СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

*И.Д. Вельт**ОАО «НИИТеплоприбор», Москва, Россия*

Рассмотрен кондуктометрический способ, позволяющий измерять уровень жидкого металла (например, лития) без введения каких-либо элементов конструкции уровнемера внутрь резервуара. В зоне возможного положения или перемещения уровня жидкого металла на внешней поверхности резервуара с помощью источника тока и двух токовых электродов создаётся электрическое поле. Когда уровень достигает зону электрического поля, то за счёт шунтирующего эффекта, вызванного высокой электропроводностью жидкого металла, напряжённость поля существенно уменьшается. Таким образом, в качестве меры уровня используется величина напряжённости электрического поля на внешней поверхности резервуара, измеряемая с помощью измерительных электродов и измерительного устройства. Электрическое поле создаётся во всей зоне возможного положения уровня, а измерительные электроды располагаются по вертикали на внешней стенке резервуара через определённые промежутки. Последовательным или одновременным сканированием измерительных электродов на различных участках резервуара дискретно-аналоговым способом определяется место положения уровня жидкого металла.

Ключевые слова: жидкий металл, литий, кондуктометрический уровнемер, резервуар.

METHOD OF LIQUID METAL LEVEL MEASUREMENT

*I.D. Velt**Joint-Stock Company «Research Institute for Heat Power Engineering Instruments» Moscow, Russia*

A conductometric method of liquid metal (e.g. lithium) level measurement without insertion of some level gauge structural elements inside the container is considered. In this method the electrical field is generated in the zone of possible location or shift of the liquid metal level on the container outer surface using current source and two current electrodes. When the metal level reaches the electrical field zone, the field intensity appreciably decreases due to shunting effect produced by high electrical conduction of the liquid metal. Thus the value of electrical field intensity on the container outer surface measured using measuring electrodes and metering device serves as the liquid metal level indicator. The electrical field is generated in all the zone of possible level locations. The measuring electrodes are situated vertically on the container outer surface with some spacing. The position of liquid metal level is determined by discrete-analogous method using consecutive or simultaneous scanning of measuring electrode indications on different container parts.

Key words: liquid metal, lithium, the conductometric level gauge, container.

Предполагается, что в некоторых будущих термоядерных реакторах будет применяться жидкий литий [1]. Одной из инженерных задач при проектировании таких реакторов является измерение уровня жидкого лития, находящегося в резервуаре, в полость которого не допускается проникновение элементов конструкции уровнемера (зондирование). Высокая температура (до 300—800 °С), сложная радиационная обстановка, а также чрезвычайно высокие требования к надёжности существенно ограничивают возможности в выборе способа измерения уровня.

В настоящее время для измерения уровня жидкого натрия на АЭС применяют исключительно индуктивные уровнемеры, содержащие преобразователи в виде системы параллельных мостов из индуктивных катушек, питаемых генератором звуковой частоты, и индикаторов напряжения в диагоналях мостов. Индуктивные катушки распределены по высоте изменения уровня и расположены внутри защитного герметичного металлического чехла, погружаемого в контролируемую среду [2, 3]. Конструкции этих приборов сложны и не позволяют решить задачу измерения уровня металлической среды без зондирования.

Автором предложено техническое решение данной задачи для резервуара из нержавеющей стали — кондуктометрический способ, позволяющий сканировать через металлическую стенку резервуара среды с высокой электропроводностью и обнаруживать её присутствие или отсутствие без контакта деталей конструкции уровнемера с исследуемой средой [4].

Жидкие металлы, в том числе и литий, являются электропроводными жидкостями, что обеспечивает возможность использования данного метода.

Кондуктометрический способ состоит в том, что на внешней поверхности стенки резервуара в предполагаемой зоне изменения уровня жидкого металла внутри резервуара создаётся электрическое поле. Оно образуется током, подводимым к двум электродам, контактирующим с внешней стенкой, причём

один из электродов находится в самой верхней части резервуара, куда может подняться уровень жидкого металла, а другой — в нижней части резервуара. С помощью измерительного устройства и двух сканирующих электродов, закреплённых в выбранной локальной области, определяют напряжённость электрического поля, по значениям которого устанавливают присутствие на данном участке за стенкой резервуара одной из сред, электропроводность которой соответствует либо жидкому литию, либо аргону.

При определении уровня жидкого металла в широком диапазоне его изменения устанавливают несколько электродов через определённые промежутки на внешней поверхности стенки по всему возможному диапазону. Последовательным или одновременным сканированием стенки на различных участках резервуара дискретно-аналоговым способом обнаруживают границу раздела между аргонном и жидким металлом (литием).

Напряжённость электрического поля на внешней поверхности стенки резервуара вычисляется из отношения разности потенциалов между двумя сканирующими электродами к расстоянию между ними. Если подводимый ток не стабилизирован, то полученное значение напряжённости делится на значение этого тока. Сопротивление между токовыми электродами, являющееся нагрузкой стабилизированного источника тока, мало и может изменяться в пределах нескольких миллиом. С помощью этого источника несложно обеспечить ток, создающий электрическое поле с постоянными параметрами независимо от изменения сопротивления нагрузки в указанных пределах.

Если резервуар пустой, т.е. в нём нет жидкого металла, то ток протекает только по его стенке, и в этом случае напряжённость электрического поля на внешней стенке определяется электропроводностью нержавеющей стали и толщиной стенки резервуара. При заданном и неизменном значении подводимого тока чем тоньше стенка резервуара и чем меньше электропроводность стали, из которой выполнен резервуар, тем больше напряжённость электрического поля на его стенке.

Если резервуар заполнен, то из-за шунтирующего воздействия на него проводящего слоя жидкого металла напряжённость на внешней стенке резервуара становится существенно ниже соответствующей резервуару пустому. Чем выше электропроводность жидкого металла и толще его слой, контактирующий с внутренней стенкой резервуара, тем значительнее уменьшение напряжённости электрического поля на внешней стенке. Электропроводность жидкого лития составляет приблизительно 2 МСм/м, что примерно равно электропроводности нержавеющей стали, а размер слоя, прилегающего к стенке, намного больше (в 5—10 раз и более) толщины стенки.

Рис. 1—3 поясняют предлагаемый кондуктометрический способ измерения уровня.

Рис. 1. Кондуктометрический способ измерения уровня: 1 — жидкий металл; 2 — цилиндрический резервуар; 3 — электроды

Рис. 2. Схема уровнемера внутри резервуара: 1 — жидкий металл; 2 — цилиндрический резервуар; 3 — цилиндрический корпус; 4 — электроды

Рис. 3. Способ измерения уровня в узкой зоне: 1 — жидкий металл; 2 — цилиндрический резервуар; 3 — электроды

На рис. 1 изображён цилиндрический резервуар 2 высотой, например, порядка 5 м, выполненный из нержавеющей стали, в котором находится жидкий литий 1 при рабочей температуре 350—800 °С. К внешней стороне резервуара 2 приварены электроды 3 из нержавеющей стали. Два крайних электрода — токовые, остальные предназначены для сканирования стенки резервуара. Все электроды расположены по вертикальной линии (по образующей цилиндра резервуара) на одинаковом расстоянии друг от друга, на-

пример, приблизительно через 400—500 мм. Источник стабильного импульсного, биполярного низкочастотного (0,5—5 Гц) тока подводится к двум токовым электродам. Ток протекает по стенке резервуара, создавая электрическое поле, напряжённость которого имеет вертикально направленный компонент.

Применяя известные методы теории подобия и размерностей, можно получить простую приближённую формулу сопротивления между токовыми электродами, имеющую следующий вид при условии, что $\delta \ll \lambda$:

$$R = \lambda / (d\sigma\delta), \quad (1)$$

где λ — расстояние между токовыми электродами; σ — электропроводность материала; δ — толщина стенки; d — диаметр (характерный линейный размер) контактной поверхности токового электрода. Если форма контактной поверхности отличается от круга, то характерный линейный размер контакта токового электрода можно заменить выражением

$$d \approx \sqrt{S}, \quad (2)$$

где S — площадь контактной поверхности токового электрода.

Для примера зададим значения параметров резервуара: $\lambda = 5$ м, $\sigma = 2$ МСм/м (для нержавеющей стали), $\delta = 0,015$ м, $S = 25 \cdot 10^{-6}$ м², вычисляемая из (2) при $d \approx 5$ мм. Отметим, что контактная площадка токовых электродов должна быть выполнена с относительно высокой точностью, а для сканирующих электродов эти требования практически отсутствуют, лишь бы был контакт со стенкой резервуара. Вычисленное по (1) сопротивление между токовыми электродами $R \approx 33$ мОм. Следовательно, минимальный ток возбуждения, при котором напряжение между токовыми электродами приблизительно 3 мВ, составит порядка 100 мА. При таком токе минимальное напряжение между двумя смежными сканирующими электродами для пустого резервуара составит не менее 100—150 мкВ.

Жидкий литий обеспечивает хороший электрический контакт с нержавеющей сталью [5].

Вследствие высокой электропроводности и большой толщины слоя лития, выраженной в долях от δ , слой лития оказывает значительное шунтирующее действие, которое резко снижает напряжённость электрического поля на внешней поверхности резервуара. Когда литий заполняет резервуар до уровня, полностью замыкающего рассматриваемую смежную пару сканирующих электродов, разность потенциалов этой пары электродов уменьшается в несколько раз. Это можно оценить, увеличив δ , например, в 3 раза, тогда напряжённость электрического поля между электродами при неизменном токе уменьшится тоже в 3 раза.

Применение импульсного электрического поля позволяет отделить информативный компонент сигнала от всех помех электромагнитного происхождения, в том числе вызванных промышленной частотой и термоЭДС. Для этого сигналы со сканирующих электродов измеряют только в те моменты времени, когда электрическое поле постоянно, за исключением времени переходного процесса, соответствующего смене полярности тока и, следовательно, электрического поля. Суммирование сигналов, измеренных при положительном и отрицательном значениях полярности, устраняет вклад паразитных сигналов, не кратных частоте изменения электрического поля. В результате достигается высокая точность измерений. При этом мощность источника тока не превышает нескольких милливатт.

Аналогом измерительного устройства уровнемера может служить электронный блок (ЭБ) магнитного расходомера жидкого металла [6]. В ЭБ имеются стабильный источник низкочастотного импульсного биполярного тока 125 мА и высокоточный измеритель напряжений от нескольких микровольт до 250 мкВ и более. При разработке и испытаниях магнитных расходомеров типа ИРМУ-1 накоплен значительный опыт применения ЭБ в сложных условиях, соответствующих атомной электростанции.

Когда положение уровня жидкого металла оказывается между двумя смежными сканирующими электродами, вычисляется поправка Δy к результату дискретного измерения уровня, который определён с помощью нескольких сканирующих электродов, расположенных ниже рассматриваемой пары. Поправку Δy определяют по формуле

$$\Delta y = \gamma \left[1 - \frac{U - U_{Li}}{U_{Ar} - U_{Li}} \right], \quad (3)$$

где Δy — расстояние уровня до нижнего из двух электродов, между которыми он оказался; γ — расстояние между смежными электродами; U — текущая разность потенциалов между смежными электродами; U_{Ar} — разность потенциалов между смежными электродами, когда на обратной стороне стенки находится

ся аргон на всём расстоянии γ ; U_{Li} — разность потенциалов между смежными электродами, когда на обратной стороне стенки находится литий на всём расстоянии γ .

Чем чаще по вертикали резервуара расположены электроды, тем ниже требования к точности вычисления поправки.

На рис. 2 показана схема уровнемера, применяемая в случае, если имеется возможность ввести внутрь резервуара элементы его конструкции. Он имеет цилиндрический корпус 3, на внутренней стенке которого по вертикали расположены токовые и сканирующие электроды 4. Корпус уровнемера установлен вертикально внутри резервуара 2 с жидким металлом 1. Уровнемеры, изображённые на рис. 1, 2, работают одинаковым образом.

Рис. 3 поясняет способ измерения уровня в узкой зоне. Такой случай обычно возникает, когда требуется сигнализация о достижении уровня наперёд заданного значения. На внешней стороне резервуара 2, в котором находится жидкий металл 1, размещаются две пары электродов 3, приваренных к наружной стенке резервуара в двух точках, расположенных по вертикали на некотором расстоянии друг от друга. Причём в каждой точке приварен один токовый электрод и один сканирующий электрод. Источник стабильного импульсного, биполярного низкочастотного (0,5—5 Гц) тока подводится к двум токовым электродам, а напряжённость электрического поля измеряют между двумя сканирующими электродами. Если полученное значение напряжённости оказывается выше заданного, это означает, что уровень жидкого металла находится ниже нижнего электрода. Если измеренная напряжённость ниже заданного, то уровень превысил верхний электрод. Положение уровня в промежутке между электродами определяется по формуле (3). Для того чтобы жидкий металл был чувствителен к электрическому полю, минимальное расстояние между токовыми электродами должно быть не менее (8—12) δ . Требования к необходимому значению тока для измерений в узкой зоне такие же, как для уровнемеров, показанных на рис. 1, 2.

Данные результатов измерений потенциалов сканирующих электродов позволяют параллельно отслеживать распределение температуры по стенке резервуара и при необходимости корректировать температурную погрешность измерения уровня.

Уровнемеры не требуют специальных метрологических средств для их градуировки, поскольку градуировка определяется конструкцией, т.е. положением электродов на резервуаре или на корпусе.

REFERENCES

1. Kolbasov B.N., Borisov A.A., Vasil'ev N.N., Leonov V.M., Shatalov G.E., Belyakov V.A. et al. Concept of DEMO-S demonstration fusion power reactor. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2007, issue 4, pp. 3—13; http://vant.iterru.ru/vant_2007_4/1.pdf (in Russian).
2. Leshkov V.V., Taranin V.D. Inductive level indicator. RF Patent 2328704. — Bulletin of inventions, 2008, № 19 (in Russian).
3. Leshkov V.V., Taranin V.D. Inductive level indicator. RF Patent 2252397. — Bulletin of inventions, 2005, № 14 (in Russian).
4. Vel't I.D. Conductometric method for measuring the liquid sodium level. — Izmeritel'naya tekhnika (Measurement technology), 2014, № 8, pp. 38—41 (in Russian).
5. Zharkov M.Yu., Lyublinskiy I.E., Vertkov A.V. Vertical lithium limiter for experiments on the T11-M tokamak. — In: The Tenth International Ural Seminar «Radiation Damage Physics of Metals and Alloys». Abstracts, February 25 — March 3, 2013, pp. 47—48 (in Russian).
6. Vel't I.D., Mikhaylova Yu.V. Magnetic flowmeter for liquid metals. — Izmeritel'naya tekhnika (Measurement technology), 2013, № 3, pp. 24—28 (in Russian).

AUTHORS

Vel't I.D. Joint-Stock Company «Research Institute for Heat Power Engineering Instruments» Mira prosp. 95, 129085 Moscow, Russia; veltivand@gmail.com

Received 23 October 2014
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2015, vol. 38, issue 1, pp. 22—25.