

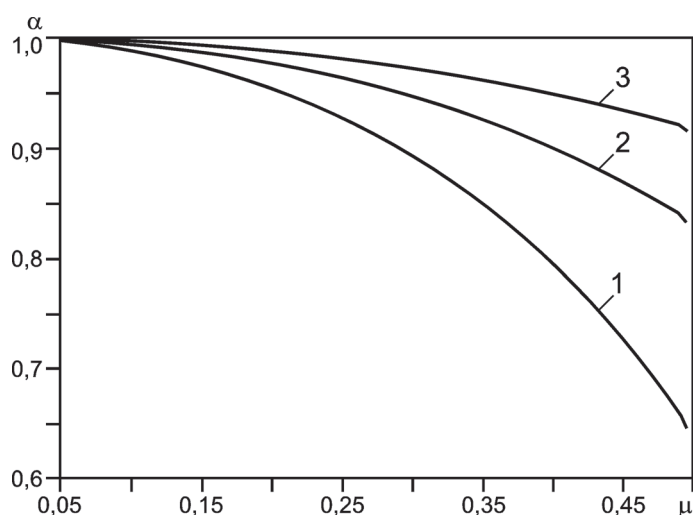


Рис. 3. Зависимость формфактора от коэффициента Пуассона для $H/D = 0,5$ (кривая 1), $H/D = 1,0$ (2), $H/D = 2,0$ (3)

других аналогичных расчетных данных можно предложить следующую интерполяционную формулу

$$\alpha = 1 - [\mu^{2,5}/(H/D)],$$

которая определяет формфактор α с относительной погрешностью менее 4 % для важных на практике диапазонов $\mu > 0,05$, $H/D > 0,3$.

Таким образом, на основе численного решения двумерной задачи о деформировании цилиндрического образца определен формфактор, связывающий измеренный по закону Гука модуль упругости образца произвольных размеров с модулем Юнга. Это позволяет более точно стандартизировать методику измерения модуля упругости материала,

исключив зависимость результатов измерений от размеров образца.

Использование предложенного в данной статье алгоритма позволяет рассчитать формфактор для набора различных конфигураций измеряемого образца. Такая работа, несомненно, должна быть сделана в будущем, например, с образцами в виде полого цилиндра, плоского кольца и т. д. Кроме этого, предложенный в статье подход с таким же успехом может быть использован и для расчета сдвиговых деформаций.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№ 13-01-00270 и 14-01-00052).

Литература

1. ГОСТ 9550—81. Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе.
2. Becker G. W. Uber das dynamisch-elastische verhalten geschaumter stoffe // *Acustica*. 1959. V. 9. N. 3. P. 135—143.
3. Росин Г. С. Измерение динамических свойств акустических материалов. М.: Стройиздат, 1972.
4. Sadd M. H. Elasticity: Theory, applications, and numeric. Elsevier, 2009.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. М.: Наука, 1987.
6. Бойко А. В., Кулик В. М. Об одном методе экспериментального нахождения динамических вязкоупругих свойств цилиндрического образца // *Прикладная математика и механика*. 2013. Т. 77. № 1. С. 138—142.
7. Kulik V. M. e. a. Measurement of dynamic properties of viscoelastic materials // *Experimental Mechanics*. 2009. V. 49. N. 3. P. 417—425.

Дата принятия 26.03.2014 г.

631.128.62

Кондуктометрический способ измерения уровня жидкого натрия

И. Д. ВЕЛЬТ

НИИТеплоприбор, Москва, Россия, e-mail: veltivand@gmail.com

Рассмотрен кондуктометрический способ измерения уровня жидкого натрия без проникновения внутрь резервуара элементов конструкции уровнемера.

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

The conductive method of measurement of liquid sodium level without penetration of level meter elements in the basin is considered.

Key words: liquid metal, sodium, conductometric level meter, basin.

В атомной промышленности актуальна задача измерения уровня жидкого натрия, находящегося в резервуаре, в полость которого не допускается проникновение элементов конструкции уровнемера (зондирование). Это связано с необходимостью обеспечения особо высокой надежности

резервуара. Высокая температура (до 300—525 °С), сложная радиационная обстановка, а также чрезвычайно высокие требования к надежности существенно ограничивают возможности в выборе способа измерения уровня.

В настоящее время для измерения уровня жидкого натрия на АЭС применяют 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 [1, 2]. Конструкции этих приборов сложны и не позволяют решать задачу измерения уровня металлической среды без зондирования.

Автором предложено техническое решение данной задачи для резервуара из нержавеющей стали — кондуктометрический способ, позволяющий сканировать среду с высокой электропроводностью через металлическую стенку резервуара и обнаруживать присутствие или отсутствие этой среды без контакта с ней деталей конструкции уровнемера. Жидкие металлы, в том числе и натрий, являются электропроводными жидкостями, что дает возможность использования данного метода.

Кондуктометрический способ состоит в том, что на внешней поверхности стенки резервуара в предполагаемой зоне изменения уровня жидкого натрия внутри резервуара создается электрическое поле. Электрическое поле образуется током, подводимым к двум электродам, контактирующим с внешней стенкой, причем один из электродов находится в самой верхней части резервуара, куда может подняться уровень жидкого натрия, а другой — в нижней части. С помощью измерительного устройства и двух сканирующих электродов, закрепленных в выбранной локальной области, находят напряженность электрического поля. По значениям напряженности определяют существование на данном участке за стенкой резервуара одной из сред, электропроводность которой соответствует либо жидкому натрию, либо воздуху.

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

Напряженность 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 напряженности 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 получить ток, создающий электрическое поле с постоянными параметрами независимо от изменения сопротивления нагрузки в указанных пределах.

Если резервуар пустой, т. е. в нем нет жидкого натрия, то ток протекает только по его стенке, и в этом случае напряженность 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 напряженность электрического поля на его стенке.

Если резервуар заполнен, то из-за шунтирующего воздействия на него проводящего слоя жидкого натрия, напряженность на внешней стенке резервуара становится существенно ниже по сравнению с тем, когда резервуар пустой. Чем выше электропроводность жидкого металла и толще его слой, контактирующий с внутренней стенкой резервуара, тем значительнее уменьшение напряженности электрического поля на внешней стенке. Электропроводность жидкого натрия составляет приблизительно $0,6 \cdot 10^7$ См/м, что примерно в три раза выше электропроводности нержавеющей стали, а высота слоя, прилегающего к стенке в 5 раз и более превышает толщину стенки.

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

На рис. 1 изображен цилиндрический резервуар 2 высотой, например, 5 м, выполненный из нержавеющей стали, в котором находится жидкий натрий 1 при рабочей температуре 300—525 °С. К внешней стороне резервуара 2 приварены электроды 3 из нержавеющей стали. Два крайних электрода — токовые, а остальные предназначены для сканирования стенки резервуара. Все электроды расположены по вертикальной линии (по образующей цилиндра резервуара) на одинаковом расстоянии друг от друга, например, 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, напряженность которого имеет вертикально направленную компоненту.

Применив известные методы теории подобия и размерностей, можно получить простую приближенную 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

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

где S — площадь контактной поверхности токового электрода.

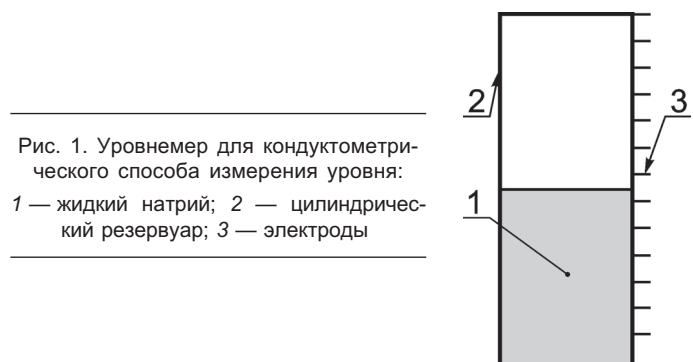


Рис. 1. Уровнемер для кондуктометрического способа измерения уровня:
1 — жидкий натрий; 2 — цилиндрический резервуар; 3 — электроды

Для примера зададим значения параметров резервуара: $\lambda = 5$ м, $\sigma = 0,2 \cdot 10^7$ См/м (для нержавеющей стали), $\delta = 0,015$ м, $S = 25 \cdot 10^{-6}$ м² (вычислено 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. Вычислим по (1) сопротивление между токовыми электродами: $R \approx 33$ мОм. Следовательно, минимальный ток возбуждения, при котором напряжение между токовыми электродами равно 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 натрий создает хороший электрический контакт с нержавеющей сталью при температуре более 300 °С и вследствие высокой электропроводности и большой толщины слоя, выраженной в долях от δ , оказывает значительное шунтирующее действие, которое резко снижает напряженность электрического поля на внешней поверхности резервуара. Когда натрий 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 напряженность электрического поля между электродами при неизменном токе уменьшится тоже втрое.

Применение импульсного электрического поля позволяет отделить информативную компоненту 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.

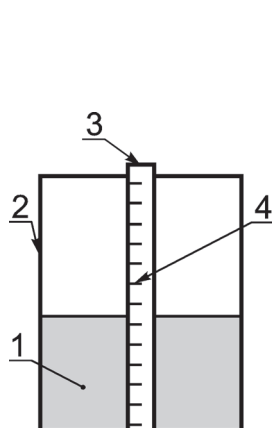


Рис. 2. Схема уровнемера внутри резервуара:

1 — жидкий натрий; 2 — цилиндрический резервуар; 3 — цилиндрический корпус уровнемера; 4 — электроды

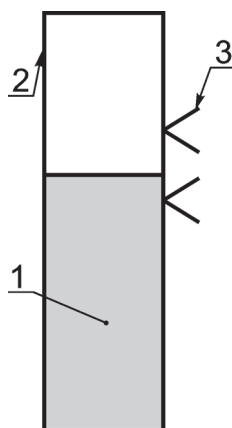


Рис. 3. Способ измерения уровня в узкой зоне:

1 — жидкий натрий; 2 — цилиндрический резервуар; 3 — электроды

Аналогом измерительного устройства уровнемера может служить электронный блок (ЭБ) магнитного расходомера жидкого натрия [3]. В ЭБ имеется 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 определен с помощью нескольких сканирующих электродов, расположенных ниже рассматриваемой пары. Поправку Δy определяют по формуле

$$\Delta y = \gamma [1 - (U - U_{Na}) / (U_B - U_{Na})], \quad (3)$$

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_B — разность потенциалов между смежными электродами, когда на обратной стороне стенки находится воздух на всем расстоянии γ ; U_{Na} — разность потенциалов между смежными электродами, когда на обратной стороне стенки находится натрий на всем расстоянии γ .

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

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

Рис. 3 поясняет способ измерения уровня в узкой зоне. Такой случай обычно возникает, когда требуется подтверждение о достижении уровня заданного значения. На внешней стороне резервуара 2, в котором находится жидкий металл (натрий) 1, размещаются две пары электродов 3, приваренных к наружной стенке резервуара в двух точках, расположенных по вертикали на некотором расстоянии друг от друга. При этом 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 напряженность электрического поля измеряют между двумя сканирующими электродами. Если полученное значение напряженности оказывается выше заданного, это означает, что уровень жидкого натрия находится ниже нижнего электрода. Если измеренная напряженность ниже заданной, то уровень превысил верхний электрод. Положение уровня жидкого металла 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 $(8-12)\delta$. Требования к необходимому значению тока для измерений в узкой зоне такое же, как для уровнемеров, показанных на рис. 1, 2.

Результаты 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.

Л и т е р а т у р а

1. Пат. 2328704 РФ. Индуктивный уровнемер / В. В. Лешков, В. Д. Таранин // Изобретения. Полезные модели. 2008. № 19.

2. Пат. 2252397 РФ. Индуктивный уровнемер / В. В. Лешков, В. Д. Таранин // Изобретения. Полезные модели. 2005. № 14.

3. Вельт И. Д., Михайлова Ю. В. Магнитный расходомер жидких металлов // Измерительная техника. 2013. № 3. С. 24—28; Velt I. D., Mikhailova Yu. V. Magnetic flowmeter of molten metals // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N. 3. P. 283—288.

Дата принятия 04.06.2014 г.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

536.2.083

Выбор размеров образцов при определении теплофизических характеристик материалов методом лазерного импульса

М. Д. КАЦ

Томский политехнический университет, Томск, Россия, e-mail: Katz@tpu.ru

Оценены погрешности определения теплофизических характеристик материалов методом лазерного импульса, зависящие от геометрических размеров образца. Оценка выполнена сравнением истинных значений характеристик материалов и результатов численного решения двухмерной задачи теплопроводности в образцах при воздействии на их поверхность теплового импульса малой временной протяженности в условиях, соответствующих эксперименту.

Ключевые слова: теплофизические характеристики, метод лазерного импульса, численное решение.

An estimation of the accuracy of determination of materials thermophysical characteristics by means of a laser pulse dependent on the sample geometrical sizes is carried out. This estimation is performed by comparison of the true values of characteristics and the results of numerical solution of two-dimensional heat transfer problem in the samples of materials at influence on the surface of a thermal pulse of small time span in conditions corresponding to experiment.

Key words: thermophysical characteristics, laser pulse method, numerical solution.

В настоящее время метод лазерного импульса широко применяют для определения теплофизических характеристик (ТФХ) материалов в умеренном диапазоне температур [1—2]. Серийный выпуск теплофизических установок осуществляют фирмы SINKU-RIKO (Япония) и Netzsch (Германия).

Метод основан на кратковременном воздействии лазерного луча на поверхность образца и приближенном решении одномерной задачи теплопроводности для бесконечной пластины в условиях импульсного нагрева. По полученной термограмме холодной поверхности образца (противоположной нагреваемой) определяют максимальную температуру перегрева T_1 , время τ_2 достижения половины значения T_1 и рассчитывают ТФХ материала по формулам, приведенным в [1].

Установлено, что при определении ТФХ материалов методом импульсного лазерного воздействия возможны мето-

дические погрешности, обусловленные принятыми при постановке задачи допущениями [1, 3—5]. Погрешности вычислений ТФХ материала получают сравнением действительных значений температуропроводности a , удельной теплоемкости c , теплопроводности λ материала со значениями, найденными в результате численного моделирования условий реализации эксперимента по определению ТФХ материалов данным методом. При этом учитывают ряд факторов, не рассматриваемых при постановке задачи. В [3] показано, что толщина образца в значительной мере определяет погрешности ТФХ материала.

Однако модель теплопроводности не в полной мере соответствует реальным условиям воздействия лазерного импульса на поверхность образца, так как поперечные размеры участка, нагреваемого в течение короткого импульса лазерного излучения, всегда конечны. Это связано со структу-