

Расчетно-экспериментальное определение параметров автомобильных датчиков кислорода

Рассадин М.Ю. «НПП ИТЭЛМА», г. Москва

Предпосылки

1. В автомобильной промышленности сегодня используются 2 типа датчиков кислорода (ДК):

- С атмосферной камерой эталонного газа
- С накачкой кислорода из отработавших газов (ОГ) в герметичную камеру эталонного газа

Загрязнение воздуха от утечек ОГ, испарения технических жидкостей и т.п. в подкапотном пространстве, откуда забирает воздух ДК с атмосферной камерой, искажает показания. ДК с накачкой лишен этого недостатка.

2. Для моделирования работы и сравнительных испытаний ДК разных производителей на созданном в НПП «ИТЭЛМА» безмоторном стенде **необходимо иметь данные о температуре электро-химической ячейки (ЭХЯ) и давлении кислорода внутри камеры эталонного газа.** Стенд, снабженный двумя смесителями газов, японским HORIBA GDC-730 для смесей кислорода и азота и российским НЕОСИБ СГ-5, способным смешивать в заданных пропорциях 5 газов (N_2 , O_2 , CO_2 , CO и H_2), не оснащен нагревателем смеси газов. Нагрев ЭХЯ обеспечивается собственным нагревателем ДК.

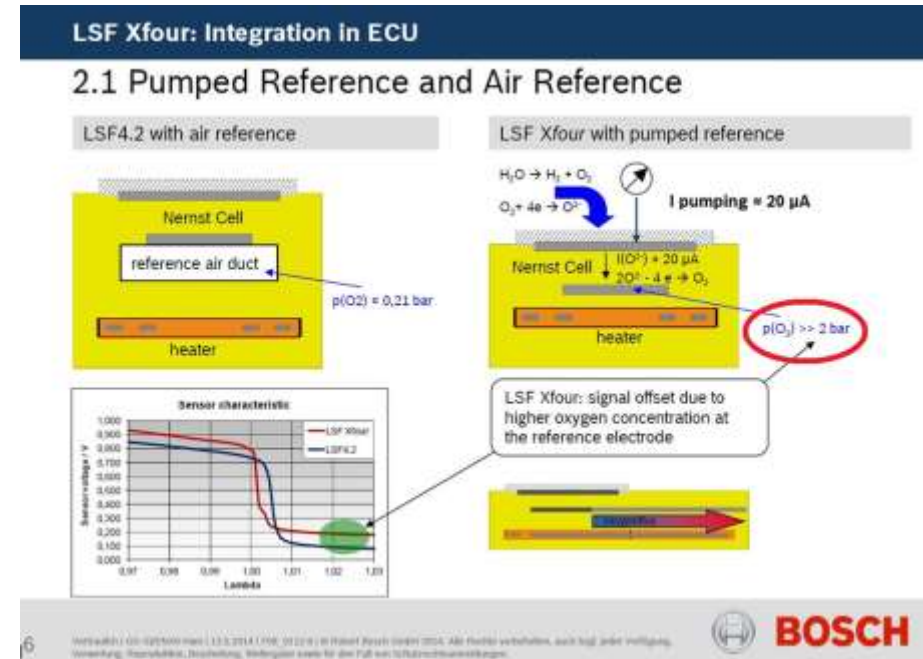


Предпосылки

3. Компания BOSCH в некоторых своих материалах показывает, что давление в камере может быть больше 2 бар.

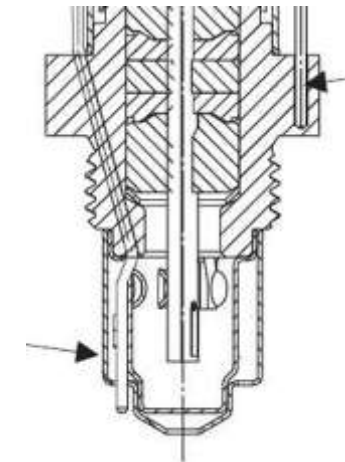
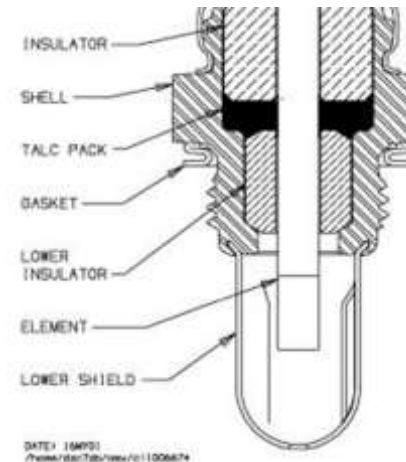
В материалах других компаний, производящих такие ДК или в литературных источниках подобных данных найти не удалось.

4. Планарные чувствительные элементы (ЧЭ), применяемые в современных ДК имеют подобные конструкцию, геометрические размеры и характеристики нагревателя. **Основное отличие- конструкция защитного колпачка.**



ДК DELPHI с накачкой

ДК BOSCH с атмосферной камерой



Определение температуры ЭХЯ

1. Установленной на ЧЭ термопарой.

Недостатки:

- Сложность определения местоположения термопары на ЧЭ
- Отличия в теплопередаче к стороне измерительного электрода и к стороне нагревателя
- Конвекция со стороны измерительного электрода
- Миниатюрность и хрупкость ЧЭ

2. По уравнению Нернста, если поместить нагретый ДК в смесь азота с известной концентрацией кислорода.

$$U_{sens} = U_0 + \frac{RT_{sens}}{4F} \ln\left(\frac{p_{O_2}^{ref}}{p_{O_2}^{exh}}\right)$$

U_0 – разность потенциалов электродов при одинаковом содержании кислорода в эталонном и измеряемом газах, В;

R – универсальная газовая постоянная (8,31 Дж/моль*К);

T_{sens} – температура чувствительного элемента, К;

F – постоянная Фарадея ($9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль);

$p_{O_2}^{ref}$ – парциальное давление кислорода в эталонном газе;

$p_{O_2}^{exh}$ – парциальное давление кислорода в измеряемом газе.

Определить температуру обоими методами возможно только для ДК с атмосферной камерой эталонного газа.

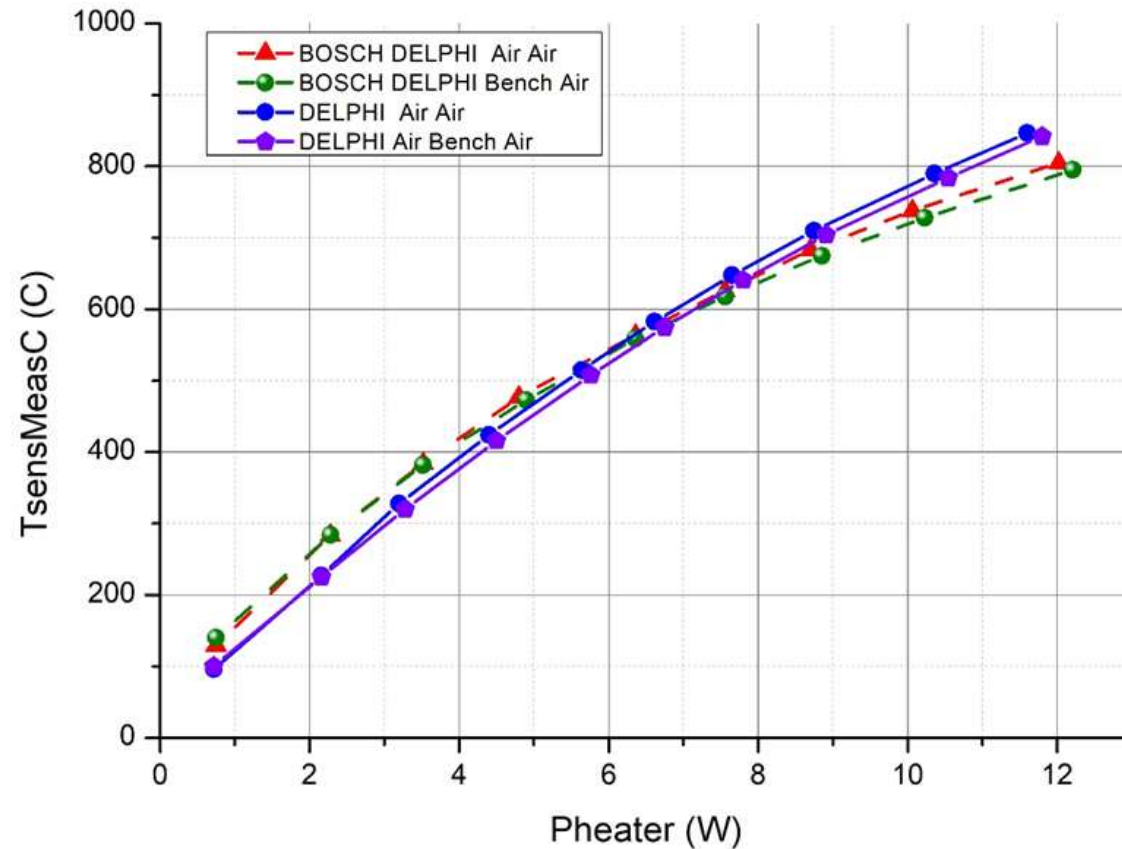


ДК DELPHI (с накачкой)
с установленной термопарой



ДК BOSCH (с атмосферной камерой)
с установленной термопарой
и подготовленным к монтажу
колпачком типа DELPHI

Измерение термопарой

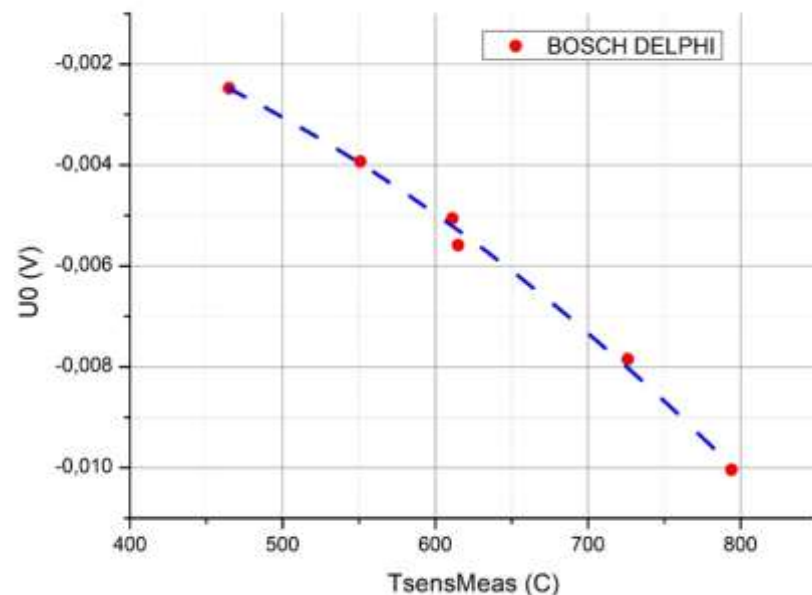


Сравнение BOSCH с колпачком DELPHI и DELPHI.

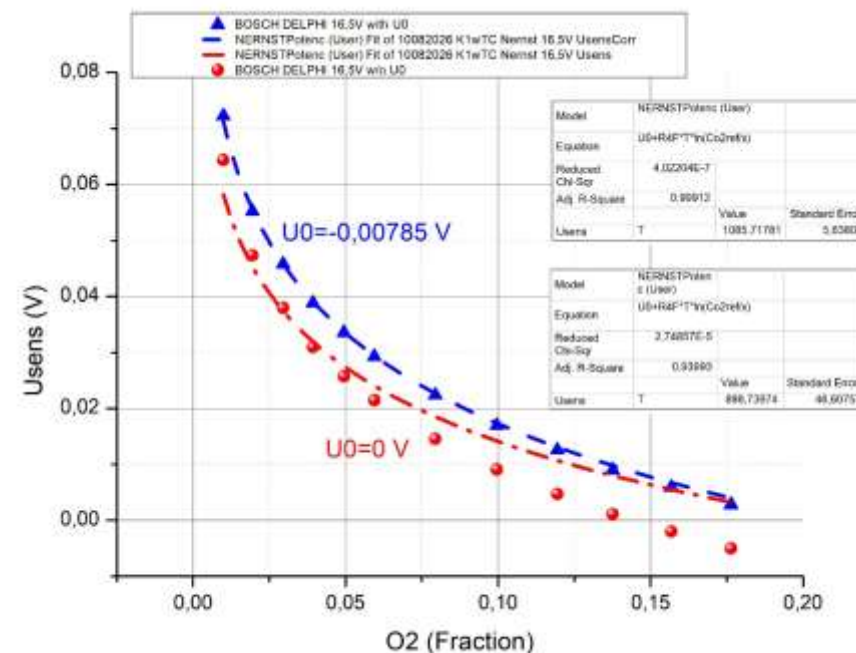
В рабочей зоне мощностей нагревателя, от 4 до 10 Вт, наблюдается хорошее совпадение измеренных температур. Это подтверждает предположение о подобии ЧЭ в для температур, развиваемых при нагреве собственными нагревателями. При мощности порядка 12 Вт и температуре 800°C наблюдаемое различие температур не более $\pm 3\%$ ($\pm 25^\circ\text{C}$).

Определение температуры на стенде со смесителем по уравнению Нернста

Аппроксимация методом наименьших квадратов (МНК)



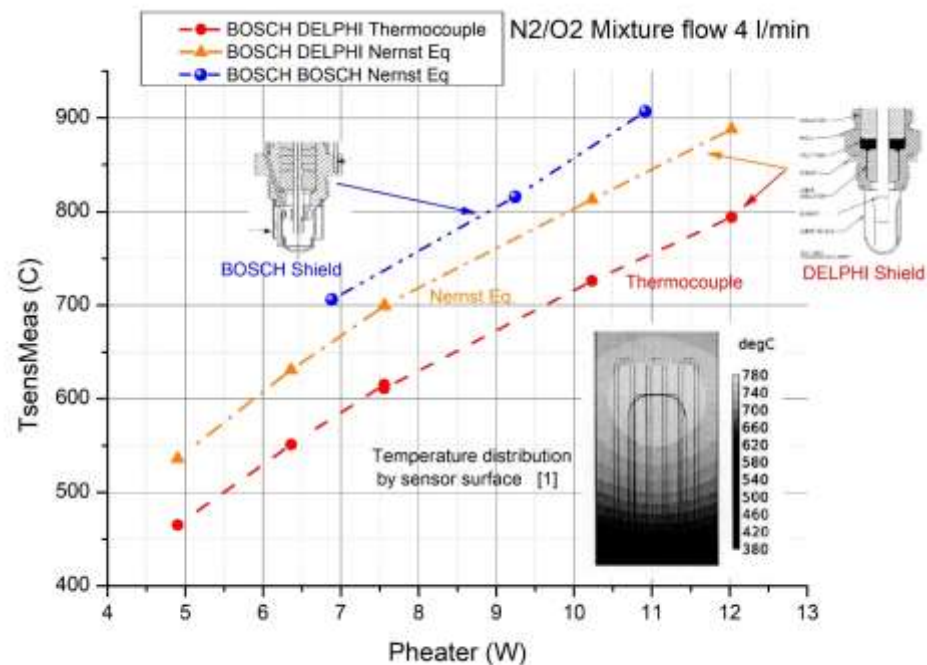
Зависимость U_0 от температуры чувствительного элемента



Аппроксимация МНК по уравнению Нернста с учетом и без учета разности потенциалов электродов U_0 .

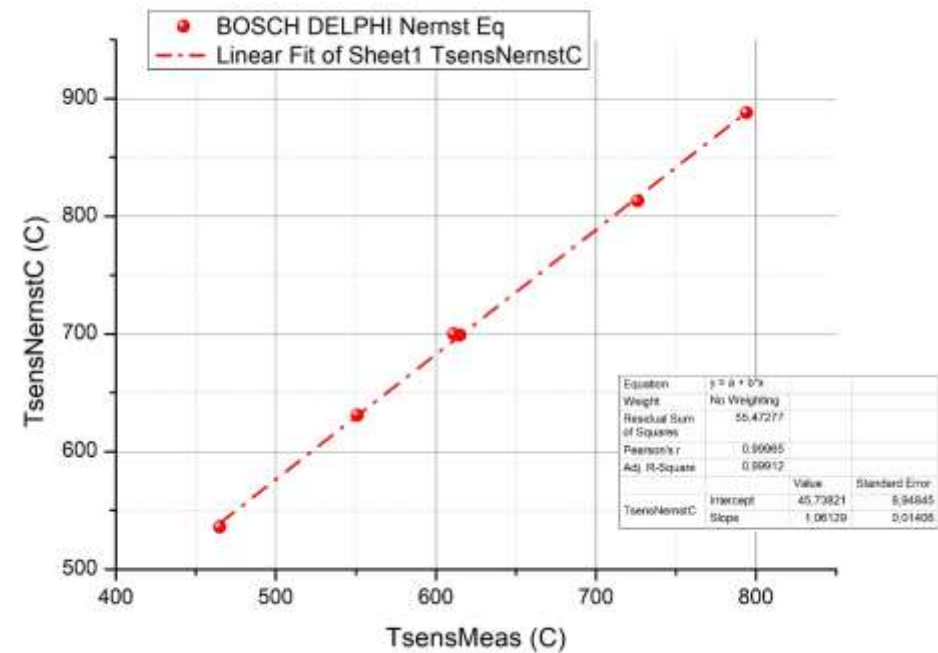
Учет разности потенциалов электродов U_0 оказывает большое влияние на качество аппроксимации МНК. При учете U_0 совпадение с экспериментальными данными составляет 99,9% при среднеквадратичном отклонении определенной этим способом температуры $\pm 5,6^\circ$, в то время как без учета - только 94% при отклонении $\pm 47^\circ$. Различие в определенном значении температуры с учетом U_0 и без составляет 200° , 1086 K против 887 K.

Сравнение результатов, полученных обоими методами определения температуры



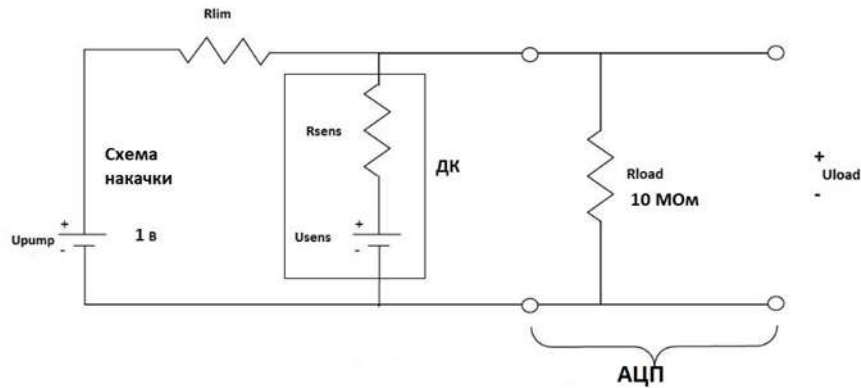
Зависимость температуры чувствительного элемента от мощности нагревателя

Красным- измерено термопарой для ДК с защитным колпачком DELPHI, Оранжевым- определено по МНК согласно уравнению Нернста для ДК с защитным колпачком DELPHI. Синим- определено по уравнению Нернста для ДК с защитным колпачком BOSCH.



Зависимость между измерением термопарой и определением температуры по уравнению Нернста

Оценка давления в камере эталонного газа ДК DELPHI с накачкой кислорода из ОГ



Эквивалентная схема измерительной цепи ДК с накачкой

$$U_{load} = U_0 + \eta + \frac{RT_{sens}}{4F} \ln\left(\frac{p_{O_2}^{ref}}{p_{O_2}^{exh}}\right)$$

η - перенапряжение, В

$$U'_{sens} = U_{load} - \eta = U_0 + \frac{RT_{sens}}{4F} \ln\left(\frac{p_{O_2}^{ref}}{p_{O_2}^{exh}}\right)$$

$$\text{Если } \eta < \frac{RT_{sens}}{4F}$$

$$\eta = I_{pump} * R_{sens}$$

Эквивалентное сопротивление R_{lim} и R_{load} :

$$R_{eq,lim/load} = \frac{R_{load}R_{lim}}{R_{load}+R_{lim}}$$

Эквивалентное сопротивление R_{sens} и R_{load} :

$$R_{eq,sens/load} = \frac{R_{load}R_{sens}}{R_{load}+R_{sens}}$$

Вклад напряжения накачки U_{pump} в измеряемое напряжение U_{load} :

$$U_{load,pump} = U_{pump} \frac{R_{eq,sens/load}}{R_{eq,sens/load}+R_{lim}}$$

Вклад напряжения ЭХЯ U_{sens} в измеряемое напряжение U_{load} :

$$U_{load,sens} = U_{sens} \frac{R_{eq,lim/load}}{R_{eq,lim/load}+R_{sens}}$$

Измеряемое нами напряжение U_{load} :

$$U_{load} = U_{load,pump} + U_{load,sens}$$

Ток накачки I_{pump} :

$$I_{pump} = \frac{U_{pump}-U_{load}}{R_{lim}}$$

$$U'_{sens} = (U_{load} - U_{load,pump}) \frac{R_{eq,lim/load} + R_{sens}}{R_{eq,lim/load}} = U_0 + \frac{RT_{sens}}{4F} \ln\left(\frac{p_{O_2}^{ref}}{p_{O_2}^{exh}}\right)$$

Измерение собственного сопротивления ДК

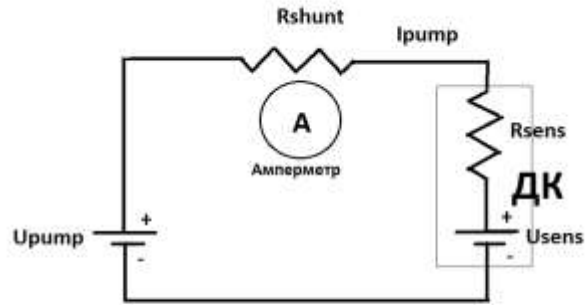
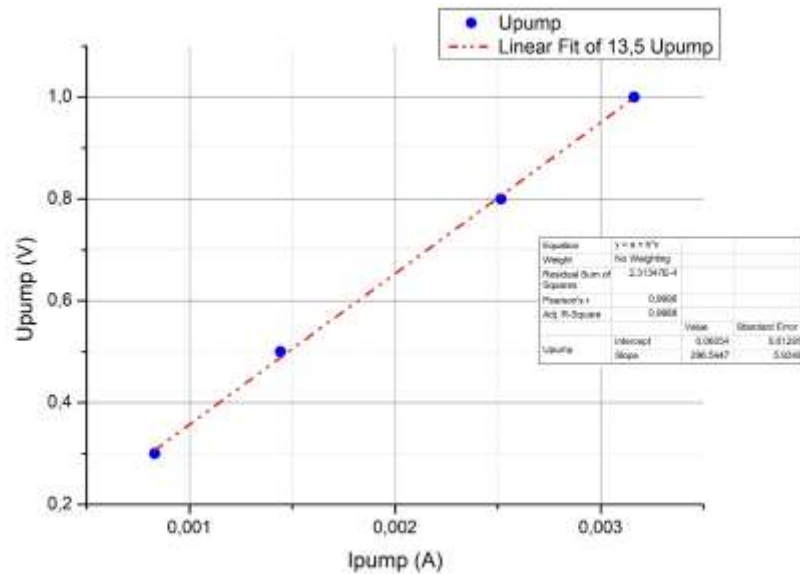


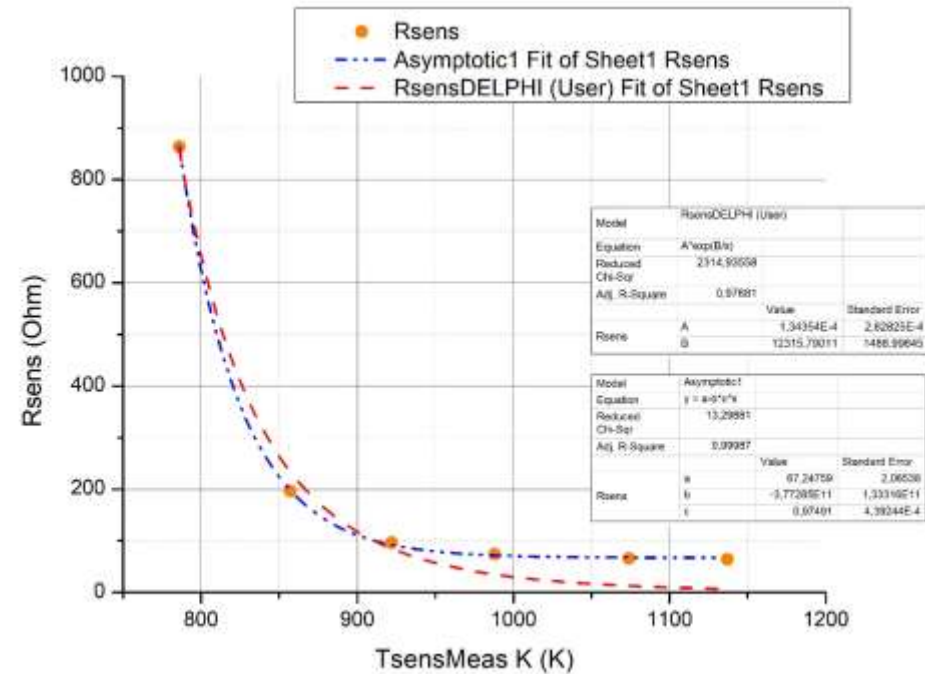
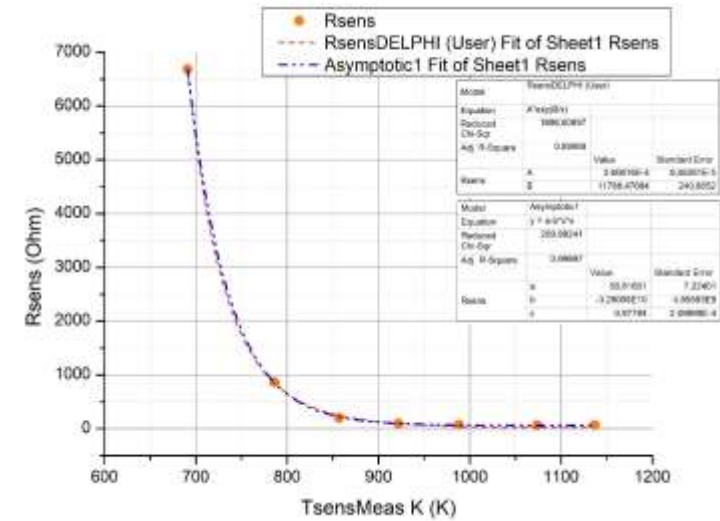
Схема измерения сопротивления ДК. Rshunt=100 Ом

$$Rsens = Ae^{\frac{B}{Tsens}}$$

$$Rsens = a - b * c^{Tsens}$$

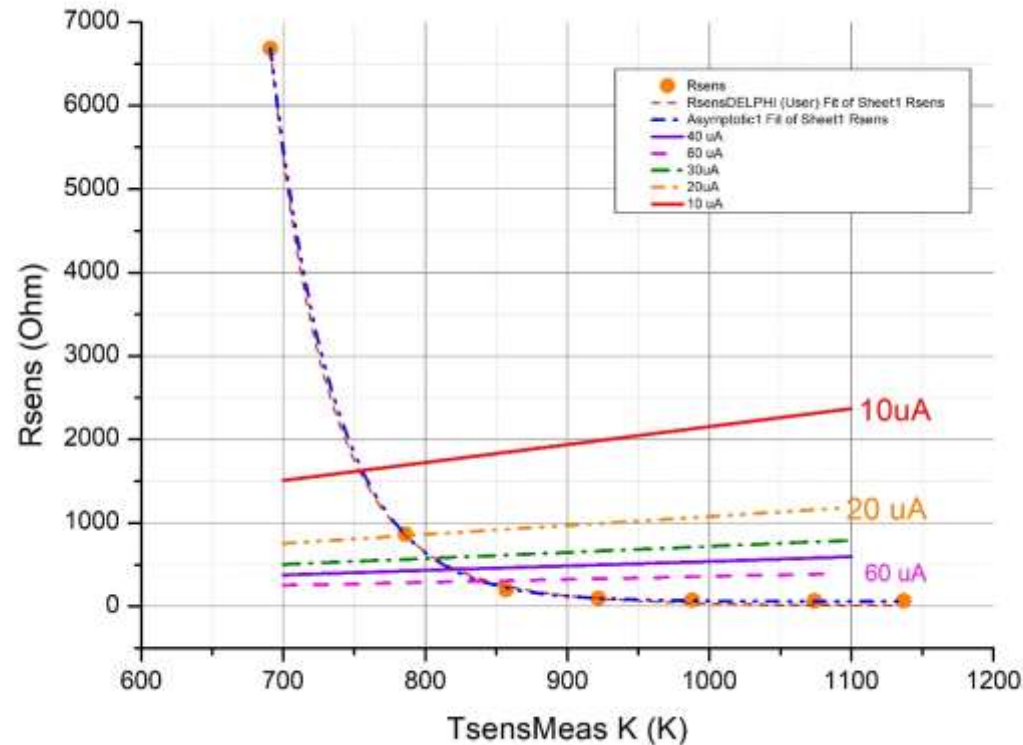


Вольт-амперная характеристика



Границы применимости $\eta < \frac{RT_{sens}}{4F}$

$$IR_{sens} < \frac{RT_{sens}}{4F}$$

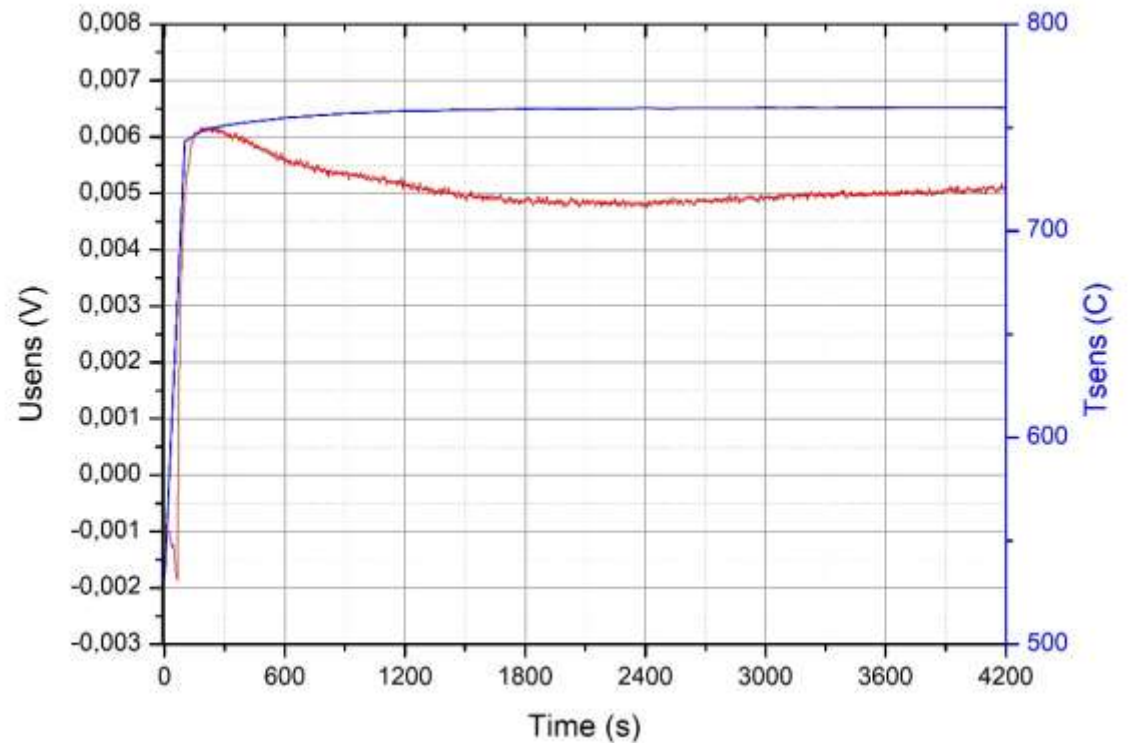


Соотношение $\eta < \frac{RT_{sens}}{4F}$ для всего рабочего температурного диапазона выполняется при токе накачки 10 мкА. Использовать такой ток рекомендует DELPHI для своих ДК этого типа.

Компания BOSCH для своего ДК с накачкой LSF Xfour рекомендует накачку 20 мкА, одновременно указывая, что необходимо поддерживать температуру 1053 K (780°C) при сопротивлении чувствительного элемента 220 Ом. Значение η при этом в 5 раз меньше предельного значения $\frac{RT_{sens}}{4F}$.

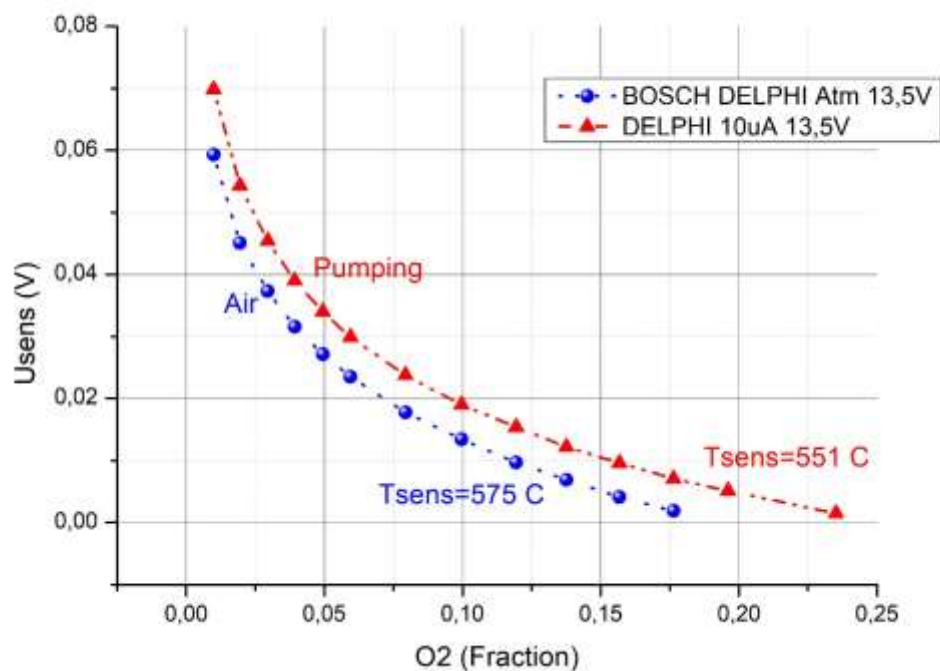
Определение давления кислорода в камере эталонного газа

1. ДК типа DELPHI с накачкой, снабженный термопарой на чувствительном элементе.
2. Опыты проводились с номинальной накачкой 10 мкА а также 30 и 60 мкА при напряжениях нагревателя 13,5, 16,5 и 18,5 В, что соответствовало температуре чувствительного элемента примерно 700, 800 и 900 °С. Датчик предварительно нагревался этим напряжением на воздухе в течение 1 часа с одновременной накачкой до установления относительно стабильного значения напряжения ДК. Поскольку существуют небольшие утечки из камеры, а напор кислородного насоса, согласно закону Фарадея, зависит только от тока накачки, это стабилизация напряжения показывает установившуюся накачку кислорода в камеру и стабильное давление кислорода в ней.
3. После этого этапа измерения велись по той-же самой методике, как и при измерении температуры на первом этапе. Диапазон заданных концентраций кислорода был расширен до 24 %, поскольку ожидалось давление кислорода, превышающее парциальное давление кислорода в атмосфере.

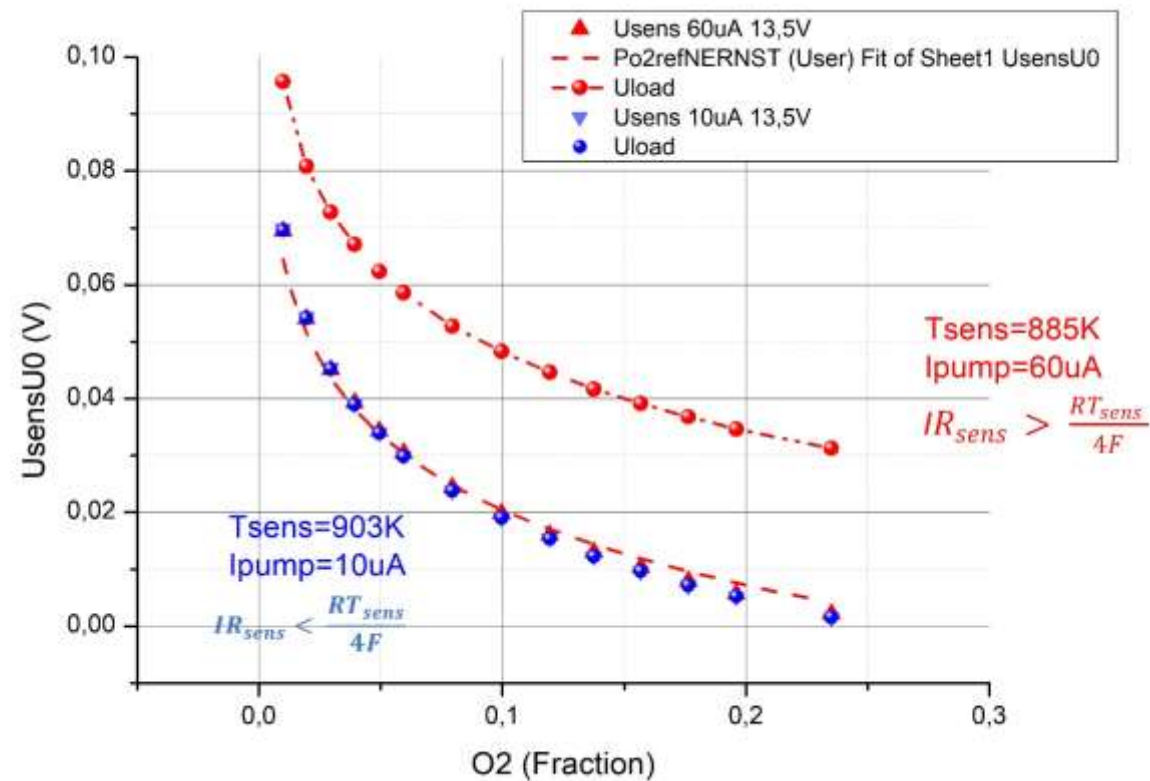


Напряжение ДК в процессе прогрева и накачки

Определение давления кислорода в камере эталонного газа

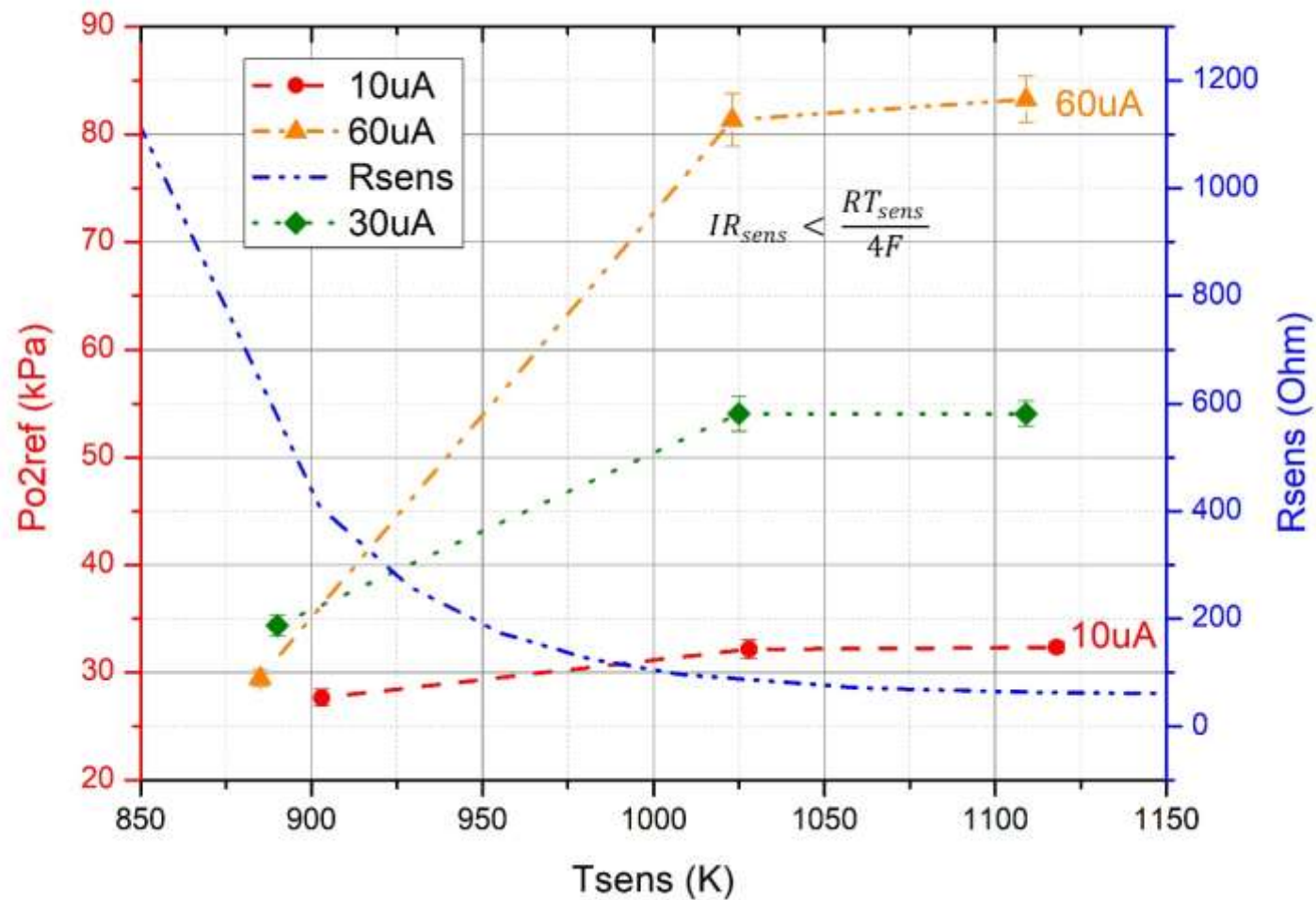


Сравнение сигнала атмосферного ДК и ДК с накачкой



Сравнение сигнала при разном токе накачки

Оценка давления кислорода в камере эталонного газа



Зависимость давления кислорода в камере эталонного газа от температуры и тока накачки

Результаты

1. На автомобильном ДК показаны возможности измерения температуры чувствительного элемента установленной термопарой.
2. Созданы модели температуры для стенда со смесителем газов.
3. Экспериментально получены данные о давлении кислорода в герметичной камере эталонного газа автомобильного ДК типа DELPHI при различных температурах и токах накачки.
4. На исследованных температурных режимах при рекомендованном токе накачки 10 мкА давление кислорода в камере эталонного газа такого ДК превышает парциальное давление кислорода в атмосфере примерно в 1.5 раза

Литература

1. d'Apolito, Luigi, and Hanchi Hong. "Electro-Thermo-Mechanical Modelling of Automotive Exhaust Sensors."

Engineering Research Express, vol. 3, no. 2, Apr. 2021, p. 025002, <https://doi.org/10.1088/2631-8695/abf2cd>.

2. R. Kuisell, P. Kikuchi, J. Mikutowicz Intellek OSP+ Oxygen Sensor ENGINEERING SPECIFICATION, DELPHI AUTOMOTIVE SYSTEMS, 2002

3. Г.А.Цирлина, В.И.Фельдман. Кинетика стадии переноса заряда. Курс лекций «Электрохимия и химия высоких энергий», МГУ, 2015, <https://www.elch.chem.msu.ru/rus/prg3.htm>

**СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ!**