

ТЕРМОРЕЗИСТИВНЫЙ ДАТЧИК УРОВНЯ ДЛЯ КРИОГЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА

М.А. Колосов, В.Ю. Емельянов, Е.С. Навасардян

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: kolosov@power.bmstu.ru; 72072@mail.ru; navasard@mail.ru

Применение криогенного и обычного емкостного оборудования требует непрерывного контроля уровня жидкости, который можно выполнять, используя например терморезистивные датчики. Такие датчики имеют хорошую чувствительность, они надежны и компактны, в них отсутствуют подвижные механические части, они работают на постоянном токе и у них нет реактивного сопротивления, что определяет их высокую эксплуатационную эффективность. Приведены результаты исследования терморезистивных датчиков на основе высокотемпературных сверхпроводников в качестве чувствительного элемента прибора для измерения уровня криогенных жидкостей. Основа такого чувствительного элемента – длинномерный композитный проводник с бериллиевой фазой и серебряной матрицей. Такие проводники имеют высокую стабильность, малую тепловую инерцию и хорошую воспроизводимость показаний. Для получения вольт-линейных характеристик опытных образцов таких датчиков было проведено их аналитическое исследование на физико-математической модели и экспериментальное исследование. Для проведения экспериментальных исследований и снятия вольт-линейных характеристик терморезистивных датчиков уровня был создан экспериментальный стенд. Результаты экспериментальных исследований сравнивались с результатами моделирования, что позволило выявить основные факторы, влияющие на свойства таких датчиков. Полученные вольт-линейные характеристики использовались в качестве тарировочных кривых при создании прототипа прибора для измерения уровня жидкого азота. Сравнение расчетных и экспериментальных данных для опытных датчиков на основе высокотемпературных сверхпроводников позволило определить точность расчетной модели, которая для опытных образцов не превышала 13,5% во всем диапазоне измерений.

Ключевые слова: терморезистивный датчик уровня, вольт-линейная характеристика, высокотемпературный сверхпроводник, уровень жидкости в криогенной емкости.

THERMORESISTIVE LEVEL SENSOR FOR CRYOGENIC LIQUIDS ON THE BASIS OF HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR

M.A. Kolosov, V.Yu. Emelianov, E.S. Navasardyan

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: kolosov@power.bmstu.ru; 72072@mail.ru; navasard@mail.ru

The employment of cryogenic and common capacitive equipment requires a continuous control of liquid line which can be performed, for example, with the help of thermoresistive sensors. These sensors are very sensitive, very reliable and compact, there are no mobile mechanical parts inside, they work at a direct current and they have no jet resistance that defines their high operational efficiency. The article provides the research results of thermoresistive sensors based on high-temperature

superconductors as a sensitive element of the device for measurement the level of cryogenic liquids. The basis of such sensitive element is the lengthy composite conductor with a beryllium phase and a silver matrix. Such conductors are highly stable, of small thermal inertia and they have a good reproducibility of readings. In the case of obtaining volt-linear characteristics of prototypes of such sensors it was necessary to carry out an analytical research on a physical and mathematical model and a pilot study. A test bench was created in order to carry out the pilot studies and to remove volt-linear characteristics of level thermoresistive sensors. Pilot studies results were compared with modeling results thus allowing to reveal major factors that influence sensors properties based on high-temperature superconductors. The received volt-linear characteristics were used as the calibration curves during the creation of a device prototype for level measurement of liquid nitrogen. Comparison of settlement and experimental data for skilled sensors based on high-temperature superconductors allowed to determine the accuracy of settlement model which, for example an experiment sensor, didn't exceed 13.5% in all the range of measurements.

Keywords: thermo-resistive level sensor, volt-linear characteristic, high-temperature superconductor, level of liquid in cryogenic vessel.

Стационарное и транспортное емкостное оборудование широко используется в различных отраслях промышленности и требует соблюдения строгих мер безопасной работы оборудования и обслуживающего персонала. Поэтому, например в холодильной технике, предельный уровень заполнения емкостного оборудования (сосудов) ограничивается законодательно, в среднем это 80% их номинального объема [1]. Анализ тяжелых аварий (взрыв транспортных сосудов, баллонов со сжиженными газами и т.д.) показывает, что основной причиной их являлось переполнение сверх нормы, которое происходит при отсутствии контроля заполнения или при выходе из строя датчиков уровня. Почти на всех производствах контроль уровня жидкости в емкостях является одной из основных функций систем регулирования, которая прямо влияет на эффективность и безопасность технологических процессов. С совершенствованием технологических процессов и развитием средств автоматического контроля расширяется сфера применения датчиков уровня, количество которых составляет по отраслям в среднем от 8 до 14% среди всех применяемых датчиков.

Контроль уровня жидкости в сосудах прямо связан с повышением эффективности их эксплуатации. Увеличение единичного объема сосудов и увеличение оборачиваемости повышает экономическую эффективность их применения. А для крупнотоннажных сосудов возрастают требования к точности контроля уровня, например, в сосуде диаметром 14 м для хранения криогенных жидкостей даже при непосредственном измерении уровня эта погрешность составляет ± 1 т, а при измерении уровня гидростатическим методом погрешность уже может составлять до ± 5 т [2].

Для повышения безопасности и эффективности эксплуатации сосудов следует совершенствовать управление процессами наполнения, хранения и опорожнения сосудов, т.е. теми процессами, где важно иметь достоверную информацию о наличии и расходе среды.

Среди регулируемых параметров ректификационных колонн блоков разделения воздуха примерно треть — это контроль уровней в различных элементах. Например, регулирование уровня кубовой жидкости в верхней и нижней колоннах во многом определяет качество производственных потоков [2]. Наиболее простым способом получения информации о степени заполнения сосуда является измерение в нем уровня жидкости.

При использовании криогенных емкостей (сосудов Дьюара) вопросы безопасной эксплуатации и эффективности осложняются специфическими свойствами криогенных жидкостей. Аварии с криогенными емкостями сопровождаются, как правило, тяжелыми последствиями и для их исключения требуется широкий спектр надежных датчиков уровня с повышенной точностью, способных работать в условиях низких температур. Отечественным приборостроением выпускается более 200 типов датчиков, которые обеспечивают измерение, сигнализацию и регулирование уровня жидких сред при давлениях до 50 МПа и при температурах от $-270,0$ до $+650,0^{\circ}\text{C}$. Но для криогенных жидкостей, несмотря на значительную потребность и большое число оригинальных отечественных изобретений в этой области, сегодня в РФ нет серийного производства большинства типов датчиков.

Принцип работы современных датчиков уровня базируется на различных физических эффектах и по этому признаку датчики уровня делятся на механические (поплавковые); гидростатические; кондуктометрические; акустические и волновые; радиационные; емкостные; терморезистивные и термоэлектрические [3]. Рассматриваемые в настоящей статье контактные датчики уровня для криогенных жидкостей на основе длинномерных (непрерывных) высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП-датчики) относятся к классу терморезистивных. Датчики уровня терморезистивного типа имеют высокую надежность и компактность, хорошие термометрические свойства, в них отсутствуют подвижные механические части, они работают на постоянном токе и у них нет реактивного сопротивления. Надежность и относительная простота таких датчиков сочетается с хорошей чувствительностью и эксплуатационной эффективностью.

В основе работы терморезистивного датчика лежит зависимость электрического сопротивления специального резистора (первичного чувствительного элемента или датчика) от температуры, т.е. от характера его контакта со средой. На границе раздела жидкость–газ происходит существенное изменение коэффициента теплоотдачи с поверхности нагретого чувствительного элемента, что вызывает изменение его температурного поля и, как следствие, погонного электрического сопротивления. Масштаб различия коэффициентов теплоотдачи

к газовой и жидкой фазам обуславливает чувствительность таких датчиков. По значению суммарного сопротивления чувствительного элемента можно судить о текущем значении уровня жидкости.

По исполнению датчики бывают дискретные и непрерывные. Дискретные датчики располагаются в точке контроля раздела фаз и дают локальную информацию о фазовом состоянии контролируемой среды. Чаще всего в качестве дискретных датчиков используются термисторы или угольные резисторы, лучшие из которых имеют точность до $\pm 0,5$ мм [4].

Для непрерывной информации об уровне жидкости используются непрерывные (распределенные) датчики, схема показана на рис. 1. Распределенный терморезистивный датчик уровня представляет собой длинный резистор, вертикально размещенный в сосуде. Резистор имеет высоту H и нагревается током постоянной величины I . Нижний участок проводника на высоте h охлаждается жидкостью и имеет температуру t_2 , а верхний участок охлаждается парами и имеет более высокую температуру t_1 . Пропорционально температуре меняется удельное сопротивление проводника и поэтому его интегральное сопротивление и падение напряжение U_h изменяются пропорционально уровню жидкости в сосуде.

Для работы такого датчика необходим вспомогательный источник теплоты, создающий положительную разность температур между резистором и средой. В качестве вспомогательного источника теплоты чаще всего используется электрический нагрев, который может быть прямым и косвенным. При прямом подогреве роль подогревателя выполняет сам чувствительный элемент и подогрев осуществляется за счет теплоты, выделяемой в резисторе при прохождении через него электрического тока. При косвенном подогреве датчик снабжается дополнительным распределенным нагревательным элементом. В криогенных емкостях при низких температурах вспомогательным источником теплоты малой мощности могут служить теплопритоки из окружающей среды.

Вопросы теории и расчета конструкций непрерывных датчиков терморезистивного типа изложены в работе [3]. Основной характеристикой терморезистивного датчика является его вольт-линейная характеристика ($U = f(h)$), т.е. зависимость суммарного сопротивления первичного измерительного элемента от уровня заполнения сосуда. Эта характеристика используется в качестве тарифовочной кривой

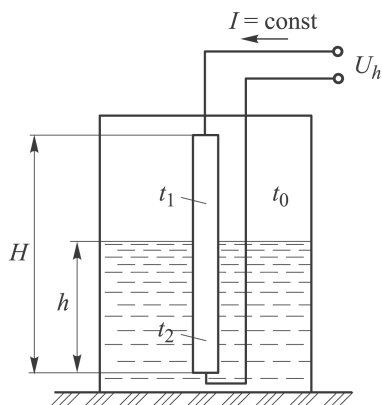


Рис. 1. Схема распределенного терморезистивного датчика уровня жидкости

вторичного прибора и во многом определяет точность и метрологические качества всего прибора — измерителя уровня. Характеристику $U = f(h)$ для конкретного датчика можно получить аналитически или в натурном эксперименте. Для расчета $U = f(h)$ следует знать температурное поле датчика в зависимости от уровня заполнения сосуда при известном распределении вспомогательных источников теплоты. Зная температурную зависимость сопротивления резистора можно рассчитать интегральное падение напряжения.

Несмотря на очевидные достоинства терморезистивных датчиков и их простоту, сегодня практически отсутствует нормативная методика разработки конструкций, проектирования, градуировки и поверки таких датчиков, а выбор их конструктивных параметров часто опирается на опыт применения и интуицию конструктора, что является источником случайных ошибок и сдерживает их применение в новых областях техники.

Прогресс в производстве высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) открыл возможности применения этих материалов в качестве “идеальных” резисторов. Поэтому в настоящей работе исследовались распределенные датчики для контроля уровня жидкого азота, созданные на основе тонких ВТСП 1-го и 2-го поколений, как выпускаемые серийно, так и выполненные индивидуально. Принцип работы таких датчиков подобен принципу работы традиционных терморезистивных датчиков, но для их нагрева использовались относительно небольшие теплопритоки из окружающей среды, для чего первичные датчики имели тепловой контакт с окружающей средой. Эксперименты проводились на жидком азоте при атмосферном давлении, но такие датчики могут найти применение при хранении широкого класса криогенных жидкостей при температурах от 70 до 120 К.

В качестве чувствительного элемента предложенного терморезистивного ВТСП-уровнемера использовался длинномерный композитный проводник с ВТСП-фазой, который подсоединяется ко вторичному прибору, служащему для отображения или регистрации уровня жидкости. На фотографии (рис. 2) представлены сечения



Рис. 2. Конструкция композитных высокотемпературных сверхпроводников

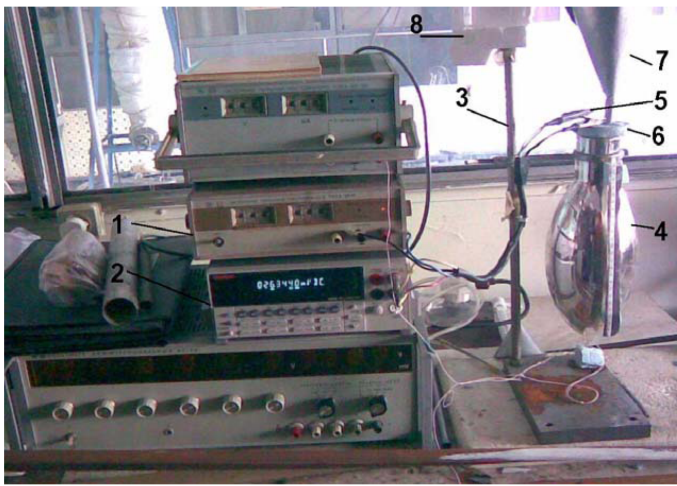


Рис. 3. Фото стенда для испытания ВТСП-датчиков:

1 – источник постоянного тока; 2 – цифровой милливольтметр; 3 – штатив; 4 – сосуд Дьюара; 5 – соединительные провода; 6 – ВТСП-датчик, закрепленный в пробке сосуда; 7 – заливная горловина; 8 – термометр

сверхпроводящих композитных проводников [5]. Основой тела проводника (матрицы) служит, в основном, электротехническое серебро, в которое внедрены тонкие нити сверхпроводника (ВТСП-фазы): керамики типа $\text{Bi}_1\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$, с критической температурой $T_c = 82\text{ K}$ (тип Bi2212), или типа $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ с $T_c = 108\text{ K}$ (тип Bi2223). Выбор конкретного типа материала ВТСП выполняется в зависимости от температуры кипения контролируемой жидкости при рабочем давлении. Как показали исследования, такие проводники обладают высокой стабильностью, малой тепловой инерцией и хорошей воспроизводимостью показаний.

Вольт-линейные характеристики $U = f(h)$ опытных образцов, основные характеристики которых приведены в таблице, рассчитывались и снимались в экспериментах. Полученные характеристики $U = f(h)$ использовались в качестве тарировочных кривых при создании прототипа уровнемера жидкого азота.

Экспериментальный стенд для снятия вольт-линейных характеристик терморезистивных датчиков уровня (рис. 3) имеет схему, приведенную на рис. 4.

Основой стенда (см. рис. 4) является стеклянный сосуд Дьюара 1, на теплоизолирующей крышке которого жестко закреплялся образец ВТСП-датчика и погружался на разную глубину в жидкий криоагент. Положение уровня жидкости в сосуде контролировалось непосредственно по измерительной линейке 2. Экспериментальный стенд включал в себя штатив 3, а также необходимую для получения вольт-линейных характеристик аппаратуру: источник стабилизированного постоянного тока (4) и цифровой милливольтметр 5. На выноске А

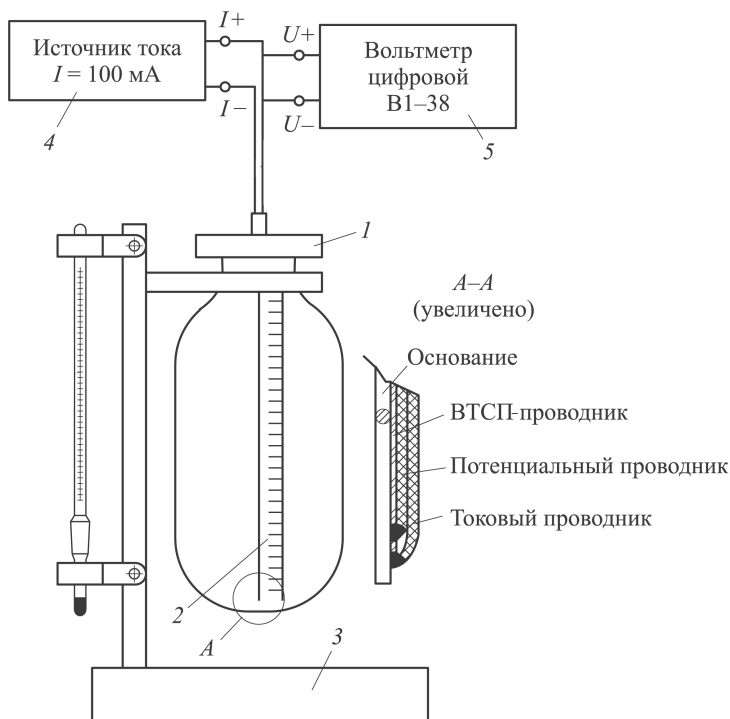


Рис. 4. Конструкция экспериментального стенда для испытания терморезистивных ВТСП-датчиков

(см. рис. 4) показан один из методов закрепления линейного терморезистивного датчика на нижнем конце экспериментального датчика уровня.

Экспериментальные исследования проводились с семью образцами ВТСП-датчика уровня на жидком азоте, которые имели термический контакт с окружающей средой. Датчики были изготовлены из высокотемпературных сверхпроводников 1-го поколения и имели разную конструкцию: линейную, витую или U-образную; заключенные в защитный керамический канал или свободные от внешней электро- и теплоизоляции (см. таблицу).

В первой серии экспериментов использовались линейные проводники традиционной конструкции (образцы № 5–7), у которых токовые и потенциальные контакты размещались в верхней и нижней областях сосуда, как это показано на выноске (см. рис. 4). Такая конструкция датчика приводила к появлению переменной термо-ЭДС и в дальнейшем от этой конструкции отказались.

Во второй серии экспериментов использовались датчики U-образной конструкции (образцы № 1–4), все электрические контакты которых были вынесены из сосуда и располагались в теплой температурной области, что исключало возникновение термо-ЭДС.

Физико-математическая модель датчика включала в себя уравнение нестационарной теплопроводности для проводника с учетом внут-

Параметры исследуемых ВТСП-датчиков

Номер образца	Кз	Конфигурация ВТСП-датчика	Число жил	Размер, мм	Тип ВТСП/Металл оболочки
1	0,7	круглый, U-образный	1	∅ 0,4	Bi-2223/Ag
2	0,4	круглый, U-образный	61		Bi-2223/Ag
3	0,4	круглый, U-образный	61		Bi-2223/Ag-Sn
4	0,6	круглый, U-образный	1		Bi-2223/Ag-Sn
5	0,3	круглый, линейный	19		Bi-2212/Ag
6	0,3	ленточный	61	0,25×3	Bi-2212/Ag
7	0,3	круглый, скрученный	19	∅ 0,4	Bi-2212/Ag

П р и м е ч а н и е. Кз — коэффициент заполнения матрицы провода ВТСП фазой.

ренних омических тепловыделений и теплообмена на поверхности раздельно с жидкой и паровой фазой криоагента. В данной модели учитывалось, что внутренние тепловыделения в датчике генерируются в металле матрицы проводника только при резистивном (нормальном) состоянии сверхпроводника. Это уравнение дополнялось интегралом для расчета падения напряжения по длине проводника и в целом они дополнялись условиями однозначности и выражениями для расчета текущих свойств материалов, примененных в датчике.

Модель теплопроводности для длинномерного терморезистивного датчика в общем виде записывается в следующем виде:

$$\bar{\rho}\bar{C}(T)\frac{\partial T(\tau, x_i)}{\partial \tau} = \nabla(\bar{\lambda}(T)\nabla T(\tau, x_i)) + q_v(T); \quad i = 1, 2, 3;$$

$$q_v(T) = \begin{cases} 0 & \text{при } T(\tau, x_i) \leq T_c; \\ \frac{I^2\delta(T)}{S} & \text{при } T(\tau, x_i) > T_c, \end{cases} \quad (1)$$

где $\bar{\rho}$, кг/м³; $\bar{C}(T)$, кДж/(кг·К); $\bar{\lambda}(T)$, [Вт/(м·К)], — средние плотность, теплоемкость и теплопроводность материала композитного проводника соответственно; $q_v(T)$ — объемная плотность тепловыделений, Вт/м³.

Значения $\bar{\rho}$, $\bar{C}(T)$, $\bar{\lambda}(T)$ и $q_v(T)$ рассчитывались в зависимости от температуры текущего сечения проводника с учетом коэффициента заполнения матрицы ВТСП-фазой (Кз): $\bar{\rho} = \rho_m(1 - Кз) + \rho_{СП}Кз$, $\bar{\lambda} = \lambda_m(1 - Кз) + \lambda_{СП}Кз$, $\bar{C} = C_m\frac{\rho_m}{\bar{\rho}}(1 - Кз) + C_{СП}\frac{\rho_{СП}}{\bar{\rho}}Кз$, где индекс “м” относится к металлу матрицы, а “СП” — к сверхпроводнику.

Теплообмен на границе проводника с криоагентом описывается граничными условиями III рода:

$$\vec{n} \cdot \lambda(T_n) \text{grad } T_n(\tau, x_n) = \alpha(T_C - T_n(\tau, x_n)),$$

где α — локальный коэффициент теплоотдачи на поверхности, температура которой T_n ; T_C — локальная температура криоагента на этой же поверхности.

Модель также дополнялась уравнениями для расчета термодинамических свойств материала датчика. Проводник рассматривался как композитный, состоящий из матрицы — серебра или сплава серебра с оловом и ВТСП-материала, равномерно распределенного в центральной области провода в виде нитей микронных размеров керамики Vi-2212 или Vi-2223. Коэффициент заполнения (доля сверхпроводника в поперечном сечении нити) составлял от 0,3 до 0,7 (см. таблицу).

Термическое состояние материала проводника, рассчитываемое по этой модели, определяет электрическое сопротивление материала матрицы ВТСП. Поэтому модель дополнялась выражением для определения напряжения, снимаемого с концов длинномерного ВТСП:

$$U(h) = I \int_0^h \frac{\delta(T(\tau, x_i))}{S} dh, \quad (2)$$

где S — электропроводная часть сечения стержня; $\delta(T)$ — температурная зависимость удельного сопротивления матрицы ВТСП.

Предварительное исследование размерности данной задачи показало, что распределение температуры по длине проводника хорошо описывается одномерной моделью. Теплоотдача на поверхности проводника хорошо описывается сосредоточенными моделями конвективного теплообмена на вертикальной стенке отдельно с жидкой и паровой фазой криоагента. Численно моделировалось распределение температуры по длине датчика, верхний конец которого сообщается со средой, где задавались условия теплообмена и параметры окружающей среды, близкие к условиям проведения экспериментов. Условия теплообмена с окружающей средой на теплом конце проводника, как показали исследования, сильно сказываются на состоянии проводника и поэтому они варьировались в широких пределах.

Таким образом, физико-математическая модель терморезистивного датчика уровня, температурное поле в котором формируется за счет внешних теплопритоков, решалась численно, методом контрольного объема [5], в одномерной постановке, при известных коэффициентах теплоотдачи отдельно для газовой и жидкостной области.

Распределение температуры и удельного падения напряжения по длине проводника при уровне заливки 50, 100 и 150 мм (при максимальной высоте заливки $H_{\max} = 200$ мм) показаны соответственно на рис. 5 и 6.

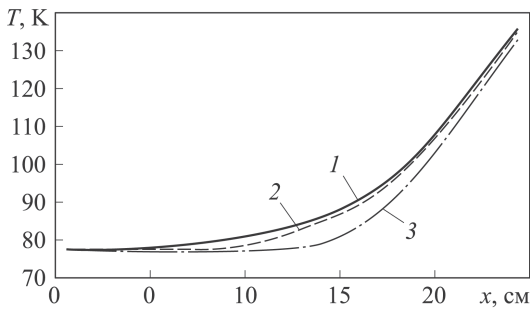


Рис. 5. Распределение температуры по длине проводника в зависимости от уровня заливки:

1 – 50 мм; 2 – 100 мм; 3 – 150 мм

Из рис. 6 следует несоответствие уровня перехода ВТСП и уровня заливки.

Характерный вид вольт-линейной зависимости ВТСП-датчика (образец № 5) приведен на рис. 7. Полиномиальная зависимость данной вольт-линейной характеристики была использована при создании прибора-измерителя уровня.

Вольт-линейные характеристики образцов ВТСП-датчиков № 1–4 (см. таблицу) при внешних условиях $t_{0,c} = +24^\circ\text{C}$, $I = 100\text{ мА}$ приведены на рис. 8.

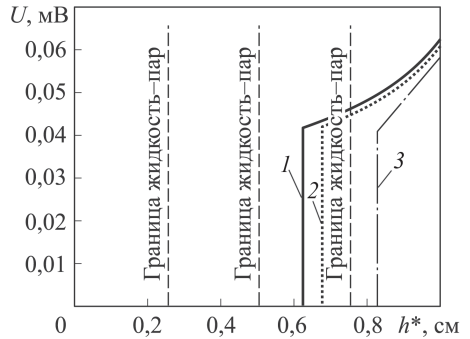


Рис. 6. Распределение падения напряжения по длине проводника:

1 – при уровне заливки $0,25H_{\max}$ (50 мм), 2 – $0,5H_{\max}$ (100 мм), 3 – $0,75H_{\max}$ (150 мм)

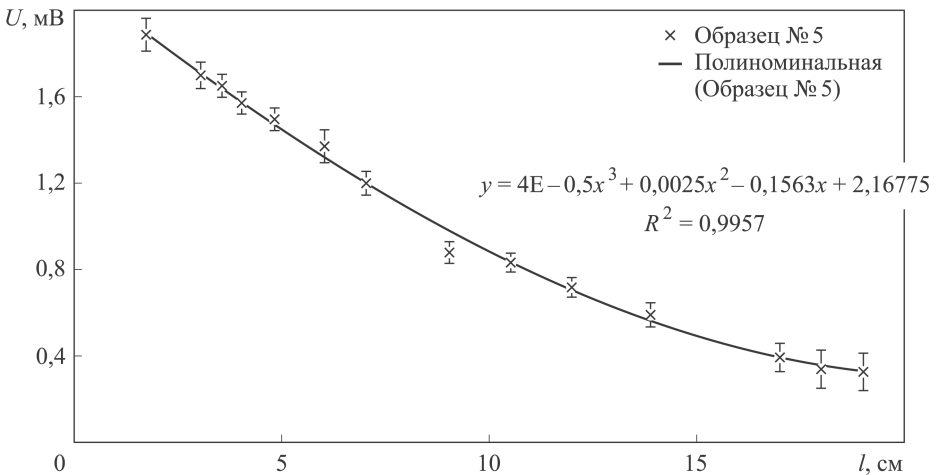


Рис. 7. Вольт-линейная характеристика терморезистивного ВТСП-датчика (образец № 5)

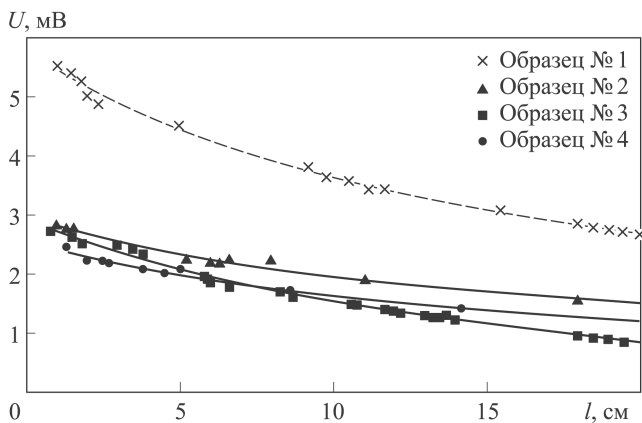


Рис. 8. Вольт-линейные характеристики других образцов датчиков № 1–4 (×, ■, ▲, ●), свободных от керамики при $t_{0,c} = +24^\circ\text{C}$, $I = 100\text{ мА}$

По результатам экспериментальных исследований и моделирования был проведен анализ свойств оптимального прототипа ВТСП-датчика и его рациональной конструкции, которая имела бы минимальные внешние тепловые возмущения к контролируемой среде.

Для подтверждения возможности использования проводников с ВТСП-фракцией в качестве датчика был сконструирован, изготовлен и протестирован опытный образец вторичного измерительного прибора. Алгоритм работы прибора был следующим. Положение уровня жидкости фиксировалось первичным датчиком в виде сигнала — интегрального падения напряжения на датчике. Это напряжение переводилось контроллером по тарифовочной кривой, приведенной на рис. 7, в значение уровня жидкости и на приборе загорался индикатор, соответствующий этому уровню. Для определения активного индикатора использовалась так называемая “идеальная характеристика”. Идеальная характеристика образца ВТСП-датчика № 5 приведена на рис. 9. Например, согласно этой характеристике при заполнении экспериментального сосуда на 120 мм должен гореть индикатор № 20. В реальных же условиях при испытании прибора наблюдался разброс показаний прибора в пределах до $\pm 20\text{ мм}$ (кривые экспериментов № 1–4 на рис. 9), что связано с сильным влиянием на работу датчика внешних условий окружающей среды. Это позволяет сравнить характеристики реального и идеального измерителей уровня, оценить наблюдаемые в условиях реального применения погрешности.

В работе показана возможность применения ВТСП в качестве чувствительного элемента линейного терморезистивного уровнемера для криогенных жидкостей. Сконструирован и испытан прибор для измерения уровня жидкого азота при атмосферном давлении. Предложенная математическая модель теплопроводности линейного терморезистивного датчика позволила исследовать процессы формирования



Рис. 9. Идеальная и наблюдаемая характеристики опытного и измерительного уровней

вольт-линейной характеристики таких датчиков и, сопоставив расчетные и экспериментальные данные для опытных ВСПП-датчиков, оценить погрешность такого прибора, которая, например, для образца № 5 не превышала 13,5% во всем диапазоне проведенных измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением (ПБ 03-576-03)*. Сер. 03. Вып. 24. М.: ГУП “Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России”, 2003. 192 с.
2. *Беляков В.П.* Криогенная техника и технология. М.: Энергоиздат, 1982. 272 с.
3. *Дульнев Г.Н.* Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высш. шк., 1994. 345 с.
4. *Информационный бюллетень “Сверхпроводники для электроэнергетики”*. РИЦ “Курчатовский институт”. Т. 4. Вып. 6, декабрь 2007. 11 с.
5. *Пантакар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.

REFERENCES

- [1] *Pravila ustroystva i bezopasnoy ekspluatatsii pod davleniem (PB 03-576-03)*, ser. 03, vup. 24 [Rules for design and safe operation of vessels working under pressure (RS 03-576-03)], ser. 03, iss. 24. Moscow, GUP “Nauchno-tekhnicheskiiy tsentr po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortekhnadzora Rossii” Publ. 2003. 192 p.
- [2] *Belyakov V.P.* Kriogennaya tekhnika i tekhnologiya [Cryogenic equipment and technology]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 272 p.
- [3] *Dul'nev G.N.* Teplo- i massoobmen v radioelektronnoy apparature [Heat and mass exchange in electronic equipment]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1994. 345 p.
- [4] *Inf. Byull. “Sverkhprovodniki dlya elektroenergetiki”* [News-bulletin “Superconductors in Electric Power Industry”], 2007, vol. 4, iss. 6 (in Russ.).

[5] Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. New York, McGraw-Hill Book Company., 1980. 197 p. (Russ.ed.: Patankar S. Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 154 p.).

Статья поступила в редакцию 15.07.2014

Колосов Михаил Анатольевич — канд. техн. наук, доцент кафедры “Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения” МГТУ им. Н.Э. Баумана, чл.-корр. Международной академии холода. Автор более 75 научных работ и трех патентов РФ в области холодильной и криогенной техники.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Kolosov M.A. — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Refrigeration and Cryogenic Engineering, Conditioning and Life Support Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Corresponding member of the International Academy of Refrigeration. Author of more than 75 publications and of 3 patents of Russian Federation in the field of refrigeration and cryogenic engineering.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Емельянов Василий Юрьевич — инженер УПЦ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 35 научных работ и семи патентов РФ в области использования сверхпроводимости в системах сотовой связи и хранения криогенных жидкостей, а также ресурсо- и природосбережения при хранении и транспортировке жидких углеводородов.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Emelianov V.Yu. — engineer of the Training and Production Center of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 35 publications and of 7 patents of Russian Federation in the field of resources and nature conservation during storage and transportation of liquid hydrocarbon.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Навасардян Екатерина Сергеевна — канд. техн. наук, доцент кафедры “Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 35 научных работ в области криогенной и холодильной техники, получения и разделения редких газов.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

Navasardyan E.S. — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Refrigeration, Cryogenic Engineering, Air Conditioning and Life Support Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 35 publications in the field of cryogenic and refrigeration technologies, preparation and separation of rare gases.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.