

И. К. Кабардин¹✉, М. Р. Гордиенко¹, А. Д. Ротарь¹, В. Г. Главный¹

Применение метода солевой метки для изучения многофазной гидродинамики

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: ivankabardin@gmail.com

Аннотация. В данной работе рассматривается развитие многоточечного электро-импедансного метода диагностики многофазных потоков. Основная цель исследования заключается в исследовании восприимчивости и разрешающей способности метода при изучении фазовых распределений в жидкостно-газовых системах. Предложен подход, основанный на использовании датчиков и алгоритмов обработки данных, обеспечивающих высокую чувствительность к изменениям электропроводности среды. Экспериментальная часть включает в себя изучение влияния единичных фазовых включений на измерительные параметры, что позволило уточнить характеристики метода в условиях локального изменения фазового состава. Полученные результаты демонстрируют эффективность подхода для определения структурных характеристик потоков и их динамических параметров. Практическая значимость работы заключается в применении метода для мониторинга и оптимизации промышленных процессов, где требуется высокая точная диагностика фазового состава.

Ключевые слова: многоточечный метод, многофазные потоки, контроль фазового состава, фазовые распределения, жидкостно-газовые системы, электропроводность среды

I. K. Kabardin¹✉, M. R. Gordienko¹, A. D. Rotar¹, V. G. Glavny¹

Application of the salt label method to study multiphase hydrodynamics

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: ivankabardin@gmail.com

Abstract. This paper discusses the development of a multipoint electrical impedance method for diagnosing multiphase flows. The main objective of the study is to investigate the susceptibility and resolution of the method when studying phase distributions in liquid-gas systems. An approach is proposed based on the use of sensors and data processing algorithms that provide high sensitivity to changes in the electrical conductivity of the medium. The experimental part includes a study of the effect of single phase inclusions on the measurement parameters, which made it possible to clarify the characteristics of the method under conditions of local changes in the phase composition. The results obtained demonstrate the effectiveness of the approach for determining the structural characteristics of flows and their dynamic parameters. The practical significance of the work lies in the application of the method for monitoring and optimizing industrial processes where highly accurate diagnostics of the phase composition is required.

Keywords: multipoint method, multiphase flows, phase composition control, phase distributions, liquid-gas systems, electrical conductivity of the medium

Введение

Данная работа посвящена развитию многоточечного электро-импедансного метода диагностики многофазных потоков. Современные методы измерений, из-

меряющие электро-импеданс, активно применяются для мониторинга различных процессов, включая исследования многофазных потоков в жидкостно-газовых системах. Однако точность и разрешающая способность традиционных методов диагностики часто не позволяют детально анализировать фазовые переходы и динамику в таких средах. В связи с этим исследование новых подходов и совершенствование существующих методов является актуальной задачей.

Электро-импедансный метод основан на измерении изменения электропроводности среды при наличии различных фаз, таких как жидкость или газ, что позволяет получать информацию о фазовом составе и распределении этих фаз в реальном времени.

Целью работы является экспериментальное исследование двух датчиков с различным количеством каналов и различной формы.

Задачами являлись выявление зависимости показаний датчиков от характеристик фазовых включений в исследуемых средах и оценка их применимости в реальных условиях.

Решение этих задач направлено на расширение возможностей метода и его практическое применение для контроля фазового состава и динамики многофазных потоков в различных промышленных процессах.

Описание метода

Для исследования многофазных потоков используется электро-импедансный метод диагностики. Его суть состоит в том, что при пропускании переменного тока через исследуемую среду изменяется ее проводимость в зависимости от физических и химических свойств составляющих фаз. Измеряя изменения проводимости в различных точках потока, можно судить о концентрации и распределении этих фаз [1–2].

Для исследования фаз могут быть использованы электро-импедансные датчики – это устройства, которые измеряют сопротивление или проводимость между двумя или несколькими электродами, погруженными в исследуемую среду. Основной принцип измерения состоит в том, что на один из электродов подается переменный ток, электроды, расположенные на другом конце, принимают ток, прошедший через среду, измеряется импеданс, который зависит от состава среды и ее характеристик, таких как проводимость фаз.

Изменения проводимости обусловлены физическими характеристиками фаз, их взаимодействием и распределением. Основой метода является регистрация комплексного импеданса Z , который определяется как:

$$Z = R + \frac{1}{j\omega C}, \quad (1)$$

где R – активное сопротивление, C — электрическая емкость, $\omega = 2\pi f$ – угловая частота сигнала. Многоточечные датчики обеспечивают возможность пространственно-временного анализа параметров потока. Каждый канал таких датчиков фиксирует локальные изменения импеданса, связанные с изменением

проводимости среды, вызванным, например, попаданием пузырьков воздуха или изменением концентрации маркера.

Воздушные пузырьки, проходя через зону измерения, снижают проводимость из-за своей низкой электрической проводимости. Это вызывает увеличение сопротивления R . Влияние концентрации растворов на параметры импеданса изучалось с использованием водных растворов NaCl различной концентрации. Полученные данные о сопротивлении преобразовывались в графики концентраций маркера для каждого момента времени, что позволяло анализировать пространственно-временные изменения в потоке.

Экспериментальная часть

Изучалось изменение проводимости среды с использованием цилиндрического многоточечного электро-импедансного датчика (рис. 1) с 8 активными каналами. Датчик имел 4 опорных канала (на рис. 1а они находятся в пределах малой окружности), 8 регистрационных (на рис. 1а они находятся между малой окружностью и обкладкой датчика) и 4 пустых. Опорные каналы реализованы для возможности определения начала очередной последовательности опроса каналов. Эксперимент проводился для оценки восприимчивости датчика.



Рис.1. Схема цилиндрического датчика

Датчик погружался в дистиллированную воду. Для каждого из каналов последовательно создавались возмущения в виде подачи воздушных пузырьков с помощью шприца. Воздушные пузырьки подносились непосредственно к каждому из каналов, вызывая локальное изменение проводимости среды. На осциллографе фиксировались изменения напряжения, соответствующие реакции датчика на снижение проводимости, вызванное низкой проводимостью воздуха. Исследование проводилось с использованием осциллографа Rigol DS1054, имеющего частоту дискретизации 1 ГГц. Датчик был подключен к осциллографу, который фиксировал сигналы с каждого из каналов (рис. 2).

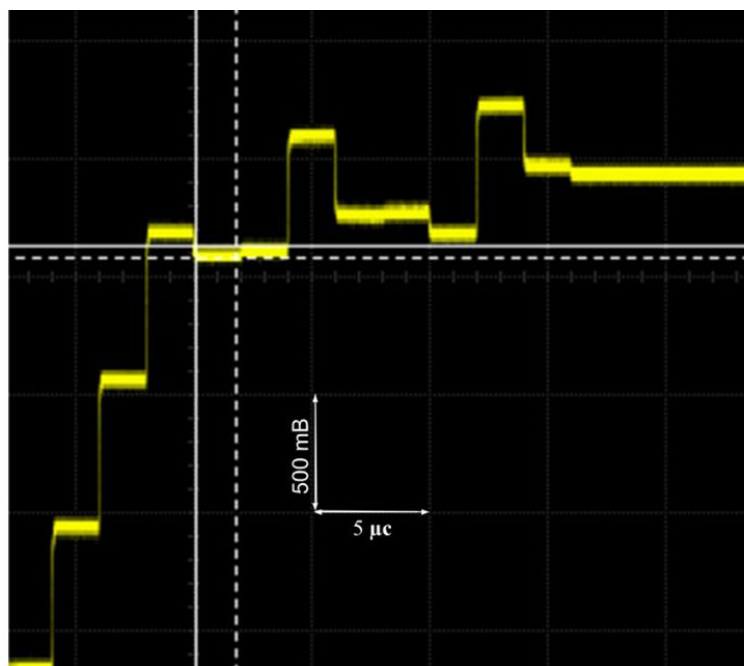


Рис. 2. Характерная осциллограмма сигнала

На осциллограммах рис. 3 и рис. 4 показано изменение амплитуды сигнала при поднесении пузырька воздуха к регистрирующему каналу 6. Для дальнейшего анализа была составлена таблица (табл. 1), в которой фиксируются изменения амплитуды напряжения для каждого из восьми каналов.

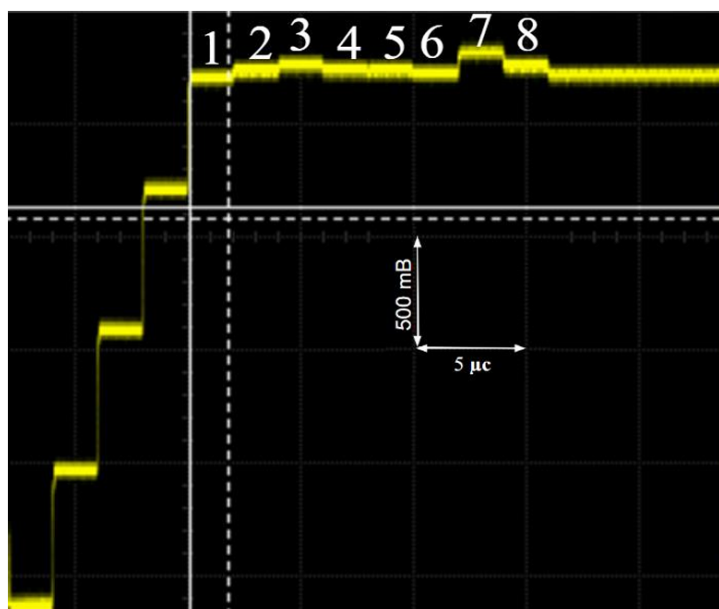


Рис.3. Сигнал в дистиллированной воде

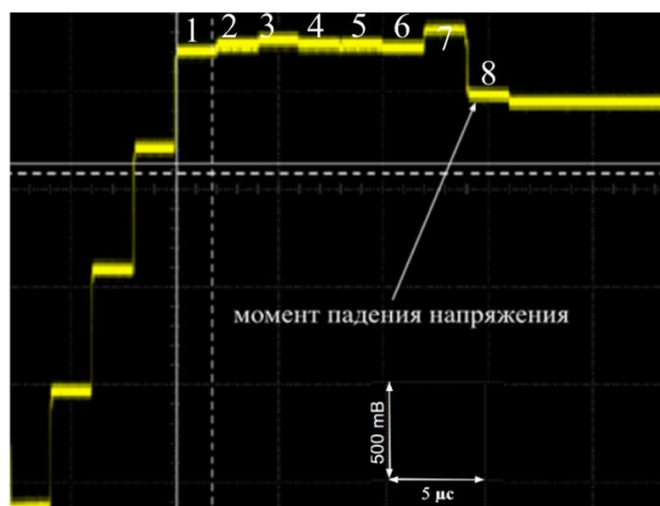


Рис.4. Сигнал после поднесения к каналу 6 пузырька с воздухом

Таблица 1

Амплитудные изменения сигнала на каждом канале

Номер канала	Амплитуда сигнала до пузырька, В	Амплитуда сигнала после пузырька, В	Изменение амплитуды, В
Канал 1	0,7	0,3	0,4
Канал 2	0,7	0,4	0,3
Канал 3	0,75	0,6	0,15
Канал 4	0,7	0,5	0,2
Канал 5	0,7	0,3	0,4
Канал 6	0,7	0,3	0,4
Канал 7	0,8	0,8	0,0
Канал 8	0,7	0,5	0,2

При поднесении пузырька воздуха к поверхности каналов датчика происходит значительное снижение амплитуды сигнала на большинстве регистрирующих каналов. Наиболее чувствительными оказались каналы 1, 5 и 6, где наблюдались максимальные изменения амплитуды. Из табл. 1 видно, что в канале 7 нет изменения амплитуды, из этого можно сделать вывод, что он неисправен и, в связи с этим, исключить его из дальнейшего исследования.

При погружении датчика в дистиллированную воду (рис.3) сигнал характеризуется четкой прямоугольной формой с относительно стабильными уровнями напряжения. Частота сигнала составляет около 31,256 кГц, а амплитуда достигает 1,77 В. Это указывает на низкую проводимость среды, что характерно для дистиллированной воды.

В случае погружения датчика в 8% раствор соли NaCl (рис. 5) амплитуда снижается до 1,39 В. Это демонстрирует существенное влияние высокой концентрации ионов на электрические свойства раствора. Увеличение частоты сигналов свидетельствует о возрастании проводимости раствора, что приводит к измене-

нию реактивных характеристик цепи. Однако, наблюдается снижение резкости фронтов сигнала, что, вероятно, связано с взаимодействием электродов датчика с ионным раствором и появлением нелинейных эффектов. С растворами солей 16% и 24% амплитуда сигнала падает до 796 мВ и 777 мВ соответственно.

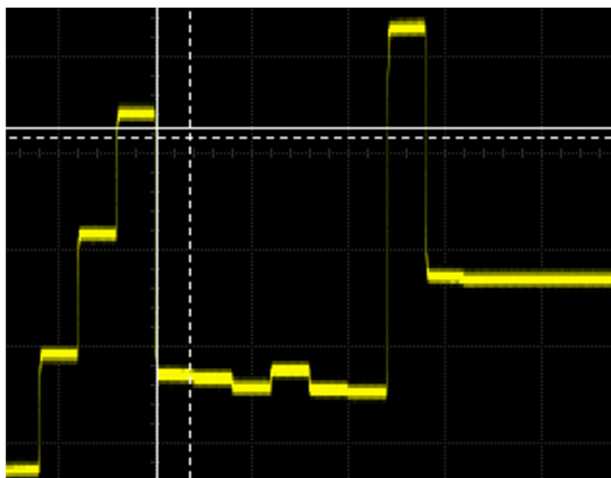


Рис.5. Сигнал при погружении датчика в соленый раствор 8%

После исследования среды на чувствительность проводились эксперименты по изменению напряжения на каналах цилиндрического датчика, погруженного в воду, при воздействии концентрированного раствора соли на поверхность жидкости. Для измерений использовался датчик, погруженный в воду, после чего на поверхность воды были добавлены капли раствора соли. Регистрируя падения напряжения, можно пронаблюдать, как растекается раствор соли на поверхности датчика. Данные записывались с использованием программного обеспечения LCARD, а последующая обработка производилась с помощью программного обеспечения, написанного на языке Python. Следует отметить, что каждый канал состоит из 20 точек измерения, что позволяет получать высокоточные данные о напряжении в динамике.

Результаты анализа рис. 6 показали, что при добавлении соли чувствительные каналы демонстрируют характерное для большей проводимости снижение напряжения. Этот эффект связан с изменением проводимости раствора. Наибольшее изменение напряжения наблюдается в промежутке времени около 2,7–3,5 секунд после начала воздействия, что соответствует фазе активного растворения соли и изменения локальной концентрации маркера. На канале 1 (lamel_5) зафиксировано максимальное снижение напряжения, которое составило порядка 1,5 В, что демонстрирует высокую чувствительность данного элемента.

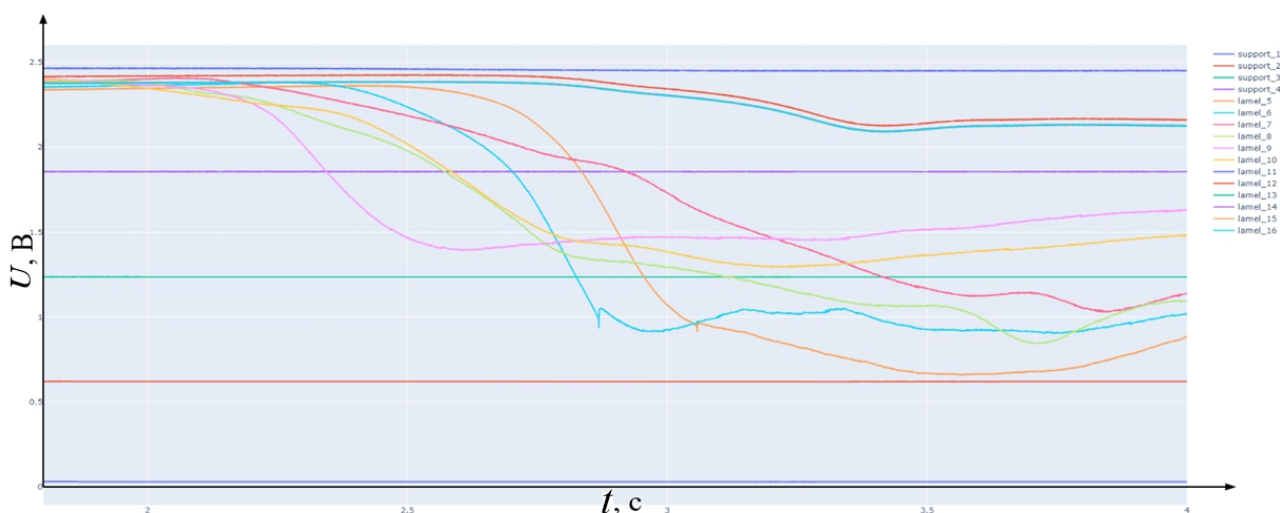


Рис.6. График распределения капли раствора на поверхности датчика

Каналы 2, 3, 4 проявляют нелинейное поведение, сопровождающееся колебаниями напряжения, что может свидетельствовать о неравномерном распределении соли в зоне их действия или о локальных турбулентностях в потоке раствора. Опорные каналы (1–4) остаются стабильными. Показана высокая чувствительность регистрирующих каналов датчика к изменениям проводимости раствора. Использование 20 точек измерения на каждом канале позволило получить детализированную картину изменений.

Исследовались изменения напряжения на многоканальном электро-импедансном датчике. Датчик представляет собой электрическую плату, интегрированную в элемент трубы с 4 опорными и 19 регистрирующими каналами (рис. 7). Для проведения эксперимента нижнюю часть пришлось герметично закрыть дном. Образованную полость мы заполнили водой, после чего на поверхность воды роняли каплю солевого раствора. Раствор растекался по поверхности датчика, вызывая изменения его электрических характеристик.

Капля соленого раствора падала примерно на середину датчика, для анализа использовались каналы 7, 8, 9 и 10 (рис. 8). В начале эксперимента напряжение на всех каналах оставалось стабильным, около 1,5 В. После начала взаимодействия с соленым раствором, примерно через 0,78 секунды от начала эксперимента, на каналах 8 и 9 наблюдалось резкое снижение напряжения до уровня около 0,5 В. Это значительное снижение свидетельствует о сильном воздействии раствора. Напряжение на каналах 7 и 10 изменилось менее существенно, снизившись до 1,2 В. Эти различия, вероятно, связаны с неравномерным растеканием раствора. В ходе эксперимента наблюдались колебания напряжения, особенно выраженные на каналах 8 и 9, с амплитудой около 0,3 В. К концу эксперимента сигналы начали стабилизироваться.



Рис.7. Исследуемая установка с пластинчатым датчиком

Во второй части эксперимента исследовались первые каналы. Капля попала только на канал 1, он продемонстрировал динамические изменения (рис. 9). В начале эксперимента его напряжение также оставалось стабильным, но через 7,7 секунды началось резкое снижение с 1,25 В до 0,55 В. Это указывает на контакт раствора с зоной датчика, контролируемой этим каналом. После изменения напряжение стабилизировалось на новом уровне, что отражает устойчивое увеличение проводимости вследствие воздействия солевого раствора. Амплитуда изменения напряжения для канала 1 составила 0,7 В.

Введение солевого раствора вызывает значительные изменения напряжения в активных каналах. Степень этих изменений зависит от локализации раствора относительно датчика. Опорные каналы продемонстрировали стабильность, что подтверждает достоверность измерений.

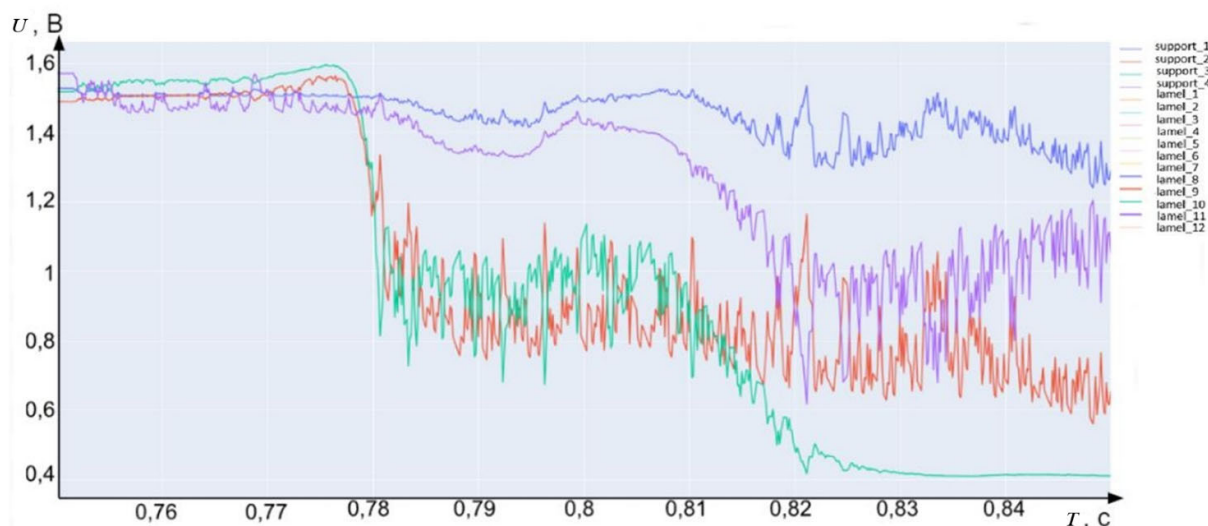


Рис.8. Изменение напряжения на середине датчика

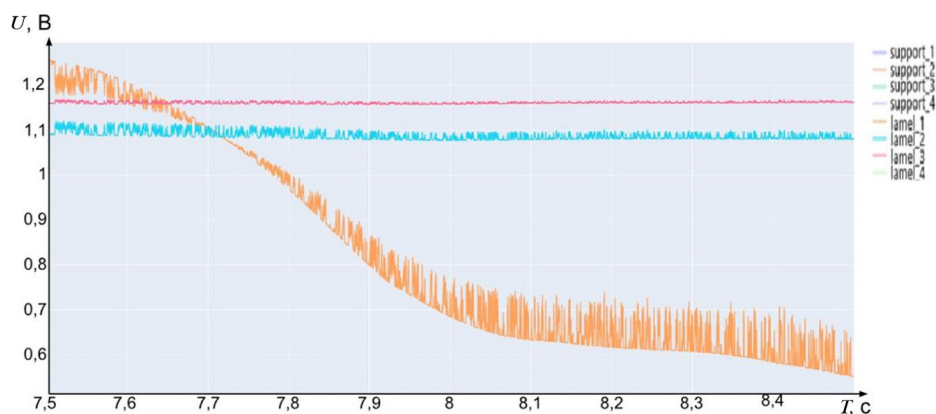


Рис.9. Изменение напряжения в канале 1

Заключение

В данной работе изучены возможности многоточечного электро-импедансного метода диагностики многофазных потоков. Исследованы два типа датчиков. Первый датчик содержал 8 измерительных каналов, второй – 19. Проведена оценка восприимчивости каналов к наличию газовой фазы вблизи электродов. С помощью второго датчика исследована диффузия солевого раствора при падении в жидкость. Экспериментально подтверждена пригодность многоканальной электроимпедансной системы для анализа фазового состава и динамики потоков. Полученные результаты демонстрируют потенциал метода для практического использования в мониторинге и оптимизации промышленных процессов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН № 121032200034-4.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Главный В.Г. Развитие кондуктометрических измерительных систем для изучения процессов тепломассопереноса в крупномасштабных моделях энергетических установок. Новосибирск, 2019, с. 10–21.
2. Гусев В.Е., Козлов В.И. Основы электрохимической импедансной спектроскопии. – М.: Наука, 2010. – 256 с.

© И. К. Кабардин, М. Р. Гордиенко, А. Д. Ротарь, В. Г. Главный, 2025