

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОПЛАВКОВО-ДИСКРЕТНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ТЯЖЕЛОГО ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ¹

© 2023 г. Т. А. Бокова^а *, А. Г. Мелузов^а, Н. С. Волков^а,
А. Р. Маров^а, Т. К. Зырянова^а, Р. В. Сумин^а, М. Д. Погорелов^а

^аНижегородский государственный технический университет (НГТУ) им. Р.Е. Алексеева,
ул. Минина, д. 24, г. Нижний Новгород, 603155 Россия

*e-mail: tatabo@bk.ru

Поступила в редакцию 31.03.2023 г.

После доработки 14.07.2023 г.

Принята к публикации 01.08.2023 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований применимости поплавково-дискретного метода измерения уровня тяжелого жидкометаллического теплоносителя (ТЖМТ) с использованием герметизированных магнитоуправляемых контактов в качестве чувствительного элемента. Данные контакты регистрируют уровень теплоносителя в поле постоянного магнита, находящегося на поверхности тяжелого жидкометаллического теплоносителя. Работоспособность такого уровнемера была изучена с применением контрольной емкости со свинцово-висмутовым теплоносителем в условиях, приближенных к натурным. Этот метод прост, но его основная проблема – сохранение целостности герметизированных магнитоуправляемых контактов при воздействии высоких температур. Эксперименты выполнялись с помощью прототипа поплавково-дискретного уровнемера (ПДУ) на высокотемпературном стенде со свинцово-висмутовым теплоносителем. Данные, собранные в ходе обработки результатов, с достоверной точностью подтверждают применимость поплавково-дискретного метода контроля уровня тяжелого жидкометаллического теплоносителя. Устройство измерения уровня ТЖМТ, работающее по такому методу, позволяет следить за уровнем в емкостях с сохранением герметичности контура. Благодаря этому можно отказаться от распространенных в настоящее время способов определения уровня ТЖМТ с помощью электроконтактных уровнемеров, при которых герметизация контура невозможна. Данное устройство можно использовать на различных экспериментальных стендах с жидкометаллическими теплоносителями, а также в реакторных установках и ускорительно-управляемых системах в температурном диапазоне 210–230°С, например MYRRHA. Для обеспечения работоспособности уровнемера при более высоких температурах необходима модернизация системы охлаждения герконов.

Ключевые слова: ядерные энергетические установки, реактор на быстрых нейтронах, жидкометаллический теплоноситель, уровень ТЖМТ, методы измерения, поплавково-дискретный уровнемер

DOI: 10.56304/S0040363623120032

Ядерная энергетика как технология выработки энергии обладает уникальным сочетанием качеств: имеет высокий коэффициент использования установленной мощности, экологична и безопасна. Сегодня особое внимание уделяется перспективным ядерным энергетическим установкам (ЯЭУ) с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем, поскольку реакторы с ТЖМТ характеризуются внутренней самозащищенностью и более высоким КПД по сравнению с реакторами типа ВВЭР [1].

Для стабильной работы ЯЭУ необходимо обеспечить автоматическое управление и контроль параметров теплоносителя. Ядерные энергетические установки с ТЖМТ имеют преимущественно интегральную (баковую) компоновку. В настоящее время в России активно ведутся работы по созданию реакторных установок типа БРЕСТ, СВБР и БРС-ГПГ² [1–5]. В реакторе интегральной компоновки можно разместить все оборудование I контура в едином корпусе, что существенно повышает

¹ Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2023-0005 “Особенности и специфика применения тяжелых жидкометаллических теплоносителей в реакторных установках на быстрых нейтронах”).

² БРЕСТ – быстрый реактор (на быстрых нейтронах) естественной безопасности со свинцовым теплоносителем, СВБР – свинцово-висмутовый быстрый реактор, БРС-ГПГ – быстрый реактор со свинцовым охлаждением с горизонтальным парогенератором.

надежность и безопасность реактора при внешних воздействиях. При такой компоновке оборудования I контура сокращается тракт циркуляции теплоносителя и, следовательно, уменьшается общее гидравлическое сопротивление. Благодаря этому условия выхода на режим естественной циркуляции в I контуре при аварийных ситуациях улучшаются, а затраты энергии на прокачку теплоносителя становятся меньше.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И ОБЗОР МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Реакторным установкам с баковой компоновкой свойственно наличие свободного уровня теплоносителя I контура, который необходимо непрерывно контролировать и поддерживать в рабочем диапазоне. Выбор средств и методов измерения уровня ТЖМТ затруднен из-за высоких температур теплоносителя и сложных условий использования ТЖМТ.

На показания уровнемеров существенное влияние оказывают следующие условия эксплуатации реакторных установок с ТЖМТ:

широкий диапазон рабочих температур (200–550°С);

высокая коррозионная активность теплоносителя по отношению к конструкционным материалам;

неравномерность температурных полей в различных частях установки;

необходимость создания защитных оксидных покрытий на поверхностях конструкций;

наличие газовых смесей (инертного газа, водорода, кислорода) в газовых подушках емкостей и в растворенном состоянии в теплоносителе;

обязательное соблюдение условия герметичности контура [6–8].

Наибольшее распространение в исследовательских стендовых контурах в качестве измерителя уровня ТЖМТ получил электроконтактный сигнализатор. Принцип действия этого электроконтактного прибора (рис. 1) заключается в замыкании электрической цепи при соприкосновении электрода с теплоносителем. В верхней крышке контролируемой емкости установлено уплотнение, через которое во внутреннюю полость бака вводится электроконтактный зонд. Помимо узла уплотнения, зонд вворачивается в фиксирующую пластину с ответной резьбой, которая крепится на стойке из текстолитовой пластины и опорных уголков. Таким образом электроконтактный зонд, электроизолированный от корпуса контролируемой емкости текстолитовой пластиной и фторопластовой прокладкой, перемещается вертикально внутри бака.

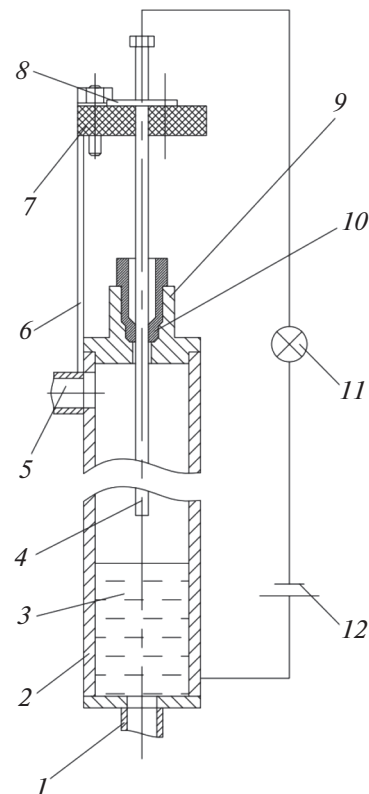


Рис. 1. Электроконтактный уровнемер.

1 – подвод/отвод теплоносителя; 2 – контролируемая емкость; 3 – свободный уровень теплоносителя; 4 – электроконтактный зонд; 5 – подвод/отвод газа; 6 – опорный уголок; 7 – текстолитовая пластина; 8 – фиксирующая пластина; 9 – уплотнение; 10 – фторопластовая прокладка; 11 – световая сигнализация; 12 – источник напряжения

Конструкция электроконтактного уровнемера не обеспечивает должную герметичность контура из-за износа фторопластовой прокладки, что ведет к бесконтрольному окислению теплоносителя. А это, в свою очередь, способствует образованию твердых оксидов, забиванию проходных сечений контура циркуляции и приводит к частичному или полному разрушению проточной части насосов, нарушению теплоотвода от активной зоны и другим негативным последствиям. Поэтому требуются поиск и разработка других методов измерения уровня ТЖМТ.

В работе [9] представлен обзор методов измерения уровня ТЖМТ, некоторые из них применимы лишь для открытых емкостей и не могут обеспечить герметичность контура либо представляют собой технически сложные устройства, требующие тонкой калибровки. Одними из самых адаптируемых к условиям всех режимов работы энергоблока методами (вплоть до тяжелых аварий) являются температурные измерения. Для индикации уровня теплоносителя на определен-

ных отметках реактора типа ВВЭР используются термоэлектрические индикаторы уровня типа ТІР-1509 (ТУ У 33.2-04850451-090:200). В основу их работы заложен термоанемометрический принцип — изменение коэффициента теплоотдачи с поверхности прибора в зависимости от среды (вода, пароводяная смесь, воздух и т.д.), в которой находится индикатор [10]. Температурные индикаторы уровня — один из наиболее надежных инструментов, позволяющих оценить объем теплоносителя в реакторной установке. Но на стабильность, скорость и достоверность определения перехода термоэлектрических индикаторов уровня ТЖМТ из состояния “мокрый” в состояние “сухой” и обратно оказывают влияние дисбалансы в работе реакторных установок, возникающие в результате останова одного или нескольких циркуляционных насосов, изменения направления циркуляции теплоносителя и пр. Как итог, возможны как ложное срабатывание индикатора, так и его аварийное несрабатывание.

Для контроля за уровнем расплавов металлических теплоносителей используют многоточечные сигнализаторы на основе компактных индукционных преобразователей и индуктивные уровнемеры [11, 12]. Прототипы подобных устройств испытаны экспериментально [13–15]. Применяются также потенциометрические приборы, действие которых базируется на измерении сопротивления трубчатого зонда, погруженного в металл [16]. Некоторые из этих разработок были выполнены десятки лет назад и отличаются чрезвычайно высокой стоимостью и низкой надежностью [17].

ПОПЛАВКОВО-ДИСКРЕТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ТЖМТ

Для решения проблемы герметичности можно использовать ПДУ, конструкция которого не имеет подвижных частей, влияющих на общую герметичность. Действие ПДУ основано на регистрации замыкания герметизированного магнитоуправляемого контакта (геркона) при воздействии постоянного магнитного поля заданного значения, создаваемого постоянным магнитом, находящимся на поверхности контролируемой жидкости. Использование такого устройства обеспечивает полную герметичность узла установки уровнемера.

Известны приборы, работающие по такому же принципу [18, 19]. Однако они недостаточно надежны и точны. В состав ПДУ реперных точек [18] входят герконы — довольно хрупкие герметичные контакты, число которых зависит от высоты контролируемой емкости и которые подвержены термическим и вибрационным нагрузкам в условиях реакторной установки. Вывод из строя некоторого количества из них влечет за собой снижение точности и достоверности результатов измерения. Ре-

монт дискретного уровнемера довольно трудозатратен ввиду статичной его установки в крышку реакторной установки. Дублирование каждого геркона может привести к удорожанию уровнемера и к трудностям в процессе его эксплуатации.

Дискретный уровнемер с подвижным чувствительным элементом (герконом) [19] лишен этих недостатков. В такой конструкции достаточно одного—четырех герконов для удовлетворительной точности измерения уровня теплоносителя. При этом данный прибор ремонтпригоден из-за малого количества чувствительных элементов, которые при выходе из строя могут быть легко заменены при извлечении зонда без нарушения общей герметичности контура реакторной установки.

Для эксперимента по обоснованию применимости ПДУ для ТЖМТ подобрана модель замыкающих герконов МКА-14103 группы Б (рис. 2) как наиболее термически стойкая из доступных на рынке. Она имеет оптимальные значения магнитодвижущей силы срабатывания (20–35 А) и отпускания (не менее 4 А). Магнитное поле создается постоянными магнитами цилиндрической формы, изготовленными из сплава альнико (AlNiCo), с рабочей температурой до 500°C, установленными симметрично в сепараторе поплавка. Три геркона расположены один за другим по высоте на зонде и опускаются в магнитное поле в герметичном чехле, защищающем их от контакта с ТЖМТ. Герконы подключены параллельно к источнику питания через световые индикаторы. Кабели в уровнемере, соединяющие электрическую цепь, не контактируют с ТЖМТ и газовой полостью контрольной емкости. Они размещены по высоте на зонде. Чехол зонда снизу заварен заглушкой, и кабели выведены сверху в помещение. Так как чехол зонда герметичен по отношению к ТЖМТ и газовой полости над расплавом, то нет необходимости в специальных мерах по герметизации кабелей при выходе их из чехла (гермовводы, штуцеры, герметичные клеммные коробки не требуются). При этом электрическая изоляция кабелей выполнена из набора керамических изоляторов, позволяющих работать при высоких температурах.

При попадании в магнитное поле герконы срабатывают, происходит замыкание электрической цепи и загорается световой индикатор. При этом движение зонда прекращается и измеряется глубина погружения зонда. При последующем движении происходит отпускание герконов (размыкание электрической цепи) при выходе из магнитного поля, о чем свидетельствует затухание светового индикатора и также отмечается глубина отпускания. Помимо этого эталонным электроконтактным уровнемером определяется уровень теплоносителя. Таким образом, при из-

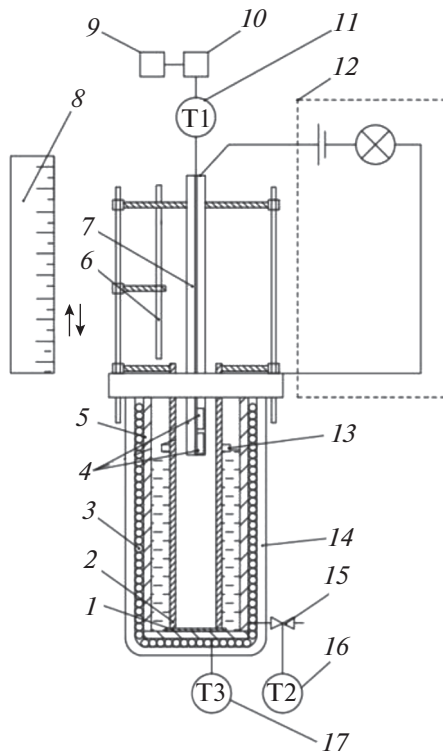


Рис. 2. Схема экспериментального стенда.

1 – заглушка; 2 – чехол зонда; 3 – трубчатый электронагреватель; 4 – герконы; 5 – контрольный бак; 6 – электроконтактный уровнемер; 7 – зонд; 8 – линейка; 9 – компьютер; 10 – измеритель-регулятор МЕТАКОН-562; 11, 16, 17 – термопара Т1, Т2 и Т3; 12 – электрическая цепь; 13 – поплавок; 14 – теплоизоляция; 15 – вентиль слива теплоносителя

менении уровня теплоносителя разница между срабатыванием и отпуском герконов имеет постоянное значение.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментальное исследование прототипа ПДУ проходило в два этапа: на воздухе и в среде ТЖМТ. На обоих этапах при прямом и обратном ходе определялись протяженность зоны срабатывания – разность между точками срабатывания (действие магнитоуправляемого контакта при воздействии магнитного поля заданной напряженности) и отпуская (действие магнитоуправляемого контакта при уменьшении напряженности магнитного поля менее заданного значения) и разность между точками срабатывания/отпуска и действительным уровнем теплоносителя.

Значение напряженности магнитного поля изначально было задано подбором высоты, диаметра, взаимного расположения цилиндрических магнитов в поплавке и их количеством с учетом конкретных герконов, каждый из которых имеет

конкретные магнитные характеристики. Таким образом, заданное значение напряженности магнитного поля зависело от применяемых герконов и всей магнитной системы уровнемера (конфигурации магнитов в поплавке, их числа, размеров, а также от конструктивных материалов уровнемера).

На первом этапе экспериментального исследования проверяли работоспособность прототипа ПДУ на воздухе с имитацией положения уровня теплоносителя путем изменения положения поплавка с магнитами, а также предварительно определяли необходимое количество магнитов и оценивали влияние конструкции прототипа ПДУ на их магнитное поле. Изучали, как влияет вращение поплавка и зонда на срабатывание и отпускание герконов в горизонтальной плоскости с центром в оси системы. На данном этапе подбирали оптимальную магнитную систему (рис. 3), которая будет работать на последующих этапах испытания.

В ходе эксперимента было определено оптимальное количество магнитов в сепараторе поплавка, которое, с одной стороны, устраняло бы влияние соосного поворота поплавка относительно герконов, а с другой – создавало бы магнитное поле такой напряженности и такую картину линий магнитной индукции, при которых не возникали бы зоны ложного срабатывания герконов. Важным показателем правильной работы ПДУ является то, что протяженность зоны срабатывания меньше длины корпуса геркона. Была подобрана оптимальная высота магнитов, влияющая на создаваемое магнитное поле, которое давало бы достаточно широкую зону срабатывания при комнатной температуре, так как при повышении температуры ожидалось изменение магнитной системы с уменьшением зоны срабатывания.

На втором этапе проверяли работоспособность прототипа ПДУ в среде свинцово-висмутного теплоносителя при температурах 210–230 и 420–450°C. Действительный уровень теплоносителя определяли с помощью электроконтактного уровнемера. При этом температура сплава и герконов контролировалась хромель-алюмелевыми термопарами.

Экспериментальные данные, полученные на воздухе и свинцово-висмутном теплоносителе при температурах герконов 210–230°C, представлены на рис. 4, 5 (показаны зоны срабатывания только одного геркона из трех, зоны срабатывания остальных герконов аналогичны).

Анализ экспериментальных данных показал, что протяженность зоны срабатывания меньше длины корпуса геркона. Это значит, что высота магнитов в поплавке была подобрана вполне корректно. В ходе эксперимента не было обнаружено влияния соосного поворота поплавка на работу ПДУ, что свидетельствует о правильно выбран-

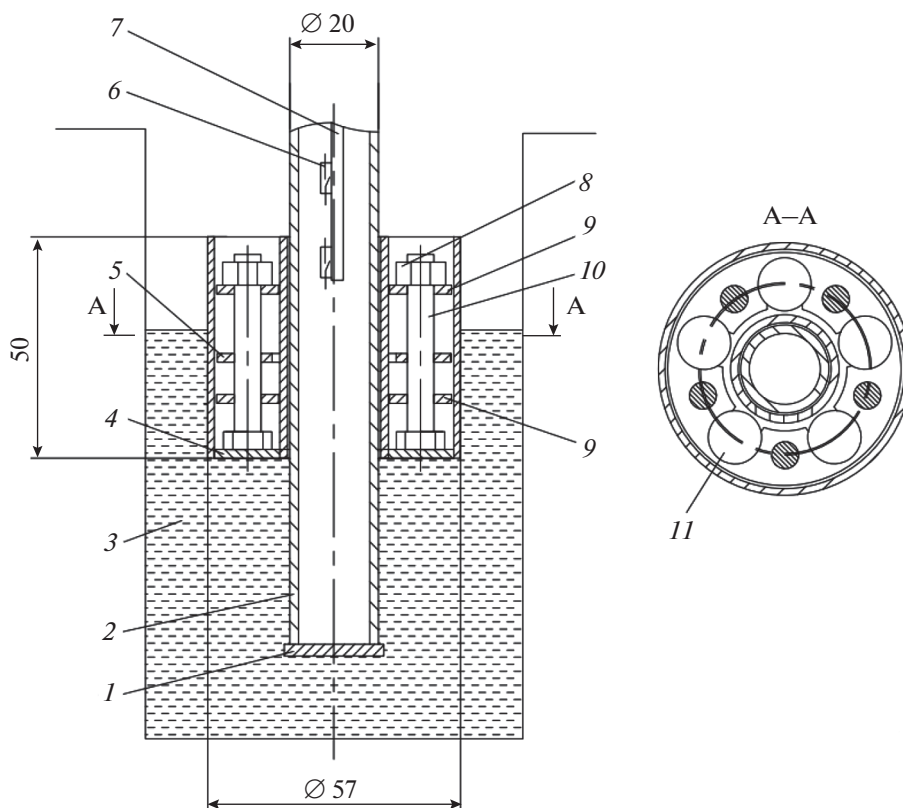


Рис. 3. Схема экспериментальной сборки.

1 – заглушка; 2 – чехол зонда; 3 – теплоноситель; 4 – поплавок; 5 – кольцо; 6 – геркон; 7 – зонд прототипа ПДУ; 8 – гайка; 9 – крышка; 10 – болт; 11 – магнит

ном количестве магнитов. Было зафиксировано уменьшение зоны срабатывания при работе ПДУ при температуре герконов 210–230°C, что происходит при изменении магнитной системы. Расхождение между фактическим значением уровня ТЖМТ и точками срабатывания/отпускания оказалось величиной переменной для всех герконов на всех уровнях теплоносителя, следовательно, необходима доработка магнитной системы в целом и плавучести поплавка для получения более стабильного результата с меньшей погрешностью.

В ходе испытаний ПДУ в среде ТЖМТ при температуре герконов 420–450°C было выявлено, что геркон модели МКА-14103 группы Б теряет свои магнитные свойства и перестает реагировать на магнитное поле. После извлечения зонда и его остывания была произведена разборка конструкции и установлено, что целостность герконов не нарушена. Повторная проверка работоспособности герконов на воздухе показала, что работоспособность этих герконов не утрачена. Потеря работоспособности при температуре 420–450°C может быть вызвана термическим расширением материалов контакт-элементов, а также их температурной деформацией, приводящей к изменению магнитных свойств геркона.

Для обеспечения работоспособности уровня при температуре 420–450°C необходимо провести модернизацию конструкции. Можно охладить герконы воздухом, продуваемым через специальный канал изнутри чехла зонда, можно также покрыть внутреннюю поверхность чехла теплоизолирующим материалом. Это позволит снизить температуру самих герконов и обеспечит их работоспособность в данном температурном диапазоне.

Анализ экспериментальных данных показал, что при различных температурных режимах наблюдаются определенные закономерности: при температуре 20°C фактический уровень находится по середине между точками срабатывания и отпускания при прямом ходе, а при температуре 210–230°C он всегда располагается около точки отпускания при обратном ходе. В данном случае это связано с погружением поплавка с магнитом в расплав металла.

При измерении уровня ТЖМТ при температуре 210–230°C можно воспользоваться методом, согласно которому зонд приводят в движение обратным ходом, а за фактический уровень ТЖМТ принимают координату точки отпускания герко-

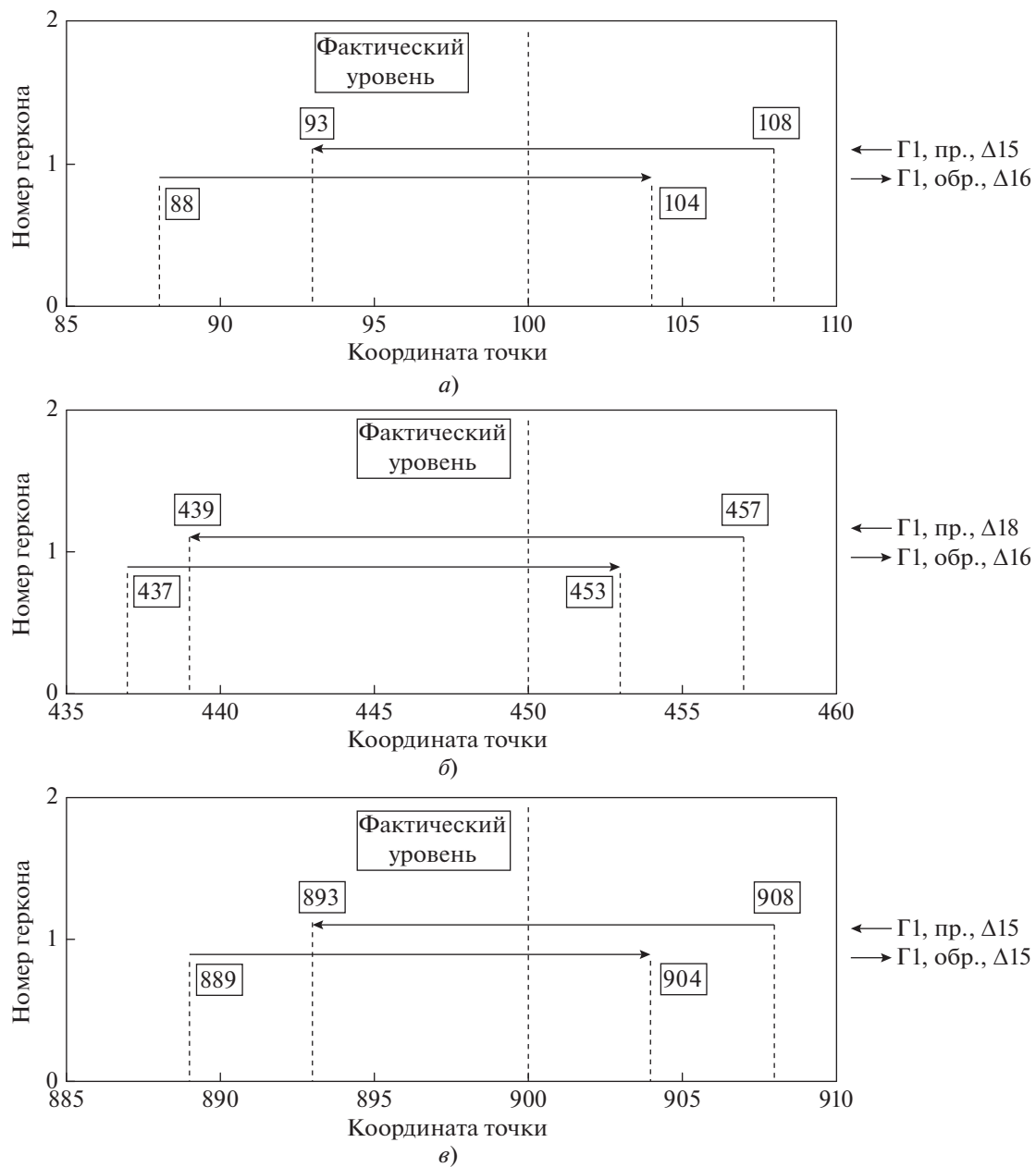


Рис. 4. Протяженность зон срабатывания геркона МКА-14103 группы Б на уровне 100 (а), 450 (б) и 900 (в) мм при пяти магнитах и температуре герконов 20°C.
Г1 – геркон; пр., обр. – прямой и обратный ход; Δ – протяженность зоны срабатывания геркона

на. При этом прямой ход можно использовать в качестве ориентира для поиска местоположения поплавка. В этом случае погрешность измерения уровня составляет ± 1.2 мм (включая погрешность металлической линейки длиной 1000 мм по ГОСТ 427-75 [20]) при разных уровнях теплоносителя.

В диапазоне рабочих температур 210–230°C можно использовать ПДУ в ускорительно-управляемой системе типа MYRRHA [21].

ВЫВОДЫ

1. Устройство для измерения уровня ТЖМТ, действующее по предложенному в статье методу, позволяет контролировать уровень расплава металлов в емкостях с сохранением герметичности контура. Данное устройство применимо на различных экспериментальных стендах, а также в реакторных установках и ускорительно-управляемых системах, работающих с ТЖМТ при температурах герконов 210–230°C.

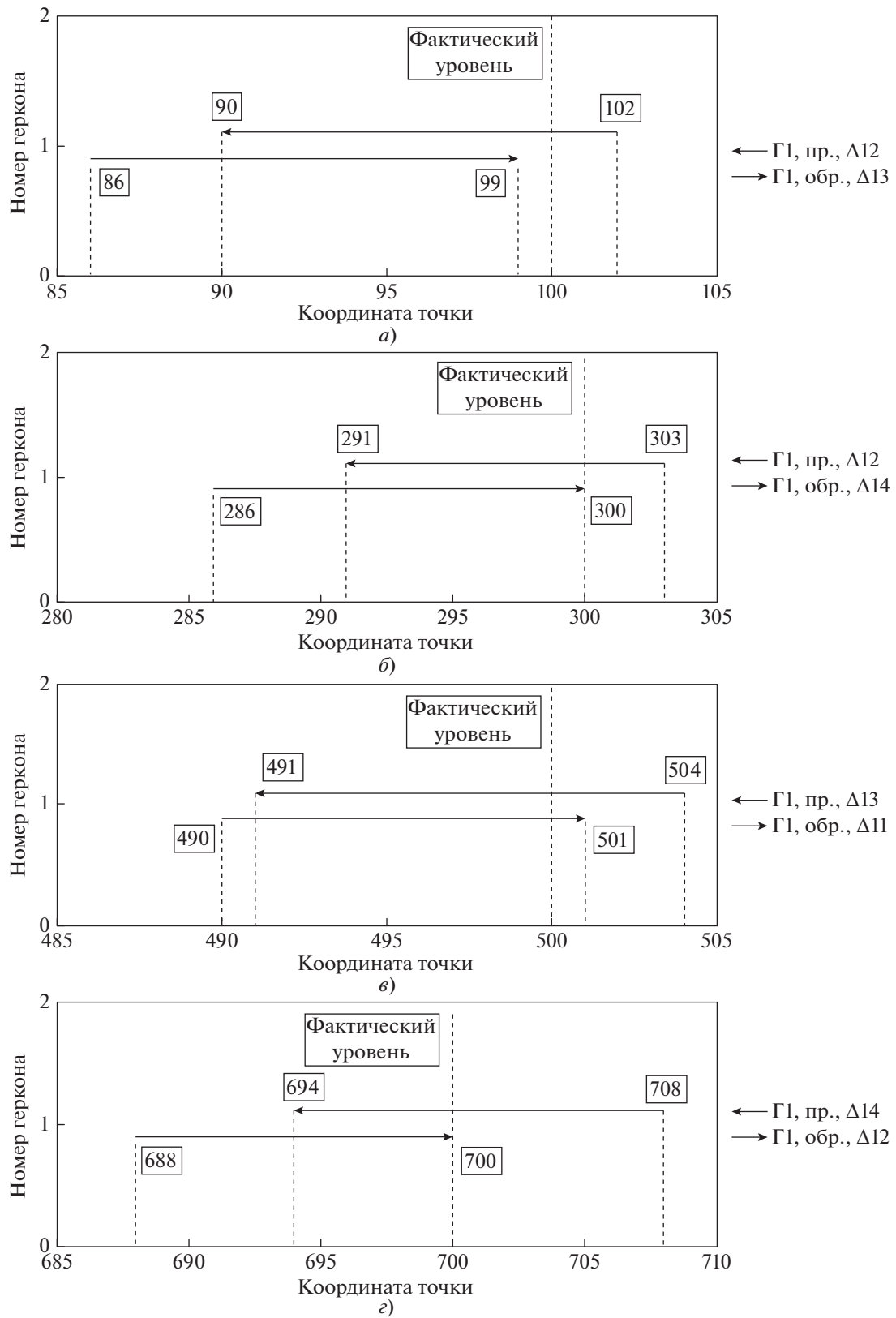


Рис. 5. Протяженность зон срабатывания геркона МКА-14103 группы Б на уровне 100 (а), 300 (б), 500 (в) и 700 (г) мм при пяти магнитах и температуре герконов 210–230°C. Обозначения см. рис. 4

2. Погрешность измерения уровня ТЖМТ составляет ± 1.2 мм при разных уровнях теплоносителя в емкости.

3. При модернизации конструкции ПДУ возможно обеспечить работоспособность уровнемера не только при 210–230°C, но и при более высоких температурах, что, однако, потребует дополнительного экспериментального обоснования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белая книга ядерной энергетики** / Е.О. Адамов, Л.А. Большов, И.Х. Ганев, А.В. Зродников, А.К. Кузнецов, А.В. Лопаткин, А.М. Мастепанов, В.В. Орлов, В.И. Рачков, В.С. Смирнов, М.И. Солонин, В.В. Ужанова, Н.А. Черноплёков, Г.Е. Шаталов. М.: Изд-во ГУП НИКИЭТ, 2001. [Электрон. ресурс.] http://elib.biblioatom.ru/text/belaya-kniga-yadernoy-energetiki_2001/go,0
2. **Безносков А.В., Бокова Т.А.** Оборудование, компоновка и режимы эксплуатации контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2011.
3. **Реакторная установка СВБР-100** для модульных атомных станций малой и средней мощности / В.В. Джангобеков, В.С. Степанов, А.В. Дедуль, Н.Н. Климов, С.Н. Болванчиков, М.П. Вахрушин // Труды IV конф. “Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях” (ТЖМТ-2013). Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 23–26 сент. 2013 г. <https://www.gidropress.podolsk.ru/files/publication/publication2013/documents/245.pdf>
4. **Обоснование** технических решений реакторного контура установок БРС-ГПГ малой и средней мощности с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем для наземных и плавучих АЭС / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, П.А. Боков, А.Р. Маров, А.В. Львов, Н.С. Волков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 2 (129). С. 64–76. https://doi.org/10.46960/1816-210X_2020_2_64
5. **Обоснование** технических решений реакторного контура установок БРС-ГПГ малой и средней мощности с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, П.А. Боков, А.Р. Маров, А.В. Львов, Н.С. Волков // ВАНТ. Сер.: Ядерно-реакторные константы. 2020. Вып. 1. С. 132–139. <https://doi.org/10.55176/2414-1038-2020-1-132-139>
6. **Чиркин В.С.** Теплофизические свойства материалов ядерной энергетики. М.: Атомиздат, 1968.
7. **Чечеткин А.В.** Высокотемпературные теплоносители. М.: Энергия, 1971.
8. **Безносков А.В., Драгунов Ю.Г., Рачков В.И.** Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике. М.: ИздАТ, 2007. <https://search.rsl.ru/ru/record/01003085239>
9. **Liquid metal level measurement techniques** / R. Reshm, U. Ramachandraiah, K.R. Devabalaji, R. Sitharthan: Report on the Intern. Conf. “Recent Trends on Renewable Energy Smart Grid and Electric Vehicle Technologies (RESGEVT 2020)”. Vellore, India, 9 July 2020 // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. V. 937. No. 1. P. 012027. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/937/1/012027>
10. **Кузьменко В.П., Сиренко Н.И., Мовчан А.П.** Контроль уровня теплоносителя в реакторе ВВЭР-1000 при тяжелых авариях с использованием ТИУ // Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Автоматика та приладобудування. 2013. № 8 (982). С. 69–75.
11. **Пат. РФ № 2328704.** Индуктивный уровнемер / В.В. Лешков, В.Д. Таранин. Заявл. 23.11.2006. Оpubл. 10.07.2008 // Б.И. 2008. № 19.
12. **Пат. РФ № 2558010.** Индуктивный уровнемер жидкометаллического теплоносителя / В.Д. Таранин. Заявл. 15.10.2013. Оpubл. 20.04.2015 // Б.И. 2015. № 11.
13. **Measurement techniques for liquid metals** / M. Ratajczak, D. Hernández, T. Richter, D. Otte, D. Buchenau, N. Krauter, T. Wondrak: Report on the Final LIMTECH Colloquium and Intern. Symposium on Liquid Metal Technol. Dresden, Germany, 19–20 Sept. 2017 // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2017. V. 228. No. 1. P. 012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/228/1/012023>
14. **Report of METL mutual inductance level sensor development for use in liquid metals-FY2023** / E. Kent, M. Weathered, J. Rein, D. Kultgen, C. Grandy // Nucl. Sci. Eng. No. ANL-NRIC-002. Argonne National Laboratory (ANL), Argonne, Illinois, USA, 2023.
15. **Eltishchev V., Mandrykin S., Kolesnichenko I.** Inductive level sensor: experiment and calculation: Report on the Intern. Conf. “Advanced Problems of Electrotechnology”. Yekaterinburg, Russia, 1–2 Oct. 2020 // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. V. 950. No. 1. P. 012014.
16. **Авт. свид. СССР № 197214.** Устройство для бесконтактного измерения уровня и удельного сопротивления расплавленных металлов / Л.И. Трахтенберг, В.П. Денискин В.П. Заявл. 12.07.1965. Оpubл. 31.05.1967 // Б.И. 1967. № 12.
17. **Приборы** для измерения давления, расхода и уровня расплавленных щелочных металлов / П.Л. Кириллов, В.Д. Колесников, В.А. Кузнецов, Н.М. Турчин // Атомная энергия. 1960. Т. 9. Вып. 3. С. 173–181. http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t9-3_1960/go,5/
18. **Авт. свид. СССР № 469890.** Дискретный уровнемер / А.А. Азимов, Ш.М. Гулямов, И.Б. Хамадов. Заявл. 18.10.1973. Оpubл. 05.05.1975 // Б.И. 1975. № 17.
19. **Пат. РФ № 2193165.** Дискретный уровнемер / Г.В. Поляев, П.В. Тельминов, В.А. Цымбалист. Заявл. 23.03.2001. Оpubл. 20.11.2002 // Б.И. 2002. № 32.
20. **ГОСТ 427-75.** Линейки измерительные металлические. Технические условия. Введен в действие с 01.01.1977. М.: Стандартиформ, 2007.
21. **Advanced liquid-metal thermal-hydraulic research for MYRRHA** / K. Van Tichelen, G. Kennedy, F. Mirelli, A. Marino, A. Toti, D. Rozzia, E. Cascioli, S. Keijers, P. Planquart // Nucl. Technol. 2020. V. 206. Is. 2: Selected papers from the 2018 Intern. Topical Meeting on Advances in Thermal Hydraulics (ATH 2018). Hilton Orlando Bonnet Creek. Orlando, FL, USA, 11–15 Nov. 2018. P. 150–163. <https://doi.org/10.1080/00295450.2019.1614803>

Experimental Studies of the Float-Discrete Method for Measuring the Level of a Heavy Liquid-Metallic Coolant

T. A. Bokova^{a, *}, A. G. Meluzov^a, N. S. Volkov^a, A. R. Marov^a, T. K. Zyryanova^a,
R. V. Sumin^a, and M. D. Pogorelov^a

^a *Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University (NSTU), Nizhny Novgorod, 603155 Russia*

^{*}*e-mail: tatabo@bk.ru*

Abstract—The results of experimental studies of the applicability of the float-discrete method for measuring the level of a heavy liquid-metal coolant (HLMC) using sealed magnetically controlled contacts as a sensitive element are presented. These contacts register the coolant level in the field of a permanent magnet located on the surface of a heavy liquid-metal coolant. The performance of such a level sensor was studied using a control tank with a lead-bismuth coolant under conditions close to natural ones. This method is simple, but its main problem is maintaining the integrity of sealed magnetically controlled contacts when exposed to high temperatures. The experiments were carried out using a float-discrete level sensor prototype on a high-temperature stand with a lead-bismuth coolant. The data collected during the processing of the results confirm with reliable accuracy the applicability of the float-discrete method for monitoring the level of a heavy liquid-metal coolant. An HLMC level measuring device operating according to this method makes it possible to monitor the level in tanks while maintaining the tightness of the circuit. Due to this, it is possible to abandon the currently common methods for determining the level of HLMC using electric contact level sensors in which the sealing of the circuit is impossible. This device can be used on various experimental stands with liquid-metal coolants as well as in reactor plants and accelerator-controlled systems in the temperature range of 210–230°C, for example MYRRHA. To ensure the operability of the level transmitter at higher temperatures, it is necessary to upgrade the reed switch cooling system.

Keywords: nuclear power plants, fast neutron reactor, liquid-metal coolant, HLMC level, measurement methods, float-discrete level sensor