatkin A.V., Mastepanov A.M., Orlov V.V., Rachkov V.I., Smirnov V.S., Solonin M.I., Uzhanova V.V., Chernoplekov N.A., Shatalov G.E. *White Book of Nuclear Power*. Moscow. GUP NIKIET Publ., 2001. 269 p. ISBN 5-86324-035-0. Available at: http://elib.biblioatom.ru/text/belaya-kniga-yadernoy-energetiki_2001/go,0/ (accessed Sep. 27, 2021) (in Russian).
2. Beznosov A.V., Bokova T.A. *Equipment, Layout and Operation Modes of Circuits with Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Power*. Nizhny Novgorod. NGTU Publ., 2011, 536 p. (in Russian).
3. Dzhangobekov V.V., Stepanov V.S., Dedul A.V., Klimov N.N., Bolvanchikov S.N., Vakhrushin M.P. Reactor Unit SVBR-100 for Modular Atomic Stations of Low and Medium Power. *Proc. of the IV Conference «Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technologies» (HLMC-2013)», Sep. 23-26 2013. Obninsk.* IPPE JSC Publ., 2013. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/publication/publication2013/documents/245.pdf> (accessed Sep. 27, 2021) (in Russian).
4. Beznosov A.V., Bokova T.A., Bokov P.A., Marov A.R., Lvov A.V., Volkov N.S. Substantiation of Technical Solutions of the Reactor Circuit of the BRS-GPG Units of Small and Medium Power with a Heavy Liquid Metal Coolant for Ground and Floating NNPs. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2020, no. 2 (129), pp. 64-76; DOI: https://doi.org/10.46960/1816-210X_2020_2_64 (in Russian).
5. Beznosov A.V., Bokova T.A., Bokov P.A., Marov A.R., Lvov A.V., Volkov N.S. Substantiation of Technical Solutions of the Reactor Circuit of the BRS-GPG Units of Small and Medium Power. *VANT. Ser. Yaderno-Reaktornye Konstany*. 2020, no. 1, pp. 132-139; DOI: <https://doi.org/10.55176/2414-1038-2020-1-132-139> (in Russian).
6. Chirkin V.S. *Thermophysical Properties of Materials in Nuclear Power*. Moscow. Atomizdat Publ., 1968, 484 p. (in Russian).
7. Chechetkin A.V. *High Temperature Heat Transfer Fluids*. Moscow. Energiya Publ., 1971, 496 p. (in Russian).
8. Beznosov A.V., Dragunov Yu.G., Rachkov V.I. *Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Energy*. Moscow. IzDAT Publ., 2007, 432 p. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003085239> (accessed Sep. 27, 2021) (in Russian).
9. Methods for Measuring and Controlling the Level. Types of Level Gauges. Comparison and Overview of Level Gauges. Available at: https://eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_1521.html (accessed Sep. 27, 2021) (in Russian).
10. Leshkov V.V., Taranin V.D. *Inductive Level Gauge*. Patent for Invention of the Russian Federation 2328704. No. 2006141311/28. Appl. 23.11.2006. Publ. 07.10.2008 (in Russian).
11. Taranin V.D. *Inductive Level Gauge for Liquid Metal Coolant*. Patent for Invention of the Russian Federation 2558010. No. 2013146131/28. Appl. 10/15/2013. Publ. 07/27/2015 (in Russian).
12. Trakhtenberg L.I., Deniskin V.P. *Device for Non-Contact Measurement of the Level and*

Resistivity of Molten Metals. Patent for invention of the USSR 197214. No. 1018402 / 26-10. Appl. 07/12/1965. Publ. 05/31/1967 (in Russian).

13. Kirillov P.L., Kolesnikov V.D., Kuznetsov V.A., Turchin N.M. Instruments for Measuring Pressure, Flow and Level for Fused Alkali Metals. *Atomnaya Energiya*. 1960, v. 9, iss. 3, pp. 173-181; Available at: http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t9-3_1960/go,4/ (accessed Sep. 27, 2021) (in Russian).

14. Vorontsov A.C., Frolov P.A. *Pulse Measurements of Coaxial Communication Cables*. Moscow. Radio i Svyaz' Publ., 1985, 96 p. (in Russian).

15. Tarasov N.A. Using the Method of Impulse Reflectometry to Determine the Damage of Cable Lines. Available at: <http://reis.narod.ru/metod.htm> (accessed Sep. 27, 2021) (in Russian).

16. Needle D., Shepard S.F. *Apparatus and Methods for Time Domain Reflectometry*. Patent of the USA 5726578A Publ. 03/10/1998.

17. Instructions for Installation and Operation of the KROHNE BM100 Level Gauge. Available at: www.ste.ru/krohne/pdf/rus/russ_op_manualBM100.pdf (accessed Sep. 27, 2021) (in Russian).

18. Melnikov V.I., Ivanov V.V., Teplyashin I.A., Timonin M.A. Development and Research of a Microwave Reflex-Radar Liquid Level Gauge. *Datchiki i Sistemy*. 2017, no. 3, pp. 50-54 (in Russian).

19. Melnikov V.I., Ivanov V.V., Teplyashin I.A., Timonin M.A. Development and Study of a Microwave Reflex-Radar Level Gauge of the Nuclear Reactor Coolant. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2018. no. 2, pp. 185-190; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.2.02> (in Russian).

20. Trenkal E.I., Loshchilov A.G. Measurement of Liquid Levels by the Method of Pulse Reflectometry (Review). *Doklady TUSUR*. 2016, v. 19, no. 4; DOI: <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2016-19-4-67-73> (in Russian).

Authors

Melnikov Vladimir Ivanovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: melnikov@nntu.ru

Bokova Tatiana Aleksandrovna, Assistant Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: tatabo@bk.ru

Ivanov Vadim Vladimirovich, Assistant Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: ivv@nntu.ru

Marov Aleksandr Romanovich, Engineer, PhD Student

E-mail: marov_2011@mail.ru

Lobaeva Nataliya Aleksandrovna, Master Student

E-mail: natali_lobaeva@mail.ru

Kvashennikov Anatoly Sergeevich, PhD Student

E-mail: kvashan@mail.com

Bokov Pavel Andreevich, Assistant Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: bokow_pavel@mail.ru

Volkov Nikita Sergeevich, Assistant, PhD Student

E-mail: hortmetall@yandex.ru