

Магнитная система на основе постоянных магнитов для расходомера многофазных текучих сред

М. Я. МАРУСИНА, Б. А. БАЗАРОВ, П. А. ГАЛАЙДИН, А. А. СИЛАЕВ,
М. П. МАРУСИН, Е. Ю. ЗАКЕМОВСКАЯ, А. Г. ГИЛЕВ, А. В. АЛЕКСЕЕВ

С.-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, С.-Петербург, Россия, e-mail: marusina_m@mail.ru

Приведен алгоритм построения магнитной системы расходомера многофазных текучих сред, обеспечивающий его минимальный вес и габариты. Система гарантирует высокие значения магнитной индукции в рабочей области расходомера (0,5—1,0 Тл и более) с большой степенью однородности (менее $(20...30) \cdot 10^{-6}$) в требуемых объемах.

Ключевые слова: расходомер, ядерный магнитный резонанс, индукция, поляризация, градиент.

An algorithm for constructing the magnetic system of flowmeter of multiphase fluids providing a minimal weight and size is presented. This system ensures the high values of magnetic induction in the flowmeter working range (0,5—1,0 tesla or more) with high degree of homogeneity (less than 20—30 ppm) in required volumes.

Key words: flowmeter, nuclear magnetic resonance, induction, polarization, gradient.

При анализе различного рода бесконтактных расходомеров, построенных на тех или иных физических принципах и предназначенных для измерений расхода многофазных текучих сред без непосредственного контакта чувствительных элементов с измеряемой средой и нарушения поля течения потока выявлено, что в основе их создания лежат пространственные и временные параметры полей течения измеряемой среды. Особенно это касается расходомеров, основанных на явлении ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [1, 2]. Решением технической задачи создания ЯМР-расходомера может стать устройство, содержащее: трубопровод для потока многофазного флюида; датчик для поляризации ядер жидкости, работающий на ЯМР и установленный на корпусе магнитной системы (МС); градиентные ка-

тушки с блоком управления током; передающую и приемную системы радиочастотных катушек с системой управления; процессор для обработки поступающей информации по заданным алгоритмам; датчики давления и температуры, управляемые МС и обеспечивающие стабильность магнитной индукции (МИ) в широком диапазоне внешних дестабилизирующих факторов; предполяризующую МС на постоянных магнитах.

Авторами рассчитан весь комплекс МС как на постоянных магнитах, так и электромагнитных систем, создан алгоритм синтеза МС, обеспечивающей явление ЯМР в рабочей области расходомера с минимальными массой и габаритными размерами.

Магнитные системы должны обеспечивать следующие технические характеристики:

неоднородность МИ в центре МС, ограниченном объеме цилиндра диаметром 50 мм и длиной 60—90 мм вдоль оси трубопровода, должна быть не более $(20—30) \cdot 10^{-6}$;

неоднородность МИ в рабочем объеме в центре МС, ограниченном объемом цилиндра диаметром 10 мм и длиной 40 мм вдоль оси трубопровода — не более $(2—3) \cdot 10^{-6}$;

диапазон рабочих температур составляет $(20 \pm 10)^\circ\text{C}$;

в диапазоне температур $-40 \dots +50^\circ\text{C}$ МИ в рабочей области диаметром 50 мм и длиной 60 мм должна быть $B_1 \geq 0,38$ Тл с погрешностью не более ± 5 мТл и поддерживаться или с помощью дополнительной электромагнитной системы от индивидуального источника питания, или пассивной системы стабилизации на основе специальных терромагнитных материалов (термошунтов), или же комбинации первых двух.

Магнитную систему с дополнительной электромагнитной системой можно использовать при настройке на резонанс магнитного поля внутри рабочей области измерителя, подбирая токи управления в катушках. Измеритель в этом случае содержит МС для создания градиентных магнитных полей [3—5].

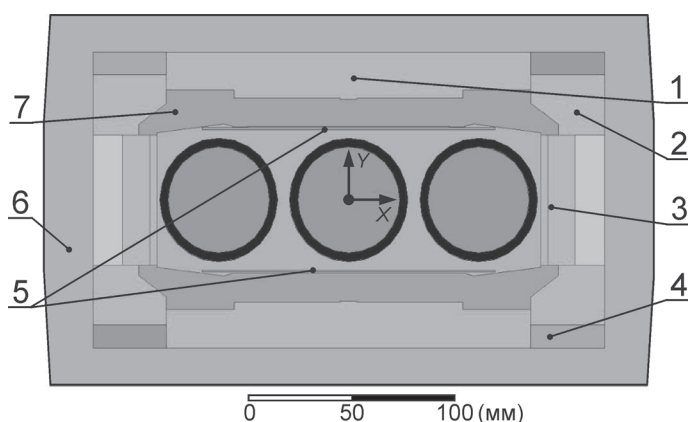


Рис. 1. Поперечный разрез магнитной системы:

1 — основной постоянный магнит; 2, 3 — дополнительные магниты; 4 — катушка электромагнитной системы; 5 — МС градиентных катушек; 6 — внешний магнитопровод; 7 — полюсные наконечники

Расчет МС для расходомера многофазных текучих сред на основе ЯМР. На современном этапе инженерных расчетов для моделирования ЯМР-процессов чаще всего применяют:

метод конечных разностей во временной области для нахождения временных и спектральных зависимостей [6—8], разработанный специально для решения уравнений Максвелла, в которых изменения электрического и магнитного полей во времени зависят от изменений соответственно магнитного и электрического полей в пространстве;

метод конечных элементов для решения широкого класса задач, сводящихся к уравнениям в частных производных. По сути, это вариационный метод с кусочно-полиномиальными пробными функциями, применимый к обширному классу уравнений в частных производных. Он позволяет точно описать сложные криволинейные границы области определения решения и краевые условия, обеспечивает единственность приближенного решения во всех точках рассматриваемой области и более эффективен на практике. Поэтому именно этот метод, реализованный в программном продукте ANSYS, был выбран для решения задачи расчета магнитостатических полей.

Магнитная система магниторезонансного измерителя состава и расхода скважинной жидкости. Основной магнит предназначен для получения поляризующего магнитного поля, необходимого для намагничивания жидкости непосредственно перед постановкой метки и для снятия сигнала с частотой ЯМР. В связи с этим основной магнит должен в достаточно большом рабочем объеме генерировать магнитное поле с относительно большой индукцией B_0 (сигнал ЯМР пропорционален $B_0^{2/3}$), высокой однородностью (относительная неоднородность $\Delta B_0 \leq 10^{-5}$) и удовлетворительной температурной стабильностью.

Главными преимуществами магниторезонансного измерителя состава и расхода скважинной жидкости, по сравнению с остальными преобразователями расхода, являются бесконтактное измерение расхода, возможность анализа состава и времени релаксации вещества, непрерывно текущего в трубопроводе [9, 10]. Все магниторезонансные измерители можно разделить на амплитудные, частотные, нутационные и меточные. Наиболее точные — меточные расходомеры [11], в которых на каком-либо участке пути от основного магнита (поляризатора), намагничивающего жидкость, до приемной радиочастотной катушки изменением направления вектора намагниченности ядер (возбуждения) в потоке создаются метки с помощью возбуждающей радиочастотной катушки. Расход Q определяется по времени t прохождения жидкостью пути L от отметчика до приемной радиочастотной катушки:

$$Q = kL\pi d^2 = kV_L/t,$$

где k — поправочный множитель, учитывающий реальные условия измерения времени; V_L — объем участка трубопровода длиной L ; d — диаметр трубопровода.

Для введения магнитной координаты по оси X необходимо также наличие линейно изменяющегося в направлении потока жидкости магнитного поля, называемого градиентным [9—10]. Таким образом, МС магниторезонансного из-

мерителя должна содержать основной магнит, градиентную систему для получения градиентного поля и радиочастотные катушки.

Первоначально была разработана двухмерная модель МС с целью достижения заданной (требуемой) однородности МИ в поперечном сечении трубопровода расходомера, и проведена оптимизация путем подбора геометрических размеров всех элементов МС, обеспечивающих минимальные массу и габаритные размеры.

На рис. 1 показан поперечный разрез МС с обозначением ее основных элементов. Основной постоянный магнит 1 изготовлен из сплава Sm2Co17 марки КС-25. Дополнительные магниты 2, 3 обеспечивают концентрацию МИ в рабочей

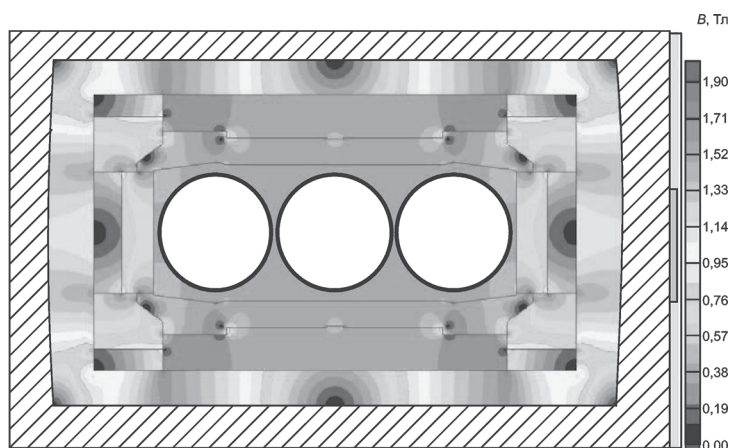


Рис. 2. Общая картина распределения магнитной индукции для сечений трубопроводов диаметром 50 мм

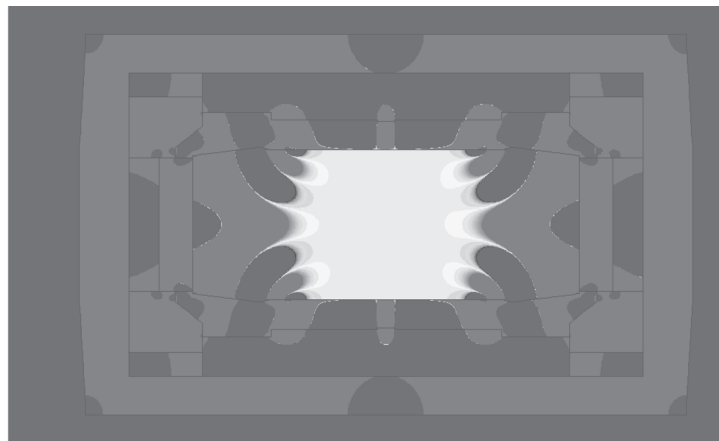


Рис. 3. Рассчитанная зона однородности в центре магнитной системы

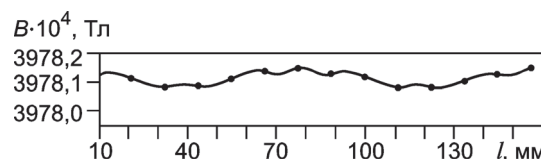


Рис. 4. Распределение магнитной индукции по контуру радиусом 25 мм в рабочей зоне системы; однородность $8,8 \cdot 10^{-6}$; l — длина контура

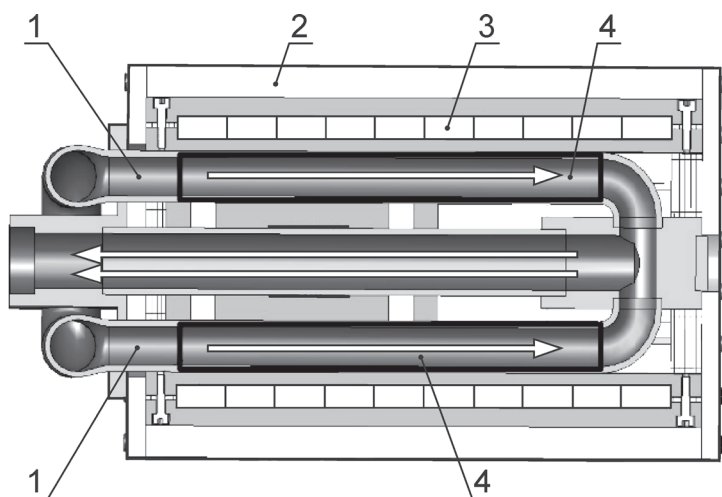


Рис. 5. Схема расположения трубопровода внутри магнитной системы:

1 — трубопровод; 2 — внешний магнитопровод; 3 — основной постоянный магнит; 4 — предполяризующая зона

области измерителя продукции и тем самым позволяют значительно снизить массу и размеры МС. Катушка 4 электромагнитной системы компенсирует изменения МИ в рабочем диапазоне температур и служит для точной настройки на резонанс. Внешний магнитопровод 6 выполнен из стали с высокой намагниченностью насыщения (более 2 Тл), его конструкция обеспечивает взрывобезопасность. Снаружи внешний магнитопровод 6 защищен магнитным экраном (на рис. 1 не показан), выполненным из материала с высокой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой, например из пермаллоя 75НМ, аморфных сплавов специальных марок и др. Экран защищает зону однородности МС от влияния внешних магнитных полей. Полюсные наконечники 7 специального профиля — главная деталь конструкции, предназначенная для получения требуемой однородности в рабочем объеме МС и одновременно минимальных массы и размеров конструкции в целом. Полюсные наконечники выполнены из специальных магнитомягких материалов, отличающихся высокими объемной однородностью магнитных параметров и резистивностью, наряду с достаточно высокой (более 1,5 Тл) намагниченностью насыщения. Детали конструкции МС, изготовленные из термомагнитных материалов, обеспечивающих стабильность МИ в рабочем диапазоне температур, на рис. 1 не показаны. Количество элементов, их размеры и расположение подбирают по специальной программе, их неправильная установка может нарушить однородность МИ в рабочем объеме МС.

На основе подбора оптимальных геометрических размеров элементов МС были рассчитаны значения МИ и определено соответствие геометрических размеров всех конструктивных элементов требованиям технического задания, что обеспечило необходимую однородность в поперечном разрезе измерительного трубопровода. Результаты расчета двухмерной модели МС приведены на рис. 2—4.

Предварительная поляризация. Прежде чем ядра молекул жидкости, протекающей по трубопроводу, попадут в зону датчика ЯМР, предполяризующей магнитной системой обеспечивается их предварительная поляризация. При этом желательно, чтобы уровень поляризации был близок к максимальному (равновесному значению магнитного поля в области датчика ЯМР) для всех компонентов и фаз в потоке. Достигнуть заданного (равновесного) магнитного поля поляризации ядер возможно увеличением времени нахождения флюида в предполяризующей МС до $5t_1$, где t_1 — время спин-решетчатой релаксации. К примеру, если использовать один из стандартных диаметров трубопровода 50 мм и выбрать $t_1 = 1$ с, то легко найти, что для расхода 40 м³/сут длина участка трубопровода, находящегося в предполяризационном магнитном поле (H_{pol}), должна быть не менее 700 мм. Эффективно уменьшить время, необходимое для достижения поляризации ядер M_0 равновесной для магнитного поля H_0 , можно выдерживая некоторое время ядра при $H_{pol} > H_0$. Так, если $H_{pol} \approx H_0$, то $M = 0,9M_0$ (90 % от равновесного) достигается за время $t_{pol} \approx 2,3t_1$; если у поля $H_{pol} \approx 2H_0$ — для той же цели потребуется время в четыре раза меньше.

Схема расположения трубопровода внутри основной и предполяризующей МС приведена на рис. 5.

Выводы. Создана прецизионная перспективная модель магнитной системы для расходомера многофазных текучих сред на основе явления ядерного магнитного резонанса. Разработана эскизная документация для создания оптимальной конструкции магнитной системы на постоянных магнитах, системы градиентных и радиочастотных катушек, других вспомогательных систем, обеспечивающих функционирование прибора в широком диапазоне температур. Выбраны материалы для изготовления магнитной системы на постоянных магнитах, магнитопровода, экранирующих систем; определены оптимальные геометрические размеры полюсных наконечников, обеспечивающих требуемую однородность магнитной индукции в рабочем объеме измерителя.

Разработанный программно-аппаратный комплекс поточного ЯМР-измерителя расхода и анализатора состава нефтегазодожидовой смеси позволит измерять содержание воды в составе жидкой смеси в диапазоне 0—100 % и объемный расход жидкости в диапазоне 0—60 м³/сут с погрешностью $\pm 2,5$ %.

Литература

1. Дружкин Л. А. Задачи теории поля. М.: Моск. ин-т радиоэлектроники и горной механики, 1964.
2. Блюм Б. Основы ЯМР. М.: Техносфера, 2011.
3. Пат. RUS 2054662. Устройство для создания магнитного поля с поперечным градиентом индукции / П. А. Галайдин, А. И. Замятин, М. Я. Марусина. Изобретения, 1993.
4. Галайдин П. А., Замятин А. И., Марусина М. Я. Проектирование корректирующей катушки ХЗ для МР-томографа с учетом влияния сердечника магнита // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. 1993. № 3. С. 43—48.
5. Галайдин П. А., Замятин А. И., Марусина М. Я. Расчет токовых шиммов с учетом влияния магнитной системы // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. 1993. № 5. С. 59—64.
6. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для инженеров и инженеров электриков. М.: Мир, 1986.

7. **Monk P. B.** Finite element methods for Maxwell's equations. Oxford: Univ. Press, 2003. P. 265—266.

8. **Jin J.** The Finite Element Method in Electromagnetics. N. Y.: Wiley, 2002.

9. **Марусина М. Я.** Коррекция неоднородности основного магнитного поля МР-томографа на постоянных магнитах: Автореф. дис. на соис. учен. степ. канд. техн. наук. СПб., 1993.

10. **Галайдин П. А.** Исследование и разработка элементов и устройств компьютерных магниторезонансных томографов: Автореф. дис. на соиск учен. степ. докт. техн. наук. СПб., 1996.

11. **Бобровников Г. Н.** Бесконтактные расходомеры. М.: Машиностроение, 1985.

Дата принятия 27.01.2014 г.

53.089.5

Состояние метрологического обеспечения измерений вязкости нефтепродуктов

А. А. ЦУРКО, А. А. ДЕМЬЯНОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, e-mail: A. A. Tsurko@vniim.ru

Рассмотрен вопрос о расширении температурного диапазона воспроизведения единицы вязкости на реометре Physika MCR 301 фирмы Anton Paar, Австрия. Приведены результаты первого этапа исследования метрологических характеристик реометра и обоснована необходимость дальнейших исследований.

Ключевые слова: вязкость, эталон единицы кинематической вязкости, реометр, стандартный образец.

The problem of expanding the temperature range of viscosity unit reproduction on reometer Physika MCR 301 of Anton Paar company, Austria has been considered. The results of the first phase of MCR 301 metrological characteristics of study are presented. The necessity of further studies is proved.

Key words: standard of kinematic viscosity unit, rheometer, certified reference material, viscosity.

Государственный первичный эталон (ГПЭ) единицы кинематической вязкости жидкости ГЭТ 17—96, который хранится во ВНИИМ, создан на основе капиллярного метода измерений вязкости, реализуемого набором капиллярных вискозиметров с «висячим уровнем», и воспроизводит единицу кинематической вязкости в диапазоне $0,4—10^5$ мм²/с со средним квадратическим отклонением результата измерений не более $1,5 \cdot 10^{-4}$ и неисключенной систематической погрешностью, не превышающей $2 \cdot 10^{-3}$. Принцип действия эталона базируется на измерении времени, в течение которого поднимающаяся по капиллярной трубке жидкость заполняет полость известного объема.

Метрологические характеристики и степень эквивалентности ГЭТ 17—96 подтверждены международными сличениями, проведенными по программе сличений Консультативного комитета по массе и связанным с ней величинам МБМВ [1], а также КООМЕТ. По результатам сличений ГЭТ 17—96 находится на уровне эталонов ведущих стран, таких как Чехия, Германия и Япония. Государственный первичный эталон передает единицу кинематической вязкости эталонам 1-го разряда, стандартным образцам вязкости (СО) [2] и используется в исследованиях по расширению диапазона воспроизведения единицы вязкости.

Сегодня в России эксплуатируются десятки миллионов средств измерений (СИ) вязкости — капиллярные, ротационные, шариковые, колебательные и другие вискозиметры, поверка и калибровка которых проводится с использованием СО вязкости. Во ВНИИМ изготавливают и аттестуют СО вязкости жидкости в диапазоне $0,4—10^5$ мм²/с при температурах 20—100 °С [3]. Границы относительной погрешности при доверительной вероятности 95 % составляют $\pm 0,2$ % в диапазоне $0,4—10^4$ мм²/с и $\pm 0,3$ % в диапазоне $(3—10) \cdot 10^4$ мм²/с, что является наивысшей точностью для образцов вязкости, изготавливаемых на территории РФ.

Следует отметить, что не все образцы вязкости жидкости, которые предлагают другие фирмы, можно применять при поверках или калибровках СИ вязкости.

В настоящее время метрологически обеспечен довольно широкий диапазон измерений вязкости жидкости. Однако существует потребность в исследованиях и разработке новых СО для достижения высокой воспроизводимости и стабильности во времени значений вязкости в диапазоне температур от -35 до $+150$ °С. Область низких температур необходима для поверки таких СИ, как имитаторы холодной прокрутки двигателя, а область высоких температур — для