

**ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДОРОДА В ПОТОКЕ
ТЕРМОКОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ****В.М. Бочарников****В.В. Володин****В.В. Голуб****Н.К. Денцель****А.Е. Ельянов**

vlad@ihed.ras.ru

golub@ihed.ras.ru

taliemarks@list.ru

ОИВТ РАН, Москва, Российская Федерация**Аннотация**

В современных тенденциях развития энергетики водород рассматривается в качестве перспективного энергоносителя. Однако, несмотря на его потенциал, существуют серьезные проблемы, связанные с безопасностью его использования, особенно в условиях утечек. Обоснована методика измерения концентрации водорода в потоке смеси водорода и воздуха с помощью сборки, состоящей из двух термокондуктометрических датчиков. Использование «открытого» датчика, находящегося вдоль потока, и «закрытого» проницаемой сеткой датчика в единой сборке позволило получить набор параметров для вычисления скорости потока смеси и концентрации водорода. Представлена конструкция измерительных сборок и приведены результаты градуировочных экспериментов в диапазоне значений абсолютного давления 0...5 атм, скорости потока 0...1,84 м/с и концентрации водорода 0...100 % (об.). Результаты экспериментов показывают, что, используя показания двух термокондуктометрических датчиков и датчика давления, можно однозначно получить значения скорости потока и концентрацию водорода в смеси с воздухом в месте расположения датчиков. Подобные сборки могут применяться как в лабораторных целях, так и для обнаружения утечек газовых смесей в аварийных случаях

Ключевые слова

Датчик водорода, водородная безопасность, смешение газов, термокондуктометрия, термоэлектроника

Поступила 28.10.2024

Принята 13.03.2025

© Автор(ы), 2025

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 23-29-00267)

Введение. Для проведения различных лабораторных экспериментов требуется смешение газовых смесей. Один из способов смешения — динамическое смешение [1, 2]. Как правило, смесь предварительно готовится в емкости без перемешивающих устройств [3, 4], при этом требуется контроль качества перемешивания по объему. Смешение газовых потоков также является самостоятельной задачей, необходимо измерение скорости и определение состава с высоким временным разрешением в широком диапазоне значений концентраций 0...100 % (об.). При отработке методики приготовления газовой смеси в баллоне без перемешивающего устройства возникла задача измерения в течение суток и более с характерным временем изменения параметров (50 мс и более).

Важным применением средств измерения скорости течения и концентрации водорода в потоке является обеспечение безопасности использования сжатого водорода. В связи с высокой скоростью истечения из сосудов под давлением взрывоопасные концентрации могут образовываться за короткое время. Для предотвращения аварий на существующих и перспективных водородных объектах требуется мониторинг наличия водорода в контрольных точках со временем реакции доли секунды.

Конструкция датчиков водорода зависит от области их применения. Для задач безопасности наиболее часто используют датчики для измерения малых концентраций (до 1 % (об.)). Здесь и далее приведены максимальные измеряемые концентрации.

Электрохимические датчики применяют, когда требуется высокая чувствительность к содержанию водорода и высокая селективность, позволяющая исключить влияние газов с похожими теплофизическими характеристиками. Пределы измерения у электрохимических датчиков обычно составляют 0,01...1,0 % (об.) водорода [5]. Датчики из платины и палладия выполняют в виде тонких слоев, получаемых химическим осаждением или напылением. Диапазон измерения концентрации водорода таких датчиков зависит от толщины слоя и схемы включения. Например, в [6] датчик из наночастиц платины и палладия на пленке из оксида олова использован для определения концентрации до 50 ppm (0,005 % (об.)). Датчик из микронного слоя платины на подложке из оксида титана исследован в [7], вследствие низкой температуры чувствительного элемента (50 °С) предельная измеряемая концентрация водорода составляет до 20 % (об.). Результат исследования датчиков, которые определяют водород при восстановлении оксида цинка, приведен в [8]. Повышение концентрации водорода над чувствительным слоем меняет химический состав поверхности,

что в свою очередь приводит к изменению электрического сопротивления датчика. Такие датчики надежно измеряют концентрации водорода до 0,05 % (об.). Такие же пределы измерений у датчиков с использованием композита NiSe₂-rGO [9]. В отличие от остальных конструкций показания такого датчика практически не зависят от относительной влажности газа. Результаты испытаний датчиков на основе антимонида теллура на подложке из полистирола приведены в [10]. Время установления напряжения этого датчика 3 с, что почти в 30 раз меньше, чем у датчиков на подложке из кремния или оксида алюминия. Максимальное измеряемое значение концентрации водорода таких датчиков составляет 7 % (об.). Высокая селективность электрохимических датчиков позволяет применять их не только для детектирования простых веществ, но и для обнаружения сложных органических соединений [11]. Применение электрохимических датчиков влияет на структуру течения, создавая след за нагретым объектом, так как температура чувствительного элемента составляет 500 °С.

Оптические датчики позволяют измерять концентрации водорода до значений 4 % (об.) [12]. Такие датчики отличаются низкой стабильностью измерений. Оптический датчик, описанный в [13], работает в ИК-диапазоне излучения. Источники излучения меняют параметры со временем эксплуатации. Для внесения поправок при изменении параметров источников излучения с течением времени в датчике используется фототранзистор. Этот датчик предназначен для измерения концентрации метана в смеси с воздухом. Концентрационный предел измерения метана не превышает 2,2 %.

Принцип действия акустических датчиков основан на зависимости скорости звука от состава газовой смеси. Типовой акустический датчик состоит из излучателя и микрофона. Датчик с дополнительным резонатором, позволяющий измерять концентрацию водорода до 2 % (об.), описан в [14]. Следует отметить, что представленный в [14] датчик имеет диаметр 50 мм и не может быть использован для контроля смешения в объемах единицы или десятки литров. Акустический датчик из нанопроводников, выполненных из палладия и меди, описан в [15]. Характерный размер датчика 5 мм, предельная измеряемая концентрация водорода в смесях не превышает 4,5 % (об.).

Перечисленные датчики не могут быть использованы для контроля смешения водорода с воздухом при смешении горючих смесей с содержанием водорода 0...100 % (об.).

Для измерения концентрации водорода в диапазоне значений 0...100 % (об.) целесообразно использовать термокондуктометрические датчики как охватывающие самый широкий диапазон значений концентраций. Исходя из принципа измерений селективность датчиков зависит от температуропроводности входящих в состав смеси газов, значения которых у водорода и воздуха отличаются более чем на порядок. На перенос теплоты также влияют скорость потока и давление смеси.

В литературе описаны различные конструкции термокондуктометрических датчиков, отличающихся материалом исполнения, габаритами и рабочей температурой. Применение нанотрубок из оксида титана с напылением платины, палладия, золота или серебра в качестве датчиков концентрации водорода до 5 % (об.) рассмотрено в [16]. Высокая чувствительность достигается нагревом водородно-воздушной смеси. Влияние понижения температуры чувствительного элемента на работоспособность датчика в [16] не приведено. Датчик, состоящий из платинового нагревателя и термометра, описан в [17], его применяют для измерения концентрации метана 0...100 % (об.). Температура чувствительного элемента составляет примерно 150 °С, что достаточно безопасно. Чувствительный элемент установлен в одном корпусе с контроллером нагревателя и терморезистора диаметром 32 мм. При исследовании течений газа в установках малого объема требуются более компактные датчики.

Результаты анализа литературы показывают, что измерение концентрации водорода в широких пределах может быть реализовано только с использованием термокондуктометрических датчиков. Решения, представленные в литературе, не подходят для контроля смещения водорода с воздухом по температуре или размерам.

Цель работы — экспериментально исследовать возможность использования компактных сборок из серийных термокондуктометрических датчиков с рабочей температурой 150 °С для измерения скорости течения газа и концентрации водорода в смешивающихся потоках водорода и воздуха.

Экспериментальная установка и методы диагностики. Каждая измерительная сборка состояла из двух термокондуктометрических датчиков IST FS7 [18] (рис. 1). Датчик включает в себя нагревательный элемент и терморезистор, объединенные в одном корпусе. Из соотношения мощности нагревателя и температуры чувствительного элемента вычисляется коэффициент передачи теплоты, который зависит от скорости потока вокруг датчика, давления и состава газа. Детально принцип работы и особенности измерений описаны в [19, 20].

Датчики объединены в сборки по два: 1) «открытый», когда чувствительный элемент датчика находится непосредственно в потоке газа; 2) «закрытый» проницаемым колпачком, снижающим скорость обтекания чувствительного элемента, но не изолирующим датчик от окружающего газа (рис. 2). Диаметр корпуса сборки 12 мм, область измерения 5 мм.

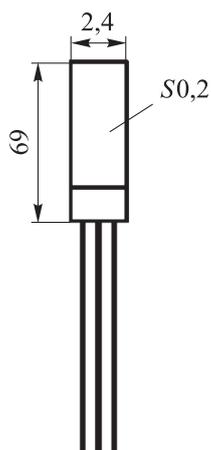


Рис. 1. Термокондуктометрический датчик IST FS7

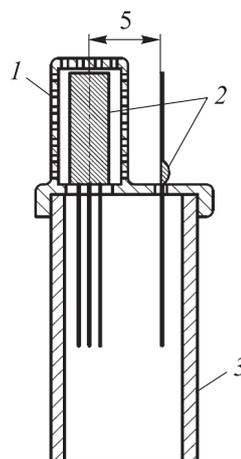


Рис. 2. Схема сборки из двух датчиков:

- 1 — перфорированный колпачок;
- 2 — термокондуктометрические датчики;
- 3 — корпус сборки

Каждая сборка подключалась к двухканальному блоку согласования, собранному по схеме, которая рекомендована производителем [18]. Блок согласования обеспечивает режим работы в качестве анемометра постоянной температуры и состоит из простой цепи обратной связи для регулировки температуры нагревателя, поскольку изменение параметров газа, окружающего датчик, изменяет потерю тепловой энергии нагревателем. Таким образом, мощность охлаждения является функцией давления, состава и скорости смеси, обтекающей датчик. Мощность потерь теплоты преобразуется в выходной сигнал напряжения с использованием мостовой схемы, который регистрируется осциллографом. Перфорированный колпачок на одном из датчиков также влияет на потери теплоты, но практически исключает влияние скорости потока смеси. Градуировка проводилась на двух экспериментальных установках (рис. 3).

На первой установке проведена градуировка измерительных сборок по давлению и содержанию водорода (рис. 3, а). Установка представляет

собой цилиндрическую емкость объемом 3 л с механическим смесителем. В боковой стенке емкости выполнено установочное отверстие для размещения сборки датчиков. К емкости подведены магистрали вакуумирования и ввода газов. Внутри емкости установлен бесщеточный вентилятор постоянного тока для перемешивания газов. Установка аналогична используемым для градуировки датчиков концентрации газа. Показания напряжения, соответствующие разным давлениям и составам смеси, сняты после полной остановки всех потоков в емкости, так как вычисление скоростей потоков при работе вентилятора представляет сложную задачу. Зависимость напряжения выходных сигналов от скорости потока снята на отдельной установке.

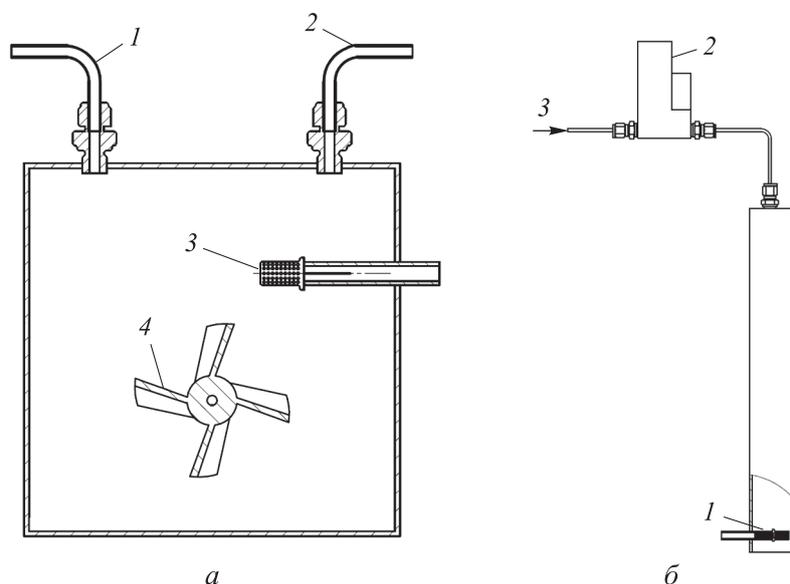


Рис. 3. Схемы экспериментальных установок для градуировки:

а — установка с механическим смесителем для градуировки сборок датчиков по давлению и содержанию водорода в смеси (*1* — ввод водорода; *2* — ввод воздуха; *3* — измерительная сборка; *4* — перемешивающий вентилятор); *б* — канал круглого сечения с контроллером расхода газа для градуировки сборок датчиков по скорости газовой смеси (*1* — измерительная сборка; *2* — контроллер расхода газа; *3* — ввод газовой смеси)

Установка, на которой выполняли эксперименты по влиянию скорости газовой смеси на выходное напряжение измерительных сборок (рис. 3, б), представляет собой вертикальный канал. Диаметр канала 24 мм, длина 400 мм. Измерительные сборки для градуировки установлены в нижней части канала. В верхней стенке канала расположен инжектор газа. С использо-

ванием контроллера расхода *Bronkhorst F201A/V* через инжектор подавали предварительно приготовленную водородно-воздушную смесь. В отличие от установок, традиционно применяющихся для градуировки датчиков концентрации газа, эта установка открыта с одного конца, работает при атмосферном давлении и позволяет проводить градуировку в потоке. По сравнению с типовыми аэродинамическими трубами сечение канала установки меньше в 100 раз и более. Это связано с тем, что в установке создается поток водородно-воздушной смеси, объем которой ограничен (15 л на эксперимент) размерами смесительной емкости, а также требованиями безопасности.

Результаты. При градуировке сборок по давлению емкость с установленной измерительной сборкой вакуумировали до давления 10 Па форвакуумным насосом *VALUE VRD-4*. После этого емкость заполняли воздухом до атмосферного давления. Через 10 мин после окончания заполнения подстроечным резистором на усилителе выставляли выходное напряжение датчика 3,6 В. Затем емкость заново вакуумировали и заполняли водородом или воздухом до давления 6 атм (абс.). После остановки потоков в емкости давление ступенчато снижали до 0,5 атм (абс.). В этой серии экспериментов исследована реакция датчика на отклонения опорного напряжения.

Зависимости напряжения датчиков от давления чистых воздуха и водорода приведены на рис. 4. В различных сериях экспериментов менялось значение опорного напряжения $U_b = 3,54...3,66$ В. При малом изменении значения опорного напряжения на такое же значение изменяется напряжение датчика при изменении давления и состава окружающей смеси.

Зависимости напряжения «открытого» и «закрытого» датчиков от давления при нахождении их в чистом воздухе аппроксимируются формулами:

$$U_{vqB} = U_{v0} - 0,17 + 0,163P^{0,6}; \quad U_{cqB} = U_{c0} - 0,06 + 0,043P^{0,6}.$$

Зависимости напряжения «открытого» и «закрытого» датчиков от давления при нахождении их в чистом водороде аппроксимируются формулами:

$$U_{vqH_2} = U_{v0} + 1,51 + 0,098P^{0,6}; \quad U_{cqH_2} = U_{v0} + 1,39 + 0,064P^{0,6}.$$

Здесь P — абсолютное давление.

Контроллер поддерживает постоянную температуру нагревательного элемента, которая определяется балансом мощности нагревательного элемента и мощности потерь теплоты в окружающий газ. Вокруг «откры-

того» датчика образуется конвективный поток, т. е. мощность потерь выше, чем от «закрытого» датчика. Коэффициент теплопроводности водорода примерно в 8 раз выше коэффициента теплопроводности воздуха, при этом напряжение при атмосферном давлении «открытого» датчика повышается в 1,45 раза, что соответствует увеличению мощности нагревателя в 2,1 раза. Различие вызвано тепловым сопротивлением изолирующего слоя стекла толщиной 0,1 мм между нагревательным элементом и газом. Напряжение и мощность потерь теплоты «закрытых» датчиков ниже, чем у «открытых», в результате сопротивления перфорированного колпачка конвективному и молекулярному теплопереносу.

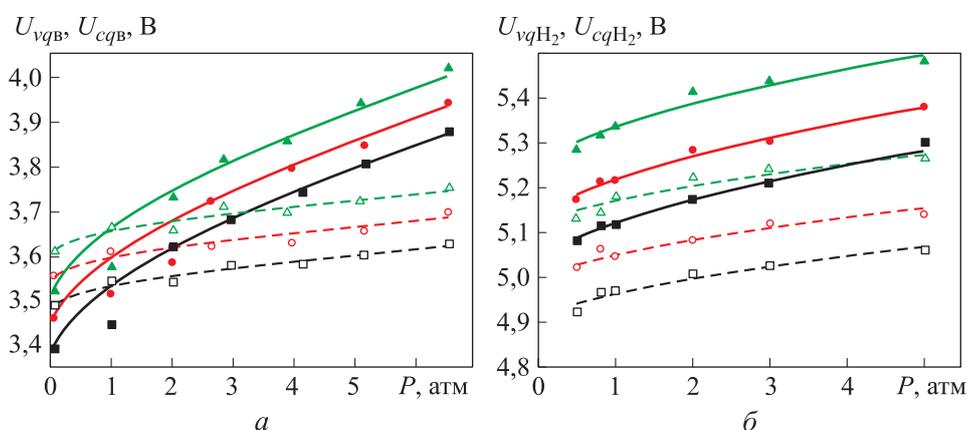


Рис. 4. Зависимости выходного напряжения «открытого» (O) и «закрытого» (C) датчиков от давления чистых воздуха (а) и водорода (б) при значениях опорного напряжения 3,54 (O ■, C □), 3,6 (O •, C ◦) и 3,66 В (O ▲, C △)

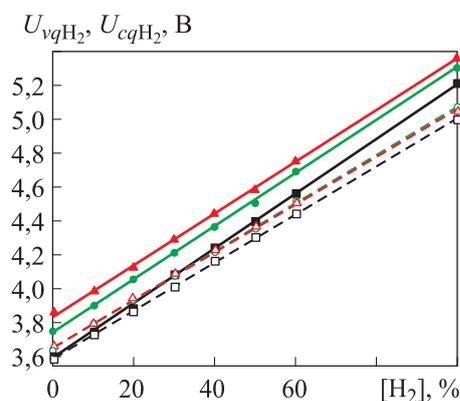
Эксперименты по градуировке сборок по концентрации водорода в смеси выполнены на установке, показанной на рис. 3, а. Перемешивание осуществлено с использованием вентилятора диаметром 44 мм при скорости вращения 1500 мин^{-1} в течение 20 мин. После остановки вентилятора зафиксировано стабильное значение напряжения, регистрируемое на выходе датчика. Зависимость выходного напряжения датчиков от концентрации водорода в смеси при различных значениях давления показана на рис. 5.

Значения напряжения при различных концентрациях водорода в смеси приведены на рис. 6. Полученные данные показывают линейную зависимость выходного напряжения от концентрации водорода в смеси, поэтому в неподвижной смеси показания датчиков можно записать следующим образом:

$$U_{vq} = U_{v0} - 0,17 + [1,68 [H_2] + (16,3 - 0,065 [H_2])P^{0,6}] / 100; \quad (1)$$

$$U_{cq} = U_{c0} - 0,06 + [1,45 [H_2] + (4,3 + 0,0521 [H_2])P^{0,6}] / 100. \quad (2)$$

Рис. 5. Зависимости выходного напряжения «открытого» (О) и «закрытого» (С) датчиков от содержания водорода в смеси при значениях давления 1 (О ■, С □), 3 (О ●, С ○) и 5 атм (О ▲, С △)



В общем случае коэффициент теплопроводности бинарных газовых смесей не является линейной функцией от концентрации, но при большой разности молекулярных масс и коэффициентов теплопроводности, а также высокой доле конвективного теплопереноса степенная зависимость хорошо описывает промежуточные режимы.

Градуировка измерительных сборок по скорости газовой смеси с различным содержанием водорода проведена с использованием установки, показанной на рис. 3, б.

В смесителе (см. рис. 3, а) получена водородно-воздушная смесь с избыточным давлением 5 атм. Расход смеси задан с помощью контроллера *Bronkhorst F201A/V*. Выходное напряжение датчиков и объемный расход смеси зарегистрирован на осциллографе *Rigol DS 1054Z* и усреднен на тестовом отрезке времени. Тестовый отрезок начинался после прохождения объема газа 5 л и заканчивался с началом снижения объемного расхода смеси. Зависимости разности отношения квадратов напряжения на выходе «открытого» и «закрытого» датчиков и единицы от скорости потока для различных смесей представлены на рис. 6.

Напряжение на выходе датчика, согласно инструкции производителя [13], зависит от скорости потока $U = U_q \sqrt{1 + kv^n}$, где U_q — напряжение, которое выдает датчик в смеси, но без потока; k — коэффициент пропорциональности скорости; v — скорость потока; n — показатель степенной зависимости.

Для сборки из двух близко расположенных датчиков значения выходного напряжения можно представить в виде

$$U_v = U_{vq} \sqrt{1 + kv^n};$$

$$U_c = U_{cq} \sqrt{1 + kv^n}.$$

Здесь U_{vq} , U_{cq} — напряжение при нулевой скорости потока, которое зависит только от состава и давления окружающего газа; k_v , k_c — коэффициенты пропорциональности скорости для «открытого» и «закрытого» датчиков, которые зависят от окружения датчика (свободное обтекание или загроможденное пространство).

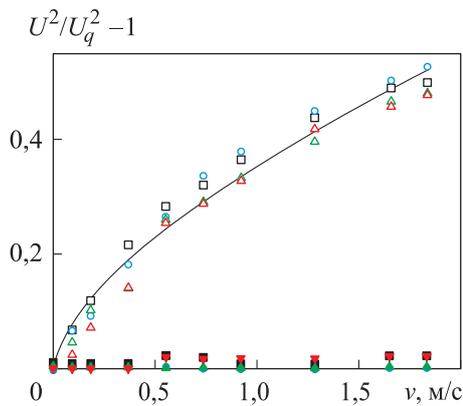


Рис. 6. Зависимости $U^2/U_q^2 - 1$ «открытого» (O) и «закрытого» (C) датчиков от скорости потока чистых воздуха, водорода и водородно-воздушных смесей с содержанием водорода 0 (O □, C ■), 10 (O ◊, C ●), 50 (O △, C ▲) и 100 % (об.) (O ▽, C ▾)

Результаты градуировки по скорости удобно представить в виде функции отношения выходного напряжения датчика в потоке к напряжению без потока $U^2/U_q^2 - 1 = kv^n$, где U , U_q — сигналы датчиков в потоке и неподвижном газе.

Выходное напряжение «закрытого» датчика (см. рис. 6) не зависит от скорости потока, т. е. перфорированный колпачок исключает дополнительные конвективные потоки, связанные со скоростью измеряемой смеси. Выходное напряжение этого датчика может быть использовано для вычисления концентрации водорода

$$[H_2] = \frac{100(U_c - U_{c0}) + 6 - 4,3P^{0,6}}{1,45 + 0,021P^{0,6}}. \tag{3}$$

Сигнал «открытого» датчика усиливается с возрастанием скорости смеси, что свидетельствует об увеличении роли конвективных потерь теплоты. Зависимость величины $U_v^2/U_{vq}^2 - 1$ при всех проверенных экспериментально концентрациях водорода в потоке смеси достаточно точно аппроксимируется уравнением

$$\frac{U_v^2}{U_{vq}^2} - 1 = 0,353\nu^{0,64}. \quad (4)$$

Полученный показатель степени 0,64 близок к значениям 0,5–0,8 для зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса при вынужденной конвекции в трубах при ламинарном и турбулентном течениях. Отличие может быть объяснено переходным режимом обтекания датчика в исследуемом диапазоне скоростей.

Из уравнения (4) можно вычислить скорость потока смеси:

$$\nu = 5,07 \left(\frac{U_v^2}{U_{vq}^2} - 1 \right)^{1,56},$$

где U_v — измеренное выходное напряжение «открытого» датчика; U_{vq} — значение, рассчитанное из (1), (2) с использованием значения давления и вычисленной по (3) концентрации водорода в смеси.

Заключение. Разработана новая методика, основанная на использовании пары термокондуктометрических датчиков для измерения скорости потока водородно-воздушной смеси и концентрации водорода в потоке. В процессе исследования проведены градуировочные эксперименты, охватывающие диапазон значений концентрации водорода 0...100 % (об.) и скоростей потока газа 0...1,84 м/с. Кроме того, выполнены эксперименты, направленные на изучение влияния давления водородно-воздушной смеси в диапазоне значений 0,1...6,0 атм на выходное напряжение датчиков.

Показано влияние теплопроводности окружающего газа и конвективного переноса на потери теплоты от нагревательного элемента. Из аппроксимации экспериментальных результатов определен показатель степени зависимости мощности потерь теплоты от скорости потока газа и показано его соответствие законам конвективного теплопереноса.

На основе полученных данных построены эмпирические зависимости, позволяющие определять скорость потока газа и концентрацию водорода в нем при заданном статическом давлении в емкости.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Тупоносов Ф.В., Артемов В.И., Яньков Г.Г. и др. Численный анализ эффективности смешения топливных газов в тройниковом соединении при изменениях диаметра боковой трубы и угла ее врезки. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, № 3 (114), с. 115–132. EDN: SEFVZP

- [2] Колесниченко И.Н., Платонов И.А., Новикова Е.А. и др. Получение газовых смесей известного состава динамическими методами. *Сорбционные и хроматографические процессы*, 2017, т. 17, № 3, с. 378–387.
DOI: <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2017.17/391>
- [3] Кулешов Ф.С., Головастов С.В., Бивол Г.Ю. Влияние пористой полиуретановой перегородки на гидравлические характеристики потока и на распространение фронта пламени в открытом канале. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2022, № 3 (102), с. 110–123.
DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-3-110-123>
- [4] Володин В.В., Голуб В.В., Ельянов А.Е. и др. Распространение водородно-воздушного пламени в канале с теплопоглощающим покрытием. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2022, № 5 (104), с. 31–44.
DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-5-31-44>
- [5] Buttner W.J., Post M.B., Burgess R., et al. An overview of hydrogen safety sensors and requirements. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2011, vol. 36, iss. 3, pp. 2462–2470.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.176>
- [6] Li G., Du K., Wang X., et al. Pd nanoparticles decorated SnO₂ ultrathin nanosheets for highly sensitive H₂ sensor: experimental and theoretical studies. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2024, vol. 50A, pp. 761–771. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.263>
- [7] Roland U., Hebestreit A., Taoussanis A., et al. Cost-effective selective hydrogen sensor based on the combination of catalytic spillover effect and impedance measurement. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2023, vol. 48, iss. 96, pp. 37550–37562.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.302>
- [8] Zhang H., Zhu H., Su H., et al. High performance potentiometric hydrogen sensor based on ZnO porous cage sensing electrode. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2024, vol. 54, pp. 1461–1468. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.260>
- [9] Motora K.G., Dileepkumar V.G., Wu C.-M., et al. Highly efficient and stable NiSe₂-rGO composite-based room temperature hydrogen gas sensor. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2024, vol. 50A, pp. 1174–1183.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.018>
- [10] Kim S., Song Y., Ahn H.-J., et al. Ultrafast response/recovery and high sensitivity of a hydrogen gas sensor at room temperature based on electrochemically deposited Sb₂Te₃/polystyrene composite film. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2024, vol. 50, part A, pp. 959–972. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.092>
- [11] Петренко Е.М., Семенова В.А. Электрохимический мультисенсорный экспресс-анализ алкалоидов в формате «электронный язык». *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2022, № 6 (105), с. 144–156.
DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-6-144-156>
- [12] Downes F., Taylor C.M. Theoretical investigation of a multi-channel optical fiber surface plasmon resonance hydrogen sensor. *Opt. Commun.*, 2021, vol. 490, art. 126916.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.126916>

- [13] Конюхов А.И. Бездисперсионный оптический датчик газа с временным разделением опорного и измерительного сигналов. *Приборы и техника эксперимента*, 2023, № 2, с. 115–121. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032816223010184>
- [14] Алферов В.Н., Васильев Д.А. Акустический газоанализатор. *Приборы и техника эксперимента*, 2020, № 5, с. 148–152. EDN: AQPOFI. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032816220050080>
- [15] Wang W., Liu X., Mei S., et al. Development of a Pd/Cu nanowires coated SAW hydrogen gas sensor with fast response and recovery. *Sens. Actuators B: Chem.*, 2019, vol. 287, pp. 157–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.02.047>
- [16] Tasyurek L.B., Isik E., Isik I., et al. Enhancing the performance of TiO₂ nanotube-based hydrogen sensors through crystal structure and metal electrode. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2024, vol. 54, pp. 678–690. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.202>
- [17] Vasiliev A., Shakhnovich I., Samotaev N., et al. Intellectual thermoconductometric unit based on aerosol printed ceramic MEMS sensor for the measurement of natural gas composition. *Proceedings*, 2018, vol. 2, iss. 13, art. 736. DOI: <https://doi.org/10.3390/proceedings2130736>
- [18] Thermal mass flow sensor FS7. Application note. Switzerland, Ebnet-Kappel, IST, 2021.
- [19] Sazhin O. Novel mass air flow meter for automobile industry based on thermal flow microsensor. I. Analytical model and microsensor. *Flow Meas. Instrum.*, 2013, vol. 30, pp. 60–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2013.01.006>
- [20] Tang Z., Yang Q., Yu Ch., et al. Measurement of gas-liquid flows with the combination of thermal sensors and conductance sensor. *Flow Meas. Instrum.*, 2023, vol. 93, art. 102429. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102429>

Бочарников Владимир Максимович — научный сотрудник лаборатории физической газовой динамики ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2).

Володин Владислав Владимирович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории физической газовой динамики ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2).

Голуб Виктор Владимирович — д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории физической газовой динамики ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2).

Денцель Наталия Константиновна — стажер-исследователь лаборатории физической газовой динамики ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2).

Ельянов Артем Евгеньевич — научный сотрудник лаборатории физической газовой динамики ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бочарников В.М., Володин В.В., Голуб В.В. и др. Измерение концентрации водорода в потоке термокондуктометрическими датчиками. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2025, № 5 (122), с. 55–71. EDN: UIQXRE

**HYDROGEN CONCENTRATION MEASUREMENT
IN A FLOW USING THE THERMOCONDUCTIVITY SENSORS**

V.M. Bocharnikov

V.V. Volodin

V.V. Golub

N.K. Dentsel

A.E. Elyanov

vlad@ihed.ras.ru

golub@ihed.ras.ru

taliemarks@list.ru

JIHT RAS, Moscow, Russian Federation

Abstract

The current trends in power development consider hydrogen as a promising power carrier. However, despite its potential, serious safety concerns remain, particularly in the presence of leaks. The paper substantiates a method for measuring hydrogen concentration in the hydrogen-air mixture flow using an assembly that consists of two thermoconductivity sensors. Introduction of the “open” sensor positioned along the flow and the “closed” sensor with a permeable mesh in a single assembly makes it possible to obtain a set of parameters for computing the mixture flow rate and the hydrogen concentration. The paper presents design of the measuring assemblies and provides results of the calibration experiments over an absolute pressure range of 0 to 5 atm, flow velocity of 0 to 1.84 m/s, and hydrogen concentration of 0 to 100 % (vol.). Experimental results demonstrate that using readings from the two thermoconductivity sensors and the pressure sensor makes it possible to unambiguously determine values of the hydrogen flow rate and concentration in the air-hydrogen mixture at the sensors’ position. Such assemblies could be applied both for the laboratory purposes and in detecting gas mixture leaks in the emergencies

Keywords

Hydrogen sensor, hydrogen safety, gas mixing, thermoconductivity, thermoelectronics

Received 28.10.2024

Accepted 13.03.2025

© Author(s), 2025

*The work was financially supported by the Russian Science Foundation
(grant no. 23-29-00267)*

REFERENCES

- [1] Tuponosov F.V., Artemov V.I., Yankov G.G., et al. Numerical analysis of efficiency of mixing the fuel gases in a T-joint with the lateral pipe diameter and its insertion angle alteration. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2024, no. 3 (114), pp. 115–132 (in Russ.). EDN: SEFVZP
- [2] Kolesnichenko I.N., Platonov I.A., Novikova E.A., et al. Gas mixtures of the known composition by dynamic methods. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 378–387 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2017.17/391>
- [3] Kuleshov F.S., Golovastov S.V., Bivol G.Yu. Influence of a porous polyurethane partition on hydraulic characteristics of the flow and on flame front propagation in an open channel. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2022, no. 3 (102), pp. 110–123 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-3-110-123>
- [4] Volodin V.V., Golub V.V., Elyanov A.E., et al. Hydrogen-air flame propagation in a tube with heat-absorbing lining. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2022, no. 5 (104), pp. 31–44 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-5-31-44>
- [5] Buttner W.J., Post M.B., Burgess R., et al. An overview of hydrogen safety sensors and requirements. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2011, vol. 36, iss. 3, pp. 2462–2470.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.176>
- [6] Li G., Du K., Wang X., et al. Pd nanoparticles decorated SnO₂ ultrathin nanosheets for highly sensitive H₂ sensor: experimental and theoretical studies. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2024, vol. 50A, pp. 761–771. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.263>
- [7] Roland U., Hebestreit A., Taoussanis A., et al. Cost-effective selective hydrogen sensor based on the combination of catalytic spillover effect and impedance measurement. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2023, vol. 48, iss. 96, pp. 37550–37562.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.302>
- [8] Zhang H., Zhu H., Su H., et al. High performance potentiometric hydrogen sensor based on ZnO porous cage sensing electrode. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2024, vol. 54, pp. 1461–1468. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.260>
- [9] Motora K.G., Dileepkumar V.G., Wu C.-M., et al. Highly efficient and stable NiSe₂-rGO composite-based room temperature hydrogen gas sensor. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2024, vol. 50A, pp. 1174–1183.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.018>
- [10] Kim S., Song Y., Ahn H.-J., et al. Ultrafast response/recovery and high sensitivity of a hydrogen gas sensor at room temperature based on electrochemically deposited Sb₂Te₃/polystyrene composite film. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2024, vol. 50, part A, pp. 959–972. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.092>

- [11] Petrenko E.M., Semenova V.A. Alkaloids electrochemical multisensor express analysis in the electronic tongue format. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, no. 6 (105), pp. 144–156 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-6-144-156>
- [12] Downes F., Taylor C.M. Theoretical investigation of a multi-channel optical fiber surface plasmon resonance hydrogen sensor. *Opt. Commun.*, 2021, vol. 490, art. 126916. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.126916>
- [13] Konyukhov A.I. A nondispersive optical gas sensor with time division multiplexing of reference and active signals. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2023, no. 2, pp. 115–121 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032816223010184>
- [14] Alferov V.N., Vasilyev D.A. An acoustic gas analyzer. *Instrum. Exp. Tech.*, 2020, vol. 63, no. 5, pp. 787–790. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0020441220050085>
- [15] Wang W., Liu X., Mei S., et al. Development of a Pd/Cu nanowires coated SAW hydrogen gas sensor with fast response and recovery. *Sens. Actuators B: Chem.*, 2019, vol. 287, pp. 157–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.02.047>
- [16] Tasyurek L.B., Isik E., Isik I., et al. Enhancing the performance of TiO₂ nanotube-based hydrogen sensors through crystal structure and metal electrode. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2024, vol. 54, pp. 678–690. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.202>
- [17] Vasiliev A., Shakhnovich I., Samotaev N., et al. Intellectual thermoconductometric unit based on aerosol printed ceramic MEMS sensor for the measurement of natural gas composition. *Proceedings*, 2018, vol. 2, iss. 13, art. 736. DOI: <https://doi.org/10.3390/proceedings2130736>
- [18] Thermal mass flow sensor FS7. Application note. Switzerland, Ebnet-Kappel, IST, 2021.
- [19] Sazhin O. Novel mass air flow meter for automobile industry based on thermal flow microsensor. I. Analytical model and microsensor. *Flow Meas. Instrum.*, 2013, vol. 30, pp. 60–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2013.01.006>
- [20] Tang Z., Yang Q., Yu Ch., et al. Measurement of gas-liquid flows with the combination of thermal sensors and conductance sensor. *Flow Meas. Instrum.*, 2023, vol. 93, art. 102429. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102429>

Bocharnikov V.M. — Research Fellow, Laboratory of Non-Steady-State Gas Dynamic Processes, IIHT RAS (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation).

Volodin V.V. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Senior Research Fellow, Laboratory of Non-Steady-State Gas Dynamic Processes, IIHT RAS (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation).

Golub V.V. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Leading Research Fellow, Laboratory of Non-Steady-State Gas Dynamic Processes, IIHT RAS (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation).

Dentsel N.K. — Researcher, Laboratory of Non-Steady-State Gas Dynamic Processes, IIHT RAS (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation).

Elyanov A.E. — Research Fellow, Laboratory of Non-Steady-State Gas Dynamic Processes, IIHT RAS (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Bocharnikov V.M., Volodin V.V., Golub V.V., et al. Hydrogen concentration measurement in a flow using the thermoconductivity sensors. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2025, no. 5 (122), pp. 55–71 (in Russ.). EDN: UIQXRE