

УДК 621.642.6

М.А. Колосов, В.Ю. Емельянов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
ул. 2-я Бауманская, д. 5, г. Москва, 105005, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОВОЛОЧНОГО ВТСП ДАТЧИКА УРОВНЯ КРИОЖИДКОСТЕЙ

Создана одномерная нестационарная тепловая модель работы длинномерного ВТСП проводника, использующего терморезистивный эффект для измерения уровня криогенной жидкости. Полученная модель позволила определить распределение температур по длине ВТСП проводника и другие характеристики. Было проведено сопоставление расчетных данных с экспериментальными, полученными на атмосферном сосуде Дьюара с жидким азотом.

Ключевые слова: ВТСП проводник – нестационарная теплопроводность – уровнемер.

М.А. Колосов, В.Ю. Емельянов

Московський державний технічний університет ім. М.Е. Баумана,
вул. 2-а Бауманська, 5, м. Москва, 105005, Росія

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДРОТЯНОГО ВТСП ДАТЧИКА РІВНЯ КРІОРІДИН

Створена одномірна нестационарна теплова модель роботи довгомірного ВТСП провідника, який використовує терморезистивний ефект для вимірювання рівня криогенної рідини. Отримана модель дозволила визначити розподіл температури по довжині ВТСП провідника та інші характеристики. Було проведено зіставлення розрахункових даних з експериментальними, отриманими на атмосферній посудині Дьюара з рідким азотом.

Ключові слова: ВТСП провідник – нестационарна теплопровідність – рівнемір.

DOI: 10.15673/0453-8307.6/2014.31209



This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

I. ВВЕДЕНИЕ

Явление высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) создало предпосылки применения этого эффекта в простых и удобных датчиках уровня (ВТСП - уровнемерах) нового типа для широкого круга криогенных жидкостей [1,2]. В этих работах приведены конструкции и результаты испытаний таких датчиков на базе серийно выпускаемых ВТСП – проводников. Было отмечено, что при этом наблюдаются заметные потери криожидкости. Задачи минимизации потерь криожидкости и оптимизации конструкции ВТСП-уровнемеров на базе промышленных серийно выпускаемых ВТСП проводников потребовали детально рассмотреть физику их тепловых процессов, определить условия и ограничения применимости таких датчиков.

Для решения этих задач была разработана физико-математическая модель тепловых процессов в двух типах датчиков уровня: открытого без несущего керамического стержня и закрытого, двойного хода с керамическим стержнем.

Для этих моделей были сформулированы границы работоспособности. При формировании мо-

делей ВТСП-датчиков были учтены нижеследующие особенности:

- технологические: конструкция и состав материалов провода, особенности покрытий (коэффициент заполнения) и др;
- конструктивные: размеры, длина датчика, число заходов, особенности монтажа, наличие керамического корпуса и изоляции и др.;
- режимные: температура, условия теплообмена и др.

II. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МОДЕЛИРУЕМОГО ДАТЧИКА

На рисунке 1 схематично изображена конструкция ВТСП-датчика уровня открытого типа и способ его размещения в криогенной емкости. В качестве чувствительного элемента датчика служит вертикальный отрезок ВТСП-провода диаметром 0.4 мм, закрепленный между днищем и пробкой емкости. В экспериментах высота H составляла 250 мм. Данная схема использована в работе при моделировании такого ВТСП-уровнемера. При работе ВТСП датчик условно можно разбить на три участка, отличающихся

условиями теплообмена на поверхности чувствительного элемента: адиабатный участок и два участка теплообмена с газообразным и жидким криопродуктом. Провод рассматривается как стержень малого поперечного сечения ($l/d \gg 1$).

Верхний конец чувствительного элемента (провода) ($X=0$) находится в контакте с окружающей средой. Нижние участки провода (*II, III*), до уровня X_3 находятся в тепловом контакте с криоагентом. На уровне от X_3 до X_2 чувствительный элемент охлаждается жидкостью (участок *III*), на уровне $X_1 < X < X_3$ парами криоагента (участок *II*).

В качестве криоагента могут использоваться такие ожиженные газы как: аргон, кислород, азот, воздух. В настоящей работе с учетом безопасности и доступности использовался жидкий азот и для него проведены все расчеты и сопоставления.

По стержню пропущен измерительный постоянный ток ($I \approx 0.1$ А), падение напряжения от которого даёт представление о длине резистивного участка, и высоте уровня заливки криоагента. Ток I приводит к омическим тепловыделениям в проводе, которые отводятся к криоагенту, испаряя его. На участке, где температура сверхпроводника ниже температуры фазового перехода в сверхпроводящее состояние сопротивление току отсутствует.

II. УРАВНЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ВТСП ПРОВОДА.

С учетом сформулированного выше условия одномерности задачи уравнение нестационарной теплопроводности для чувствительного элемента ВТСП провода-стержня записывается [3]:

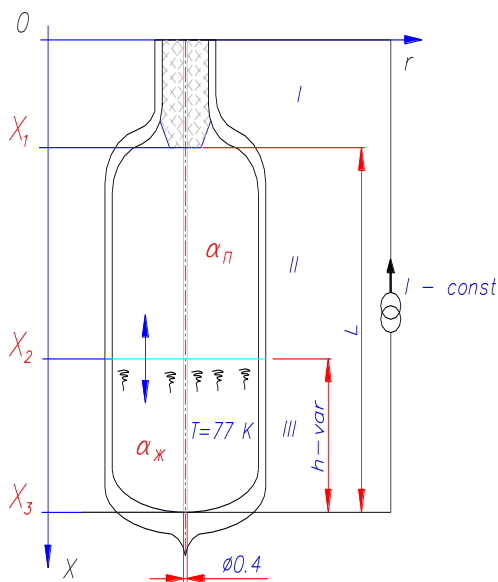


Рисунок 1 - Модель ВТСП датчика уровня криожидкости (на примере азота).

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\alpha P}{S} (T - T_a) + q_v \quad (1)$$

Уравнение (1) включает нестационарный, диффузионный и источниковый члены.

Там, где теплообмен на поверхности отсутствует (рисунок 1, участок *I*) в уравнении (1) исключается соответствующий тепловой поток ($\alpha=0$) и получаем:

$$\rho C \frac{\partial T(t, x)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(t, x)}{\partial x} \right) + q_v \quad (2)$$

На верхнем конце провода присутствует тепловой поток q_{BH} , из окружающей среды, который определяется:

$$-\lambda \cdot S \frac{\partial T}{\partial X} \Big|_{X=0} = q_{BH}$$

(граничные условия 2-го рода для *I* участка).

Теплообмен и граничные условия на поверхности *II* и *III* участков чувствительного элемента описывались граничными условиями 3-го рода. На участке охлаждения парами криоагента (обл. *II*)

$\alpha_{II} = 9.775 \frac{Bm}{m^2 \cdot K}$, на участке охлаждения жидко-

стью (обл. *III*) $\alpha_{III} = 1057 \frac{Bm}{m^2 \cdot K}$, что рассчитано,

согласно данным [6].

Суммарный тепловой поток вдоль стержня (q_v) складывался из двух слагаемых: внесенной теплоты из окружающей среды и Ленц-Джоулевых резистивных тепловыделений по длине стержня:

$$q_v = q_{эл} + q_{BH} = q_{BH} + I^2 \frac{X \rho_{эл}}{S}$$

где q_{BH} – внешний теплоприток в стержень в т. $X=0$ (рисунок 1); $q_{эл}$ – внутренний источник джоулевой теплоты, Вт

Допущения и обозначения принятые при моделировании:

T_a – температура среды (77 К для жидкого азота и атмосферном давлении);

λ – теплопроводность материала стержня [5], Вт/(м·К);

C – теплоёмкость материала стержня [5], Дж/(кг·К);

ρ – плотность стержня, $\rho = 10500 \frac{кг}{м^3}$;

P – периметр сечения стержня, $P = \pi \cdot d$;

α – коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности стержня в среду, Вт/м²;

I – электрический ток по ВТСП: $I = 0.1$ А;

X – координата;

$\rho_{эл}$ – электропроводность материала оболочки ВТСП, является функцией температуры [5], Ом·м;

S – площа поперечного сечення стержня, m^2 :

$$S = \frac{\pi d^2}{4} [1 - K_3]$$

d – діаметр стержня, мм (Таблиця 1);

K_3 – коефіцієнт заповнення, (Таблиця 1).

Геометрические предпосылки:

Длина стержня: $H = 0.25$ м;

Рабочая длина стержня (ВТСП датчик, армированный серебром):

$L = X_3 = 0.2$;

Длина теплоизолированной области I: $X_1 = 0.05$;

Длина II области теплообмена (пар):

$(X_1 \dots X_2)$: $0 \dots (L-h)$;

Длина III области теплообмена (жидк):

$(X_2 \dots X_3)$: $h = 0 \dots L$;

Высота участка II изменяется в зависимости от высоты столба криоагента:

- максимальное значение: $l_2^{\max} = L$ ($h = X_1$)

- минимальное значение: $l_2^{\min} = 0$ ($h = X_3 - L - X_1$)

- $\alpha = \alpha_{II}$ – граничные условия 3-го рода.

Участок III.

- температура в т. X_3 равна $T_{N2} = 77$ К, примем что условия теплообмена – адиабатные;

$\alpha = \alpha_{ж}$ – граничные условия 3-го рода.

Численная, расчетная модель для ПЭВМ представляет собой систему следующих уравнений (3):

- одномерное уравнение стационарной теплопроводности стержня диаметром D , с известными граничными условиями II и III рода, сформированная на основе уравнения (1);

- уравнения расчета источникового члена, включающего внутренние тепловыделения от конвективного теплообмена и резистивных потерь.

- закон Ома для расчета падения напряжения по длине стержня;

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(x)}{\partial x} \right) = q_v(x) \\ q_v(x) = k(T) \cdot \frac{4}{D} (T(x) - T_c) + \frac{\rho dx l^2}{2} \\ \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{I \cdot \rho(T(x))}{S} \Leftrightarrow U = I \cdot \int_{L1}^{L2} \frac{\rho(T_K)}{S} dx \end{cases} \quad (3)$$

где $\lambda(T)$ – температурная зависимость теплопроводности материала стержня; S – эффективная (теплопередающая) площадь сечения стержня; $q_v(x)$ – удельная плотность тепловыделений в стержне; k – коэффициент теплопередачи оболочки (корпуса) стержня, приведенный к наружному диаметру (D) стержня; T_c – температура среды; U – напряжение на концах стержня; I – ток измерения.

Для решения системы нелинейных уравнений (3) численным методом осуществлялось разбиение

стержня на n -ое количество участков (в нашем случае $n=125$). Каждый i – участок с координатой $X(i)$ имеет соответствующую ему температуру поверхности $T(i)$ (рисунок 2). Для решения численным методом система (3) была приведена к «линейному аналогу». Полученная система линейных уравнений решалась на ПЭВМ.

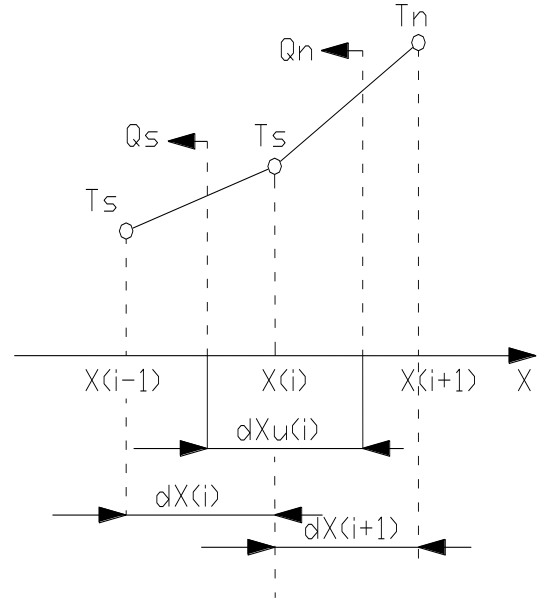


Рисунок 2 – Вид кусочно-гладкой функции и обозначения узловых точек.

Линейный аналог первого уравнения модели (3) получается его интегрированием по элементарному объему $\Delta V = S dx$.

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(x)}{\partial x} \right) dV = \int_{\Delta V} q_v dV \quad (4)$$

Интегрирование левой части уравнения теплопроводности (4) выполняется с использованием кусочно-гладкой функции температуры, вид которой приведен на рисунке 2.

Линейная аппроксимация на границе позволяет описать тепловые потоки на гранях Q_s и Q_n выделенного объема:

$$\begin{aligned} \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial X} \lambda(T) \frac{\partial T x}{\partial x} dV &= Q_n - Q_s = \\ &= \lambda_n \frac{T_n - T_p}{dX_n} S - \lambda_s \frac{T_p - T_s}{dX_s} S = \\ &= \frac{\lambda_n S}{dX_n} (T_n - T_p) - \frac{\lambda_s S}{dX_s} (T_p - T_s) \end{aligned} \quad (5)$$

где для описания теплового потока на грани используется уравнение Фурье:

$$Q_i = -\lambda_i \frac{T_p - T_i}{\Delta X} S,$$

где λ_i – усредненное на грани значение коэффициента

ента теплопроводности; S – эффективная (теплопередающая) площадь сечения стержня; ΔX – «шаг» по координате.

Интегрирование источникового члена выполнялось с учетом его зависимости от температуры:

$$\int_{\Delta V} q_v dV = \left[k \frac{4}{D} (T_p - T_c) + Q_i \right] \rho \Delta X \cdot U_i =$$

$$= \frac{4 \cdot k}{D} S \Delta X \cdot U_i T_p + \left(Q_i - \frac{4k}{D} T_c \right) S \Delta X \cdot U_i = \quad (6)$$

$$= S_p T_p + S_c$$

Математическая модель реализуется с помощью конечно-разностного метода интегрирования по элементарной ячейке [5].

Правые части выражений (5) и (6) подставляются в уравнение (4) и после преобразования получается дискретный аналог уравнения теплопроводности:

$$\frac{\lambda_n S}{dX_n} (T_n - T_p) - \frac{\lambda_s S}{dX_s} (T_p - T_s) = S_p T_p + S_c$$

После раскрытия скобок и группировки слагаемых получим окончательный вид линейного аналога:

$$A_p T_p = A_n T_n + A_s T_s + B_p$$

где

$$A_n = \frac{\lambda_n S}{dX_n}; \quad A_s = \frac{\lambda_s S}{dX_s}; \quad B_p = \left(-\frac{4k}{D} T_c + Q_i \right) S_i$$

$$A_p = A_n + A_s + \frac{4k}{D} S dX U_i$$

Уравнения (7) для всех ячеек стержня решаются совместно численным методом. Коэффициент теплопроводности на границе аппроксимируется выражением: $\lambda_i = f(0.5(T_i + T_{i+1}))$ – что подходит для равномерной сетки разбиения при малых градиентах температур.

Для точного моделирования датчика U-образного типа необходимо учесть влияние теплопередачи через корундовую «соломинку», от ВТСП проводника с температурой T_i (рисунок 3) к охлаждающей среде с температурой T_c . Для этого осуществим упрощение геометрии стержня и схематизацию конструкции керамической «соломинки».

Определение вспомогательных величин:

$$\Gamma_1 = \frac{D_c - l}{2} = \frac{5.4 - 2}{2} = 1.7$$

$$\Gamma_2 = \sqrt{\left(\frac{D_c}{2}\right)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{5.4}{2}\right)^2 + \left(\frac{2}{2}\right)^2} = 2.879$$

$$\bar{\Gamma} = \frac{\Gamma_1 + \Gamma_2}{2} = 2.290$$

$$\bar{D}_t = \Gamma_1 + \Gamma_2 = 4.579$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{D_c}{l} \Rightarrow \beta = \operatorname{arctg} \left(\frac{5.4}{2} \right) = 2.7$$

газовый зазор в датчике – 0.2 мм.

Связь удельного потока на поверхности с интенсивностью внутренних тепловыделений:

$$\frac{\pi D^2}{4} \cdot dx_i q_v = q \cdot dx_i$$

$$q_v = q \frac{4}{\pi D^2} = 2\pi (T(i) - T_c) \cdot \frac{4}{\pi D^2}$$

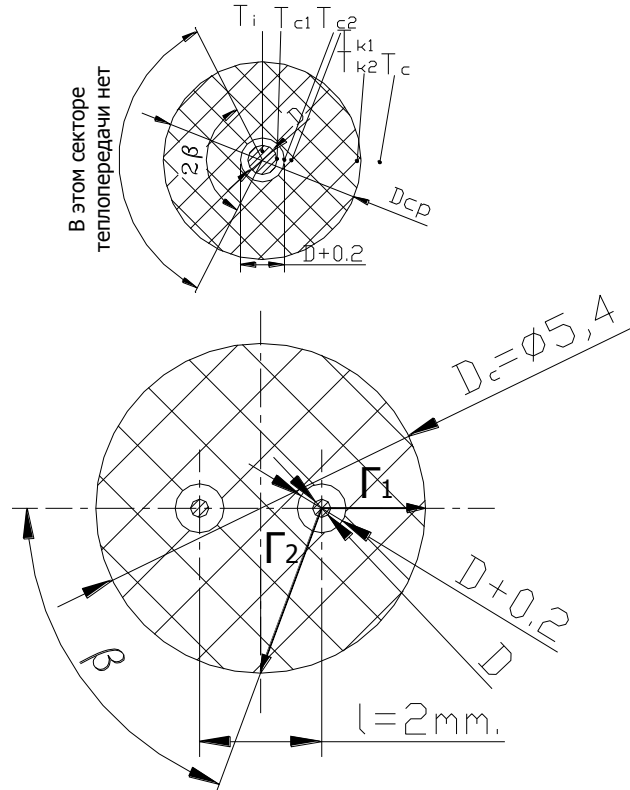


Рисунок 3 – Чертеж керамического (корунд) стержня (2-х канальная соломинка) в котором коаксиально размещены ВТСП проводники с газовым зазором (0.2 мм).

В данной конструкции моделью механизма теплопередачи от ВТСП является многослойный стержень с газовым коаксиальным зазором.

Удельный (на 1 погонный метр длины) тепловой поток в многослойной цилиндрической стенке стационарных условиях описывается уравнениями [5]:

– тепловой поток от проводника в газовый зазор

$$q = \pi D \alpha_{c1} (T(i) - T_{C1});$$

– поток в газовом зазоре, λ – теплопроводность газа (среды)

$$q = \frac{2\pi \lambda_g (T_{C1} - T_{C2})}{\ln \left(\frac{D+0.2}{D} \right)};$$

$$q = \pi \cdot (D+0.2) \cdot \alpha_{c2} (T_{C1} - T_{K1});$$

– поток через цилиндрическую стенку корпуса датчика

$$q = \frac{2\pi\lambda_K(T_{K1} - T_{K2})}{\ln\left(\frac{\bar{D}_{cp}}{D+0.2}\right)};$$

λ_K – теплопроводность керамики корпуса датчика («корунд»)

$$q = \pi\bar{D}_{cp}\alpha_{C3}(T_{k2} - T_H).$$

Преобразуя систему, получим связь k – условного коэффициента теплопередачи многослойной конструкции ВТСП датчика с градиентом температур ($T(i) - T_C$).

$$\frac{q}{2\pi} \cdot \frac{1}{k} = T(i) - T_C$$

где

$$\frac{1}{k} = \frac{\lambda}{D\alpha_{C1}} + \frac{1}{\lambda_B} \ln\left(\frac{D+0.2}{D}\right) + \frac{2}{(D+0.2)\alpha_{C2}} +$$

$$+ \frac{1}{\lambda_K} \ln\left(\frac{\bar{D}_K}{D+0.2}\right) + \frac{2}{\bar{D}_K\alpha_{C3}}$$

$$q_v = 2(\pi - \beta)k(T(i) - T_C)$$

Решение вышеизложенных уравнений осуществлялось с помощью программы, написанной на языке Фортран для IBM PC/AT. Были промоделированы 2 образца ВТСП датчиков различных по конфигурации, исполнению, типу ВТСП (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры исследуемых образцов ВТСП.

Параметры образцов	Тип ВТСП	
	Образец № 0	Образец № 2
	Bi 2212	Bi 2223
Температура перехода, T_q [К]	82...85	110
Коэффициент заполнения, $Kз$	0.3	0.4
Диаметр проводника, D , [мм]	0.4	0.3
Число ВТСП жил	16	61
Конфигурация ВТСП проводника	линейная	U – образная
Фактическая длина ВТСП проводника, [мм]	200	285
Материал оболочки	Ag (99,9 %)	

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

При моделировании коэффициент теплоотдачи, был принят $\alpha_z = 6.6 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ $\alpha_{жс} = 900 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$.

Следует отметить, что моделирование по рассмотренной выше модели на ПЭВМ, показало, что изменение обоих коэффициентов конвективной теплоотдачи вплоть до 2-х раз ($\alpha_z = 15 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ $\alpha_{жс} = 1700 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$) незначительно повлияло на характер приведенных в настоящей статье зависимостей, что с одной стороны подтверждает порядок величин определенных в методике [5], а с другой указывает на существенно большее влияние осевой теплопроводности серебра и температуры оси стержня, на зависимости.

Адекватность полученной модели подтверждается результатами экспериментальных измерений. Сопоставление эксперимента и расчета представлено на рисунке 4. Точность совпадения экспериментальных и расчетных данных составляет не более 4% в средней части и не более 13.5% на концах.

Несовпадение на концах можно объяснить следующим образом:

Участок справа (максимальный уровень криоагента): образец №2. Отличие вызвано тем, что температура конца стержня ниже температуры о.с.

(в силу поступления холода по оси стержня); для образца №0 такого не наблюдается т.к. конструкция его такова, что его верхний участок находится в парах криоагента и от о.с. он изолирован пробкой (рисунок 3).

Участок слева (минимальный уровень хладагента): образец №2. Отличие вызвано тем, что в области 0...1.5 см. он ведет себя как резистор, т.е. при исчезновении сверхпроводимости измеряется напряжение на сопротивлении по всей длине серебряной оболочки ВТСП проводника.

Полученные изотермы температур поверхности датчика при максимальном и минимальном уровнях заполнения приведены на Рис. 5.

Полученное в результате расчета распределение температур (Рис.5). по длине ВТСП проводника позволило оценить градиент температур Δt . В нашем случае Δt порядка 25...70 град., что указывает на пленочный режим движения жидкости/газа при теплообмене стенки ВТСП проводника с измеряемым веществом – криоагентом.

Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных в основной рабочей зоне говорит об адекватности модели поставленной задаче.

Это позволяет заменить инструментальные измерения теплофизических параметров ВТСП проводника компьютерным моделированием, что снижает трудо- и материальные затраты.

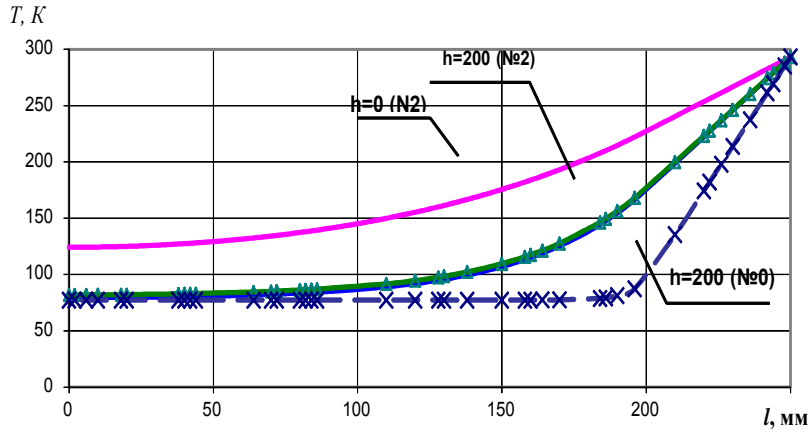


Рисунок 4 – Зависимость напряжения (U) на концах датчика, в зависимости от высоты (h) уровня жидкого азота ($t_{oc}=+20$ °C, $I = 100$ мА).

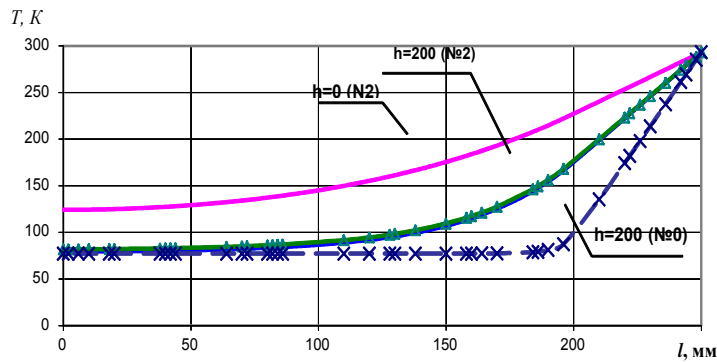


Рисунок 5 – Распределение температур (T) по длине (l) ВТСП датчиков (образец №0 и №2), при максимальном ($h=200$) и минимальном ($h=0$) уровнях жидкого азота ($t_{oc}=+20$ °C, $I = 100$ мА).

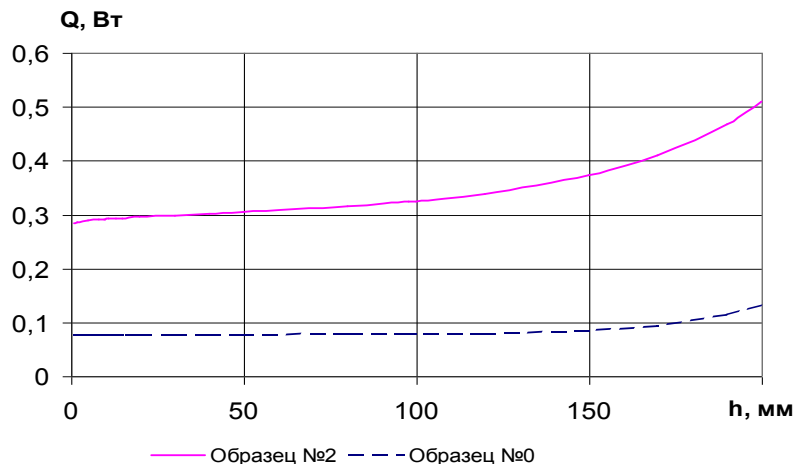


Рисунок 6 – Зависимость тепловыделений (Q) в измеряемую среду в зависимости от уровня заливки (h) ($t_{oc}=+20$ °C, $I = 100$ мА).

Представляет интерес исследовать зависимость фактической границы перехода в нормальное состояние от уровня заливки криоагента. В идеальном датчике с минимальной осевой теплопроводностью они совпадают. В рассмотренных образцах длинномерных ВТСП из-за высокой теплопроводности серебра, а также её зависимости от температуры эта характеристика носит нелинейный характер. В области I характеристика с $h=200$ до $h = 97.7$ имеет пологий спад, вызванный тем, что фактический уровень перехода в сверхпроводящее состояние ВТСП находится под (ниже) уровнем заливки (играет роль осевая теплопроводность серебра, транспортирующего тепло из о.с.). При уровне менее $h=97.7$ и до $h= 9.5$ часть тепла из о.с. рассеивается конвективно в пары криоагента (азот в нашем случае) и геометрический уровень перехода находится над уровнем жидкости. Точка $h=97.7$ является точкой перегиба и различная крутизна кривой «заливка» на участках I и II объясняется различием коэффициентов теплоотдачи в пар и жидкость.

На участке III температура по всей длине ВТСП выше критической ($T_c=110$ К) и поэтому в этом случае сопротивление по ВСЕЙ длине ВТСП проводника носит резистивный характер – внутренние тепловыделения максимальны.

В результате компьютерного моделирования по вышеупомянутой программе удалось установить, что используя «солонку» большей толщины на определенном участке (рисунок 7), мы получаем датчик с резко выраженной нелинейной характеристикой (рисунок 8). Данная особенность позволяет использовать рассмотренный ВТСП датчик в системах автоматического заполнения уровня релейного типа.

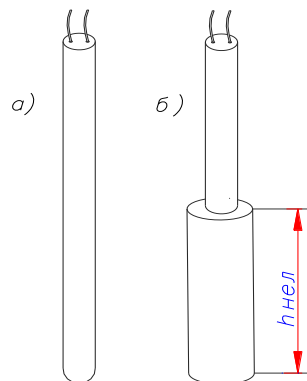


Рисунок 7 – Внешний вид измененной конструкции датчика, имеющего релейную характеристику. а – обычный, б – модифицированный (релейный) ($h_{нел} \approx 15$ см.)

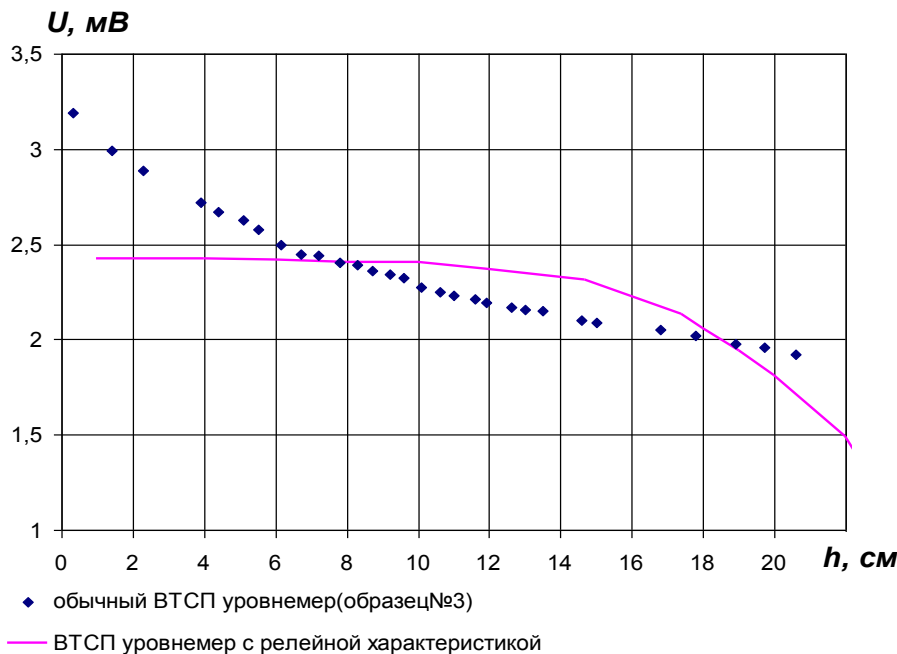


Рисунок 8 – Рабочая характеристика ВТСП датчиков (обычного и релейного типов).

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная математическая модель работы ВТСП уровнемера и сравнение с экспериментальными данными на атмосферном сосуде Дюара с жидким азотом позволило с точностью до 14 % построить рабочую (вольт-линейную) характеристику уровнемера. Использование математической

модели также позволило: построить распределение температур по длине стержня; сформировать ВТСП датчик уровня с релейной характеристикой; определить вносимые в криогенную среду тепло при использовании терморезистивного метода.

Приведенные результаты моделирования показали, что созданная модель, описывающая процессы в ВТСП уровнемерах может использоваться

и для расчета характеристик ВТСП уровнемеров пригодных для работы в больших емкостях.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архаров И.А., Емельянов В.Ю.** ВТСП уровнемер криогенной жидкости // Химическое и Нефтегазовое Машиностроение, 2000 №9, с. 35-36.
2. **Архаров И.А., Емельянов В.Ю.** Особенности электронного блока измерителя уровня криогенной жидкости на основе ВТСП // Химическое и Нефтегазовое Машиностроение, 2002 №1, с. 15-17.
3. **Мадера А.Г.** Моделирование теплообмена в

технических системах. – М.:НО Научный фонд «ПИЛ им. Академика В.А.Мельникова», 2005. – 208 с., ил.

4. **Новицкий Л.А., Кожевников И.Г.** Теплофизические свойства материалов при низких температурах. Справочник. – М: «Машиностроение», 1975.
5. **Пантакар С.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат., 1984, 152 с.
6. **Малков М.П.** и др. Справочник по физико-техническим основам криогенной техники. М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с., ил.

M. Kolosov, V. Emelianov

Moscow State Technical University n.a. N.E. Bauman, ul. Baumanskaya 2-ya, 5, Moscow, 105005, Russia

MATHEMATICAL MODELING OF HTS WIRE GAUGE OF CRYOGENIC LIQUIDS

One-dimensional transient thermal model of the lengthy HTS conductor using thermoresistive effect to measure the level of cryogenic liquid was created. Resulting model made it possible to determine the distribution of pacetures along the length of the HTS conductor and other characteristics. The comparing-of calculated and experimental data obtained at an atmospheric dewar with liquid nitrogen was carried out.

Keywords: HTS conductor – nonstationary thermal conductivity – level gauge.

REFERENCES

1. **Arkharov I.A., Emelyanov V.Y.** HTS cryogenic liquid the level gauge. Chemical and Petroleum Engineering. – №9. – 2000 – p. 35-36.
2. **Arkharov I.A., Emelyanov V.Y.** Features of the electronic unit level meter cryogenic liquid HTS. Chemical and Petroleum Engineering. – №1. –2002. – p. 15-17.
3. **Madera A.G.** Modelling of heat transfer in engineering systems. - M: NO Naucnij fond "PIL

- im. Academica V.A. Melnikova", 2005. – 208 p., Ill.
4. **Novitsky L.A., Kozhevnikov I.G.** Thermophysical properties of materials at low temperatures. Handbook. – М.: "Engineering". – 1975.
5. **Pantakar S.** Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics. – М.: Energoatomizdat. – 1984. – 152 p.
6. **M.P. Malkov** et al. Handbook of physical and technical fundamentals of cryogenic engineering. – М.: Energoatomizdat. –1985. – 432 p., Ill.

Отримана в редакції 04.11.2014, прийнята до друку 17.11.2014