

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ

*И. Д. Вельт*

Лаборатория создана в 1955 году по инициативе и рекомендации доктора технических наук Дмитрия Ивановича Агейкина. В первый состав лаборатории входили: Засимкин В.Г., Соколова Л.Е., Перфильева Л.Д., Лебедев С.М., Воронин Н.Н., Неймарк Ф.П., Дружинина А.С., Спрыгина З.Д. В последующие годы в работе принимали участие: Михайлова Ю.В., Иванова О.В., Бурзаева Е.И., Овчинников А.П., Терехина Н.В., Орлов В.Н., Лукешкина С.Н., Сечкина Г.Ю.

Специализацией лаборатории стало освоение и развитие метода измерения расхода жидкостей на основе закона электромагнитной индукции, открытого М. Фарадеем. Стимулом для создания лаборатории явились публикации 1940-1950 годов А. Колина и Б. Тюрлеманна, об удивительных свойствах электромагнитного метода: при однородном магнитном поле сигнал расходомера не зависит от формы профиля потока, определяется интегральным значением скорости по поперечному сечению канала, не зависит от изменения числа Рейнольдса, и, следовательно, от вязкости, плотности и температуры. Эти свойства ставили рассматриваемый метод измерения вне конкуренции с другими методами измерения расхода.

### **Расходомеры для ионных сред**

Лабораторией созданы первые в стране общепромышленные электромагнитные расходомеры жидкостей с ионной проводимостью с диаметрами канала от 10 до 800мм. Эти приборы (ИР-1, ИР-3, 4-РИ, 5-РИ, «Индукция», «Индукция-51» и др.) в течение многих лет серийно выпускались тремя приборостроительными предприятиями страны: заводом ЗИП, г. Таллин, Арзамасским приборостроительным заводом и заводом «Ленводоприбор», г. Ленинград. Указанные приборы стали прообразом всех последующих электромагнитных расходомеров общепромышленного назначения, выпускаемых в стране.

Институтом, совместно с фирмой «Взлет» г. Санкт-Петербург создан электромагнитный расходомер ЭМР-КМ, Ду 300 мм. специальной конструкции для ферромагнитных пульп. Он измеряет два параметра: расход, независимо от магнитной проницаемости измеряемой среды и магнитную проницаемость пульпы.

Особенность расходомера состоит в том, что он при измерении расхода нечувствителен к изменению магнитной проницаемости измеряемой среды и, кроме того, позволяет измерять магнитную проницаемость пульпы. В рабочем объеме магнитного поля расходомера встроена специальная измерительная индукционная катушка. Величина ЭДС, наведенная в измерительной катушке, линейно зависит от концентрации ферромагнитной пульпы, т.е. от магнитной проницаемости измеряемой среды.

Для измерения расхода в каналах большого диаметра применяется конструкция расходомера, включающая в себя один или несколько малогабаритных электромагнитных преобразователей локальной скорости потока, устанавливаемых в трубопроводе с диаметрами от 100 до 4000 мм. Расход измеряют методом «площадь — скорость».

В лаборатории впервые удалось получить конструкцию преобразователя локальной скорости, у которого во всем рабочем объеме обеспечивается строгая ортогональность магнитного поля, линий токов между электродами и скорости жидкости, а поверхности электродов расположены по эквипотенциальным поверхностям электрического потенциала. Такой преобразователь скорости обладает оптимизированными характеристиками — небольшими размерами при максимальной чувствительности и не высокой потребляемой энергии, имеет минимальное гидродинамическое сопротивление потоку жидкости.

Электромагнитный преобразователь локальной скорости может выполнять и дополнительную функцию — измерять градиент скорости по какому-либо направлению. Из двух потенциалов, измеряемых электродами, обычно используется лишь одна их комбинация, в виде разности потенциалов. Сумма же этих потенциалов характеризует градиент скорости потока по направлению линии, соединяющей электроды. По градиентам скорости потока и координатам места положения измерителя рассчитывается поправка на влияние профиля скорости, вводимая в результат измерения расхода. Такой метод, разработанный лабораторией, получил название «площадь — скорость — градиент».

На основе этих работ в НИИТеплоприборе было создано несколько модификаций электромагнитных преобразователей скорости. Некоторые из них серийно изготавливаются в большом количестве различными производителями: (ПО Машиностроительный завод «Молния», ОАО «Тепловизор», ТБН «Энергосервис», г. Москва, СИБНЕФТЕАВТОМАТИКА, г. Тюмень) и весьма широко эксплуатируются.

Для электромагнитных расходомеров были разработаны имитационные средства метрологического обеспечения — установки типа «Поток». Их серийное производство осуществлялось в разные годы следующими предприятиями и организациями: НИИТеплоприбором, г. Москва, Таллинским заводом ЗИП, Арзамасским приборостроительным заводом, заводом «Электрон», г. Тюмень, предприятием «СКБ Нефтехимприбор», г. Баку.

### **Расходомеры для жидкометаллических теплоносителей**

В первый год существования лаборатории был создан первый в мире безэлектродный электромагнитный расходомер.

Совместно с ФЭИ (г. Обнинск) разработаны первые в стране магнитные расходомеры для измерения жидкометаллических теплоносителей атомных реакторов. Созданные в лаборатории расходомеры ИРМУ поставлены в 1979 году на Белоярскую атомную станцию (энергоблок БН-600). Фактический срок их службы (42 года) превышает установленный по ТУ (6 лет) в семь раз.

Расходомеры ИРМУ используют индуктор, представляющий собой постоянный магнит. Основными их недостатками является низкая стабильность магнитного поля во времени, низкая помехозащищенность, отсутствие возможности диагностирования стабильности показаний при эксплуатации.

В 2010-2014 гг. институтом выполнена разработка нового поколения магнитных расходомеров жидкого натрия ИРМУ-1, в которых использован накопленный опыт и достижения современного приборостроения. В расходомере ИРМУ-1 вместо постоянных магнитов применен электромагнит, питаемый импульсным низкочастотным биполярным стабильным током. Применение импульсного магнитного поля позволило отделить информативную компоненту сигнала от всех помех электромагнитного происхождения, изменение которых во времени не кратно частоте изменения магнитного поля возбуждения. Таким образом, помехи, вызванные промышленной частотой и термо-эдс, полностью устраняются. Благодаря этому существенно повысилась точность измерения расхода, и появилась возможность снизить на порядок магнитное поле в канале.

Во время переключения полярности магнитного поля в различных элементах конструкции расходомера возникают токи Фуко. Благодаря алгоритму обработки сигнала достигнуто отсутствие влияния на метрологические характеристики токов Фуко в широком диапазоне изменения температуры жидкого металла. Отсутствует

необходимость коррекции нуля, достигнута возможность измерения малых расходов и обратного потока. В этой работе впервые решена задача периодической поверки расходомера без демонтажа прибора с трубопровода и остановки потока жидкого металла через канал прибора.

Расходомеры ИРМУ-1 поставлены на атомные энергетические установки РУ БН-600 и РУ БН-800.

### **Расходомер на эффекте сверхпроводимости**

Выдающиеся открытия высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в 1986-87 годах породили в последующие годы поистине лавинный поток исследований и соответственно публикаций по поиску новых ВТСП-керамик, изучению их свойств, освоению новых технологий и созданию из них элементов систем, установок, машин, приборов и устройств. Лаборатория не устояла от соблазна создать расходомер с использованием элементной базы из ВТСП-керамики. Это привело к созданию первого в мире способа измерения расхода, использующего эффекты высокотемпературной сверхпроводимости.

Исследования, проводимые лабораторией в области высокотемпературной сверхпроводимости, позволили создать перспективный расходомер класса точности 0,2% для криогенных сред с температурой до 120К (в том числе для жидкого и газообразного азота, кислорода, аргона и т.п.). В расходомере используется струйный автогенератор с термопреобразователями из ВТСП-керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-8}$ ,  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ .

Термопреобразователи использовались в качестве чувствительных элементов пульсаций скорости в струйном автогенераторном расходомере. Рабочим режимом термопреобразователя является фазовый переход в сверхпроводящее состояние. Были исследованы характеристики расходомера в натуральных условиях на потоке жидкого азота (при температуре 77,4К). Результаты испытаний показали, что созданный расходомер успешно конкурирует с применяемыми в настоящее время для криогенных сред турбинными расходомерами. В отличие от турбинного расходомера в приборе отсутствуют движущиеся элементы, поэтому он обладает повышенной надежностью и лучшими метрологическими характеристиками.

### **Имитационное моделирование электромагнитных расходомеров**

Одной из основных причин, сдерживающих развитие электромагнитных расходомеров, является несовершенство средств и методов метрологического обеспечения. До настоящего времени традиционными средствами метрологического обеспечения электромагнитных расходомеров являются стационарные проливные расходомерные установки.

Исследования в области имитационного моделирования электромагнитных расходомеров являются наиболее значимым достижением нашего коллектива. Этими работами лаборатория занималась практически с начала ее основания. Первая установка (типа УГИР) для поверки электромагнитных расходомеров беспроливным методом была создана в 1959 году. Тогда в электромагнитных расходомерах применялось однородное магнитное поле, а сами расходомеры имели не высокий класс точности (2,5%). Вскоре в расходомерах стали применять неоднородно распределенное магнитное поле. Это позволило существенно повысить точность расходомера, уменьшить энергопотребление, габаритные размеры и вес приборов, однако усложнило применение установки УГИР для поверки приборов.

Для расходомеров с неоднородным магнитным полем для расчета метрологических характеристик недостаточно измерения магнитного поля в небольшой локальной области (например, в центре канала, как это делалось в установке типа УГИР), необходимо иметь полную информацию о величине и топографии магнитного поля во всей рабочей зоне канала. Иначе нельзя осуществить имитационным способом с необходимой точностью метрологическую аттестацию расходомера.

Измерение распределения неоднородного магнитного поля в канале оказалось практически невыполнимым из-за сложности измерений и низкой точности получаемого результата. Исключить необходимость измерения магнитного поля, ориентируясь на расчетное его определение, также оказалось безрезультатным. Неоднородность распределения магнитного поля в канале зависит от многих факторов, некоторые из которых трудно контролируемы: например, плотность катушки индуктора, магнитные свойства материала трубопровода, неточность изготовления и сборки магнитопровода, качество сборки первичного преобразователя в целом и т.п.

Необходимо принципиально иное решение задачи о беспроливном методе исследования электромагнитного расходомера, которое бы обладало простотой выполнения измерений и достаточной точностью получаемого результата.

Для измерения магнитного поля в рабочем объеме канала была предложена конструкция преобразователя магнитного поля (зонда), представляющая собой специальную, плоскую индукционную катушку, располагаемую в канале на внутренней поверхности канала или в плоскости оси канала и линии, соединяющей электроды.

Физической основой создания преобразователя магнитного поля в виде поверхностной или плоской индукционной катушки явилась возможность восстановить характеристику магнитного поля во всем рабочем объеме канала по характеристике распределения на указанных поверхностях. Выбором топологии витков катушки можно моделировать приборы различной конструкции и при различных гидродинамических режимах и структурах потока.

На основе полученных результатов для поверки электромагнитных расходомеров были разработаны имитационные средства метрологического обеспечения — установки типа «Поток». Их серийное производство осуществлялось в разные годы следующими предприятиями и организациями: НИИТеплоприбором, г. Москва, Таллинским заводом ЗИП, Арзамасским приборостроительным заводом, заводом «Электрон», г. Тюмень, предприятием «СКБ Нефтехимприбор», г. Баку

Установка Поток-Т состоит из набора преобразователей магнитного поля (зондов), персональной ЭВМ, интерфейсной платы, содержащей аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователь, согласующего блока и пакета программ. Основная погрешность установки  $\pm 0,2\%$ . Установка обеспечивает поверку электромагнитных расходомеров, счетчиков-расходомеров и теплосчетчиков как отечественного, так и зарубежного производства. В настоящее время изготовлено и находится в эксплуатации в России и за рубежом несколько десятков имитационных поверочных установок типа Поток.

Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные институтом, многократно докладывались и обсуждались на самых авторитетных международных конференциях, в том числе IMEKO, FLOMEKO, и опубликованы в различных научных и технических журналах. Было создано более 90 изобретений в области электромагнитного метода измерений и опубликовано более 250 научных и инженерно-технических работ. Технические решения, используемые в этих работах, отмечены множеством медалей ВВЦ (ВДНХ), дипломами на Всемирных салонах в Брюсселе, Париже и Женеве, четырьмя золотыми и тремя серебряными медалями Всемирных салонов по изобретениям. Лаборатория и сейчас является одной из

ведущих в мире по научному потенциалу в области методов и средств измерения расхода.

На разных стадиях работ в особенности при исследованиях в области метрологического обеспечения приборов осуществлялось тесное сотрудничество с известными научно-исследовательскими институтами Госстандарта страны. В результате этих работ впервые созданы, сертифицированы и зарегистрированы в Госстандарте имитационные установки как средства измерения, которые применимы в качестве метрологического обеспечения электромагнитных расходомеров.