

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШУМОВЫХ ДИОДОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ

А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, Е. В. Новиков, И. Л. Терех

Белорусская государственная академия связи, Минск

USING NOISE DIODES TO MEASURE THE SPECIFIC HEAT CAPACITY OF LIQUIDS

A. O. Zenevich, O. V. Kochergina, E. V. Novikov, I. L. Terekh

Belarusian State Academy of Telecommunications, Minsk

Аннотация. Предложен метод измерения удельной теплоемкости жидкости с использованием шумового диода. Установлено, что точность метода в значительной степени зависит от параметров используемого диода и для повышения точности измерений рекомендуется применять шумовые диоды с широким диапазоном перенапряжений, в котором близка к линейной зависимость частоты следования шумовых импульсов от перенапряжения. Из использованных в ходе исследований диодов рекомендуется применение шумового диода модели ND103L производства Республики Беларусь, что позволяет выполнять измерения удельной теплоемкости жидкости с погрешностью не более 5%. Дополнительным преимуществом использования шумовых диодов в качестве чувствительных элементов при разработке устройств измерения удельной теплоемкости является то, что определение частоты и временных интервалов реализуется на базе унифицированных схемных узлов – счётчиков, что упрощает измерительные устройства.

Ключевые слова: шумовой диод, удельная теплоемкость жидкости, частота следования шумовых импульсов, температура.

Для цитирования: Использование шумовых диодов для измерения удельной теплоемкости жидкостей / А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, Е. В. Новиков, И. Л. Терех // Проблемы физики, математики и техники. – 2026. – № 2 (67). – С. 79–84. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_2_67_79. – EDN: EKLFBFI

Abstract. This paper proposes a method for measuring the specific heat capacity of a liquid using a noise diode. It has been established that the accuracy of the method depends significantly on the parameters of the diode used. To improve measurement accuracy, it is recommended to use noise diodes with a wide overvoltage range, in which the dependence of the noise pulse repetition rate on the overvoltage is close to linear. Of the diodes used in the study, the ND103L noise diode manufactured in the Republic of Belarus is recommended, allowing for liquid specific heat capacity measurements with an error of no more than 5%. An additional advantage of using noise diodes as sensing elements in the development of specific heat capacity measuring devices is that the frequency and time interval determination are implemented using standardized circuit units – counters – which simplifies the measuring devices.

Keywords: noise diode, liquid specific heat capacity, noise pulse repetition rate, temperature.

For citation: Using noise diodes to measure the specific heat capacity of liquids / A. O. Zenevich, O. V. Kochergina, E. V. Novikov, I. L. Terekh // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2026. – № 2 (67). – P. 79–84. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_2_67_79 (in Russian). – EDN: EKLFBFI

Введение

Знание величины удельной теплоёмкости имеет ключевое значение в пищевой промышленности при проектировании технологического оборудования, расчёте тепловой нагрузки и оптимизации энергозатрат, контроле качества и безопасности продукции. В полной мере это относится к таким процессам как пастеризация, стерилизация, сушка и охлаждение, поскольку этот параметр напрямую определяет количество тепловой энергии, необходимой для изменения температуры продукта.

При пастеризации и стерилизации удельная теплоёмкость позволяет точно рассчитать тепловую нагрузку и режимы нагрева, обеспечивая достижение требуемых температур за заданное

время. Это критически важно для гарантированного уничтожения патогенных микроорганизмов и ферментов при одновременном сохранении пищевой и органолептической ценности продукта. Неверный расчёт теплоёмкости может привести к недостаточной термической обработке или к перегреву и ухудшению качества продукции.

В процессах охлаждения знание удельной теплоёмкости необходимо для расчёта скорости отвода тепла и подбора эффективных теплообменных аппаратов, что позволяет прогнозировать время охлаждения продукта до безопасных температур хранения, предотвращая развитие микрофлоры и продлевая срок годности.

Учет удельной теплоёмкости жидкостей при оптимизации энергопотребления технологических

линий и выборе режимов работы оборудования обеспечивает стабильность и воспроизводимость технологических процессов.

Таким образом, данный параметр является одной из базовых теплофизических характеристик, обеспечивающих безопасность, качество и энергоэффективность пищевого производства.

Наиболее распространенным методом измерения удельной теплоемкости жидкости C_y в настоящее время является калориметрический метод [1]–[5]. Этот метод основан на измерении количества теплоты ΔQ , необходимого для изменения температуры жидкости массы m на заданную величину ΔT . На основании измеренного значения ΔQ теплоемкость рассчитывают по формуле: $C = \Delta Q / \Delta T$. Удельная теплоемкость жидкости C_y определяется следующим образом:

$$C_y = \frac{C}{m} = \frac{\Delta Q}{m \Delta T}.$$

Для реализации калориметрического метода наиболее часто используется электрический подход. Это связано с простотой его реализации по сравнению с другими подходами и высокой повторяемостью результатов [1]–[5].

Электрический подход предполагает выполнение следующей последовательности операций. К жидкости массой m , удельную теплоемкость которой необходимо измерить, подводится количество теплоты Q при помощи электрического нагревателя. Подведенное количество теплоты вычисляют по закону Джоуля – Ленца: $Q = IU \Delta t$, где I – электрический ток, протекающий через электрический нагреватель, U – напряжение, приложенное к нагревателю, Δt – интервал времени нагрева жидкости [5]. Измеряют изменение температуры ΔT , после чего рассчитывают удельную теплоемкость C_y в соответствии с выражением:

$$C_y = \frac{IU \Delta t}{m \Delta T}.$$

Для измерения температуры как одного из необходимых параметров определения теплоемкости, перспективным является использование шумовых диодов. Последние имеют линейные зависимости от температуры таких параметров как напряжение пробоя и частота шумовых импульсов при постоянном значении напряжения обратного смещения диода. Это подтверждается результатами исследований, приведенными в работах [5]–[8], в которых показана возможность измерения температуры при помощи шумовых диодов. Указанные свойства позволяют рассматривать шумовые диоды в качестве чувствительного элемента при разработке устройств измерения удельной теплоемкости жидкостей. Дополнительным преимуществом при этом является

то обстоятельство, что определение частоты и временных интервалов выполняется унифицированными схемными узлами – счетчиками, что упрощает реализацию измерительных устройств.

Однако, в настоящее время отсутствуют исследования возможности использования шумовых диодов в устройствах для измерения удельной теплоемкости жидкостей. Оценка такой возможности и стала целью данной статьи.

1 Метод измерения удельной теплоемкости жидкости с помощью шумового диода

Измерение удельной теплоемкости жидкости с использованием шумового диода основано на двух следующих физических принципах. В соответствии с первым количество теплоты Q , передаваемое жидкости электрическим нагревателем, определяется законом Джоуля – Ленца [5]. Вторым заключается в наличии линейной зависимости напряжения пробоя p - n -перехода шумового диода U_{np} от температуры T [6], [7], причем увеличение температуры приводит к увеличению величины U_{np} [6], [7].

Сущность предлагаемого метода заключается в том, что при постоянном значении напряжения обратного смещения шумового диода $U_{см}$, превышающем напряжение пробоя U_{np} для некоторой начальной температуры T_1 , в этом диоде формируются шумовые электрические импульсы с частотой следования n_1 . Температура T_1 равна температуре жидкости заданной массы m , с которой соприкасается шумовой диод. Нагревание жидкости заданной массы приводит к росту температуры шумового диода выше температуры T_1 . При этом увеличивается напряжение пробоя U_{np} , величина которого начинает приближаться к напряжению обратного смещения шумового диода $U_{см}$. В результате понижается частота следования шумовых импульсов диода [6], [8]. При некоторой температуре жидкости $T_2 > T_1$ частота следования шумовых импульсов становится равной $n_2 < n_1$. Интервал времени Δt , за который происходит изменение частоты следования шумовых импульсов от n_1 до n_2 , будет зависеть от удельной теплоемкости жидкости C_y .

Таким образом, измерение удельной теплоемкости жидкости с помощью шумового диода включает следующую последовательность операций. Приводят шумовой диод в контакт с жидкостью заданной массы m , имеющей фиксированную температуру T_1 . Подают на шумовой диод напряжение обратного смещения $U_{см}$, которое превышает напряжение его пробоя U_{np} при температуре T_1 . При таких $U_{см}$ и температуре T_1 измеряют частоту следования шумовых импульсов шумового диода n_1 . Затем нагревают жидкость при помощи электрического нагревателя, прилагая к нему напряжение U и измеряя элек-

трический ток I , протекающий через него. Измеряют временной интервал Δt , за который достигается температура T_2 , как длительность интервала времени, за который частота следования шумовых импульсов изменяется от n_1 до n_2 . По полученным данным вычисляют удельную теплоемкость по формуле:

$$C_y = \alpha \Delta t,$$

где $\alpha = \frac{UI}{m(T_2 - T_1)}$.

Таким образом, величина удельной теплоемкости однозначно определяется длительностью интервала Δt .

При выполнении дальнейших исследований основное внимание будет уделено оценке влияния параметров шумовых диодов на возможности реализации предлагаемого метода измерений удельной теплоемкости жидкостей.

Для проведения исследований была разработана экспериментальная установка, структурная схема которой показана на рисунке 1.1.

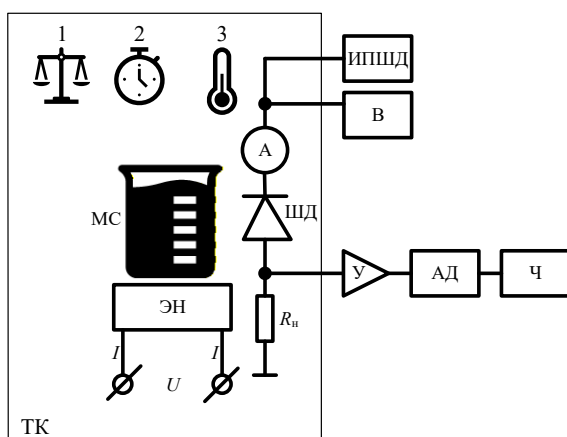


Рисунок 1.1 – Структурная схема экспериментальной установки:

- ЭН – электрический нагреватель;
- МС – металлический сосуд;
- ИПШД – источник питания шумового диода;
- В – вольтметр;
- А – амперметр;
- R_n – сопротивление нагрузки;
- ШД – шумовой диод;
- У – усилитель;
- АД – амплитудный дискриминатор;
- Ч – частотомер;
- U – напряжение питания ЭН;
- I – ток ЭН;
- ТК – теплоизолирующий кожух;
- 1 – весы; 2 – секундомер; 3 – термометр

Установка работает следующим образом. К электрическому нагревателю (ЭН) приложено напряжение U , в результате чего через него протекает электрический ток I и температура нагре-

вателя увеличивается. На электрический нагреватель (ЭН) помещается металлический сосуд с жидкостью (МС) массой m . В контакте с корпусом металлического сосуда находится шумовой диод (ШД). Электрический нагреватель (ЭН), металлический сосуд с жидкостью и шумовой диод (ШД) располагаются в теплоизолирующем кожухе (ТК). Это необходимо для того, чтобы все количество теплоты, поступающее от электрического нагревателя (ЭН), расходовалось на нагрев металлического сосуда с жидкостью (МС) массой m . В установке использовался тонкостенный металлический сосуд массой 1,5 г, удельная теплоемкость материала которого значительно меньше удельной теплоемкости образцов жидкостей, и, следовательно, данной величиной можно пренебречь. Расчеты в представленной работе выполнены только с учетом массы жидкости.

При нагревании металлического сосуда с жидкостью повышается температура шумового диода, что приводит к изменению частоты следования его шумовых импульсов. Отметим, что перед применением шумового диода в установке регистрировалась зависимость частоты следования его шумовых импульсов от температуры в диапазоне 273–323 К при постоянном значении напряжения обратного смещения шумового диода, соответствующем напряжению пробоя шумового диода при 323 К. Нижняя граница диапазона соответствовала температуре замерзания воды, а верхняя – максимально возможной температуре в широтах умеренного пояса. Указанный температурный диапазон достаточен для проведения измерений теплоемкости в стандартных лабораторных условиях.

Отметим, что схема включения шумового диода была такой же, как и в работе [8], посвященной определению температуры при помощи шумового диода. На шумовой диод подавалось постоянное значение напряжения обратного смещения, превышающее напряжение пробоя его p - n -перехода.

Импульсы с выхода шумового диода после усиления усилителем (У) поступают на вход амплитудного дискриминатора (АД). Порог амплитудной селекции последнего выбирался несколько превышающим уровень шумов усилителя, что позволило отделить шумовые импульсы диода от шумов усилителя. Амплитудный дискриминатор (АД) также стандартизовал импульсы по амплитуде и длительности перед подачей на вход частотомера (Ч), измерявшего частоту этих импульсов. Для измерения частоты использовался частотомер ЧЗ-85/4. Период времени от начала нагревания шумового диода до момента, когда частота следования импульсов уменьшалась практически до нулевого значения, фиксировался с помощью секундомера TIR Z-200. Температура измерялась термометром промышленным высо-

котемпературным ТМ-902С. Масса была постоянной для всех образцов жидкостей, контролировалась лабораторными весами ADAM модели HCB 1002 и составляла 100 г.

2 Результаты исследований и их обсуждение

В качестве объекта исследований выступили шумовые диоды производства Республики Беларусь следующих марок: ND102L, ND103L и ND104L. Данные шумовые диоды были выбраны, поскольку в работе [13] показана возможность их использования для контроля и измерения температуры. Все исследуемые модели имеют разные значения напряжения пробоя [3]–[5], поэтому для их сравнения используется величина перенапряжения $\Delta U = U_{np} - U_{см}$.

Проведенные исследования [6]–[8] показывают, что зависимость напряжения пробоя от температуры T линейна в диапазоне температуры от 273 до 323 К для всех исследуемых шумовых диодов. Эту зависимость можно записать следующим образом: $U_{np} = U_0 + \beta T$, где U_0 – напряжение пробоя p - n -перехода шумового диода при температуре 273 К, β – коэффициент линейности.

В таблице 2.1 представлены значения характеристик шумовых диодов, важных для рассматриваемого их применения. Наибольшее значение величины β имеют шумовые диоды марки ND103L, а наименьшее – ND102L. Отметим, что наибольшее значение напряжения пробоя в исследуемом диапазоне температур наблюдалось для шумовых диодов марки ND102L, а наименьшее – ND104L. Значения напряжений пробоя шумовых диодов для температуры 273 К представлены в таблице 2.1. При достижении температуры 323 К напряжение пробоя увеличивается на величину ΔU_1 . Значения ΔU_1 для каждого из исследуемых шумовых диодов, значения частоты следования шумовых импульсов n_1 при температуре $T = 273$ К и напряжении обратного смещения $U_{см} = U_0 + \Delta U_1$ также представлены в таблице 2.1.

На рисунке 2.1 показана зависимость частоты следования шумовых импульсов от величины перенапряжения ΔU для исследуемых марок шумовых диодов при температуре 273 К. Диапазон перенапряжений, для которого определены зависимости, определялся диапазоном напряжений питания, в котором частота следования шумовых импульсов монотонно увеличивается. Оценки

указанного диапазона перенапряжений ΔU_1 представлены в таблице 2.1. При $\Delta U > \Delta U_1$ наблюдается насыщение зависимости $n(\Delta U)$, а далее ее спад [8].

Отметим, что при $\Delta U < -0,1$ В частота следования шумовых импульсов близка к нулю.

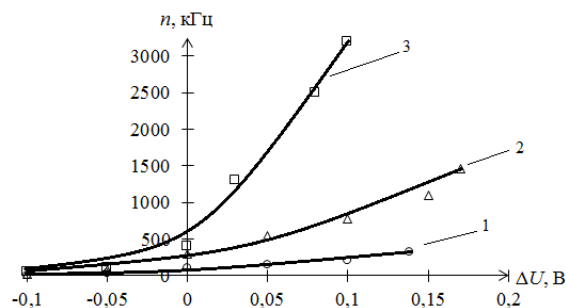


Рисунок 2.1 – Зависимость частоты следования шумовых импульсов от величины перенапряжения при температуре 273 К:

1 – для ND102L; 2 – для ND103L; 3 – для ND104L

На рисунке 2.2 показаны зависимости частоты следования шумовых импульсов n от температуры при постоянном напряжении обратного смещения $U_{см} = U_0 + \Delta U_1$.

Так, значения $U_{см}$ составляли 9,38 В, 8,92 В и 7,91 В соответственно для ND102L, ND103L и ND104L. Зависимость $n(\Delta U)$ имеет линейный характер в диапазоне перенапряжений $\Delta U > 0$. Как следует из полученных зависимостей, увеличение температуры приводит к уменьшению частоты следования шумовых импульсов для всех исследуемых шумовых диодов. Это связано с тем, что частота следования шумовых импульсов зависит от превышения напряжением обратного смещения $U_{см}$ напряжения пробоя U_{np} , а с увеличением температуры такое превышение уменьшается. При температуре 323 К и напряжении смещения $U_{см}$, соответствующим напряжению пробоя шумового диода при 323 К, частота следования шумовых импульсов снижается практически до нуля для всех исследуемых моделей шумовых диодов.

Таким образом, если $U_{см} = \text{const}$, то по частоте следования шумовых импульсов можно определить температуру. Представленные на рисунке 2.2 зависимости свидетельствуют о том, что их можно использовать в процессах измерения удельной теплоемкости материалов.

Таблица 2.1 – Характеристика линейности шумовых диодов

Шумовой диод	Коэффициент линейной зависимости k , мВ / К	Напряжение пробоя U_0 , В	Частота следования шумовых импульсов n_1 , Гц	Величина ΔU_1 , В
ND102L	0,403	9,15	250	0,13
ND103L	0,526	8,65	600	0,17
ND104L	0,310	7,66	2000	0,10

Таблица 2.2 – Удельная теплоемкость образцов жидкости

Образец жидкости	Температура нагрева, К		Интервал времени нагрева жидкости Δt , с	Масса жидкости m , г	Удельная теплоемкость, Дж / (кг·К)	
	Начальная	Конечная			Измеренная (среднее значение)	Справочное значение
Вода	273	323	206	100	4120	4200
Молоко (жирность 2,6%)			195		3900	3800
Кефир (жирность 3,2%)			188		3760	3700
Сироп сахарный (концентрация 20%)			177		3540	3600
Солевой раствор (концентрация 20%)			168		3360	3400

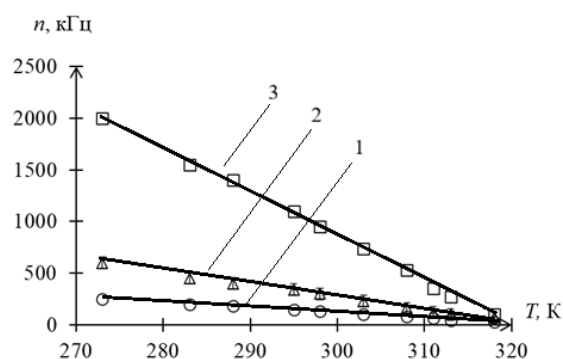


Рисунок 2.2 – Зависимость частоты следования шумовых импульсов от температуры при постоянном напряжении смещения:
1 – для ND102L; 2 – для ND103L; 3 – для ND104L

Для проверки работоспособности предлагаемого метода измерения удельной теплоемкости жидкости были выполнены экспериментальные измерения с использованием всех исследуемых марок шумовых диодов и соответствующие расчеты удельной теплоемкости.

Эксперименты проводились с пятью видами жидкостей, используемых при производстве пищевых продуктов для консервирования и стерилизации или подвергающихся пастеризации. Каждая серия измерений проводилась пятикратно, что позволило оценить погрешность метода и повысить достоверность полученных результатов.

На основании результатов измерений для базового образца жидкости (вода, справочное значение C_y составляет 4200 Дж / (кг·К)) оценка величины $C_y = 4120; 3930$ и 4600 Дж / (кг·К) при использовании диодов моделей ND103L, ND102L и ND104L соответственно. Отклонение полученного результата от справочного значения составило 2, 6 и 10% для моделей ND103L, ND102L и ND104L соответственно. Наиболее близкий по значению результат получен для

модели ND103L, имеющей наибольшее значение коэффициента β . Следует отметить, что для повышения точности измерений рекомендуется применять шумовые диоды с широким диапазоном перенапряжений, в котором зависимость $n(\Delta U)$ близка к линейной.

В таблице 2.2 представлены результаты измерений удельной теплоемкости различных образцов жидкостей, выполненных рассматриваемым методом при помощи шумового диода ND103L, поскольку он обеспечивал наибольшую точность по сравнению с исследуемыми шумовыми диодами.

Для каждого образца выполнялась серия из 100 измерений. Полученные значения удельной теплоемкости сравнивались со справочными значениями [9]. Как следует из данных, представленных в таблице 2.2, отличие значений, полученных экспериментально, от указанных в справочнике, не превышало 5%.

Заключение

Экспериментально подтверждена возможность использования шумовых диодов в устройствах для измерения удельной теплоемкости жидкостей, реализующих электрический подход.

Предложен метод измерения удельной теплоемкости жидкости с помощью шумового диода. Установлено, что точность метода в значительной степени зависит от параметров используемого диода и для повышения точности измерений рекомендуется применять шумовые диоды с широким диапазоном перенапряжений, в котором зависимость $n(\Delta U)$ близка к линейной. Из использованных в ходе исследований диодов рекомендуется применение шумового диода модели ND103L, что позволяет выполнять измерения удельной теплоемкости жидкости с погрешностью не более 5%.

Дополнительным преимуществом использования шумовых диодов в качестве чувствительных элементов при разработке устройств

измерения удельной теплоёмкости является то обстоятельство, что определение частоты и временных интервалов реализуется на базе унифицированных схемных узлов – счётчиков, что упрощает измерительные устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прокопенко, И. А. Технология обработки, хранения и производства продуктов питания из сырья животного / И. А. Прокопенко. – Севастополь : СевГУ, 2023 – 215 с.

2. Záborský, M. Heat Capacities and Entropies of Organic Compounds in the Condensed Phase. Volume III / M. Záborský, V. Růžička, E. S. Domalski // Journal of Physical and Chemical Reference Data. – 1996. – Vol. 25, № 1. – DOI: <https://doi.org/10.1063/1.555985>.

3. Trachenko, K. Heat capacity of liquids: An approach from the solid phase / K. Trachenko // Physical review. – 2008. – Vol. 78, № 10. – P. 104201 (1–7).

4. Dashora, P. A theoretical study of heat capacity of inert liquids / P. Dashora, U. Parnami, P. Karnawat // Indian Journal of Pure & Applied Physics. – June 2003. – Vol. 4, № 1. – P. 438–442.

5. Фицак, В. В. Физика. Определение теплоёмкости твердых тел. Методические указания к лабораторной работе / В. В. Фицак / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – С-Пб, 2015. – 19 с.

6. *On the Temperature Characteristics of Noise Diodes* / A. O. Zenevich, O. V. Kochergina, V. V. Buslyuk [et al.] // Semiconductors. – 2024. – Vol. 58, № 13. – P. 80–83.

7. Зеневич, А. О. Шумовой диод как основа для создания сигнализатора температуры / А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // Прикладная физика. – 2024. – № 5. – С. 73–79.

8. Zenevich, A. O. Noise Diode as a Basis for Creation of Temperature Alarm / A. O. Zenevich, O. V. Kochergina // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2025. – Vol. 70, № 2. – P. 57–60.

9. Справочник по теплофизическим свойствам газ и жидкости / Н. Б. Варгафтик. – М., 1972. – 720 с.

Поступила в редакцию 03.03.2026.

Информация об авторах

Зеневич Андрей Олегович – д.т.н., профессор

Кочергина Ольга Викторовна – к.т.н.

Новиков Евгений Владимирович – к.т.н., доцент

Терех Ирина Леонидовна – аспирант